



ARTÍCULO

Sistema de postcosecha de Piñón Mediterráneo (*Pinus pinea* L.) producido en Chile.Ian Homer Bannister¹ ; Jorge Mac-Ginty Fontecilla¹ 

¹ Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Ingeniería y Suelos. Santiago, Chile. ihomer@uchile.cl; jorgemacginty@uchile.cl.

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2025.621>

Recibido: 26.02.2025; Aceptado 04.04.2025.

RESUMEN

La producción de piñón mediterráneo proveniente de *Pinus pinea* L. se presenta como un sector dinámico con un futuro prometedor. La creciente demanda global de piñones como alimento saludable, junto con su alto valor en el mercado, impulsan el desarrollo de esta industria. En Chile no existen prestadores de servicios que se dediquen a los procesos vinculados con la postcosecha del piñón mediterráneo y, a la vez, hay una falta de información general para poder llevar a cabo estas labores o a tener acceso a replicar estas máquinas y sus procesos.

En este estudio se analizó y optimizó el procesamiento del piñón mediterráneo en un sistema de tres fases (partidora de piña, calibradora, partidora de piñones), identificando y corrigiendo los puntos críticos, de manera de minimizar las pérdidas en el proceso de desgranado de la piña, asegurar la correcta selección del fruto en tres calibres, los cuales permiten seleccionar un mercado objetivo y ayuda a evitar las partiduras del fruto en el proceso de partidura de piñones. También se caracterizó la morfología, propiedades físicas y comportamiento de la semilla frente a la humedad, información fundamental para los procesos de postcosecha, especialmente para la apertura de semillas, la que mal realizada puede generar mermas significativas en la producción.

Palabras clave: Pine nuts, Equipos de clasificación y limpieza, frutos secos, pinoli.

SUMMARY

The production of Mediterranean pine nuts from *Pinus pinea* L. is presented as a dynamic sector with a promising future. The growing global demand for pine nuts as a healthy food, together with their high market value, drive the development of this industry. In Chile there are no service providers dedicated to the processes linked to the post-harvest of the Mediterranean pine nut and, at the same time, there is a lack of general information to be able to carry out these tasks or to have access to replicate these machines and their processes.

In this study, the processing of the Mediterranean pine nut was analyzed and optimized in a three-phase system (pine nut splitter, calibrator, pine nut splitter), identifying and correcting critical points in order to minimize losses in the pine nut shelling process, ensure the correct selection of the fruit in three sizes, which allow the selection of a target market and help prevent fruit splits in the pine nut splitting process. The morphology, physical properties and behavior of the seed in relation to humidity were also characterized. This is essential information for post-harvest processes, especially for seed splitting, since poor performance of this process can lead to significant losses in production.

Key words: Pine nuts, Sorting and cleaning equipment, nuts



INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las plantaciones de pino piñonero (*Pinus pinea*) han cobrado mayor relevancia, estimándose que más de 5.000 hectáreas se han establecido en la última década, impulsadas por el alto potencial comercial del piñón. De estas, solo 100 hectáreas fueron plantadas antes de 2014, distribuyéndose principalmente entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos (Loewe & Delard, 2016; Loewe *et al.*, 2025). Originalmente introducida en Chile como especie ornamental, *Pinus pinea* también se utilizó para la estabilización de dunas costeras, control de erosión y sombra para el ganado (Ávila *et al.*, 2020).

Esta especie es nativa de la cuenca del Mediterráneo, en países como España, Italia, Portugal y Marruecos, donde su principal interés radica en las semillas o piñones, conocidos como piñón mediterráneo. Este fruto seco es altamente valorado internacionalmente en el mercado de frutos secos, destacándose por su exclusividad y alto precio de comercialización (González, 2014). Con un consumo global en constante crecimiento, la demanda anual del piñón mediterráneo aumenta aproximadamente un 7-8% (Loewe & Delard, 2016).

Desde 2008, el Instituto Forestal (INFOR) ha liderado diversos proyectos de investigación enfocados en modelos productivos para esta especie y en la identificación de zonas potenciales para su establecimiento en Chile (Ávila *et al.*, 2020). La producción de piñas es mayor en las zonas más australes, atribuible al incremento de precipitaciones y temperaturas medias en etapas clave del ciclo reproductivo. Según estudios, la producción de piñas en Chile varía entre 2.355 y 3.183 kg/ha, superando a países como Italia (500-1.500 kg/ha), Portugal (700-900 kg/ha, con máximos de 7.000 kg/ha) y Túnez (media de 1.599 kg/ha) (Loewe & Delard, 2016).

A pesar de su alto potencial, existen brechas significativas en las labores de cosecha, postcosecha y mecanización que limitan el desarrollo de esta industria. En un proyecto anterior, (*Desarrollo de Técnicas de Manejo para Producir Piñones de Pino piñonero (Pinus pinea L.), una opción atractiva para Chile*, FONDEF4064632131) el INFOR importó máquinas para el procesamiento de piñas, pero su desempeño se vio afectado por múltiples puntos críticos, como la dureza, variabilidad en tamaño y morfología del fruto. Además, estas máquinas no fueron diseñadas específicamente para el procesamiento de *Pinus pinea* L., ya que como se nombró, en el ámbito comercial el término "piñones" (o "pine nuts" en inglés) abarca los frutos de diversas especies del género *Pinus*.

La morfología de las semillas varía según la especie, en aspectos como tamaño, peso, forma y dureza (Greene & Johnson, 1993; Cervantes *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2020; González & Loewe, 2012), lo que implica que la calibración y adaptación de estas máquinas debe ajustarse a la especie para la que fueron diseñadas. Este estudio aborda estas variables con el objetivo de mejorar y validar tecnologías para el procesamiento de postcosecha de piñas de *Pinus pinea* en Chile.

MATERIAL Y MÉTODO

El estudio se llevó a cabo en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile (33°34'11"S 70°37'50"W), ubicada en La Pintana, Santiago, entre los años 2023 a 2025. Se emplearon tres máquinas en secuencia: la rompedora de piñas (máquina 1), la calibradora de semillas (máquina 2) y la rompedora de semillas y limpiadora de piñones (máquina 3). La máquina 1 separa las semillas de las brácteas y el corazón de la piña; la máquina 2 clasifica las semillas en tres calibres homogéneos; y la máquina 3 rompe las semillas y separa los piñones blancos de las cáscaras.

El trabajo incluyó la caracterización inicial de las máquinas, la identificación de problemas, la implementación de modificaciones y la validación de las mejoras a través de ensayos.



Tratamientos y Diseño Experimental

- *Máquina 1, rompedora de piñas.*

Se evaluó los factores de posición del limitador, el cual regula si hay expulsión o no de material por la salida de expulsión de raquis (Figura 2c), y apertura de brácteas según el tiempo de secado de las piñas (2,5, 5 y 10 días). Se procesaron 40 piñas para los tratamientos de 2,5 y 10 días, y 20 piñas para el secado de 5 días, en configuraciones con y sin limitador. Cada tratamiento se repitió 3 veces. Se registraron semillas completas, trozos, cáscaras y brácteas recolectadas en las salidas del sistema de limpieza (suelo, harnero sistema limpiador, salida rotor y salida ventilador), y se verificó el material residual en el sistema de extracción por aire.

- *Máquina 2, calibradora de semillas*

Se probaron cribas de diámetros 11,0; 10,5; 10,0; 9,5; y 9,0 mm para optimizar la separación de las semillas en tres grupos de tamaño (calibre), donde los tres grupos fueran de similar peso. Se procesaron 60 Kg de semillas en 10 repeticiones de 6 Kg.

La máquina calibradora cuenta con 3 salidas, la salida 1 corresponde a las semillas más grandes y restos de brácteas las cuales no lograron pasar por el primer harnero; la salida 2 corresponde a las semillas que lograron atravesar el primer harnero, pero no el segundo; la tercera salida corresponde a las semillas y material que logró pasar por ambos harneros. Las semillas de las salidas 1 y 3 permanecieron sin cambios, mientras que las de la salida 2 se reprocesaron directamente sobre el segundo harnero para mejorar la separación. Se evaluó peso, largo y ancho de las semillas recolectadas.

- *Máquina 3, rompedora de semillas y limpiadora de piñones*

Se realizaron pruebas de firmeza con semillas clasificadas por la máquina calibradora y también se efectuaron pruebas de 20 semillas al azar de piñas de 8 localidades distintas: Quilvo, Cahuil Viejo, El Carmen, Apalta, Toconey, Verallia, Constitución y Santo Domingo, distribuidas entre las regiones de Valparaíso y Ñuble. Para este efecto, se seleccionaron 2 piñas al azar por localidad, de cada una de las cuales se extrajo 20 semillas que fueron sometidas a presión con un cilindro de gas para determinar el punto de ruptura (**Figura 1**). Se registró los datos de peso, largo, ancho y presión necesaria (bares) para romper cada semilla. Este enfoque permitió identificar y validar mejoras específicas para optimizar el procesamiento de piñas y piñones de *Pinus pinea*.

Se efectuaron también Pruebas de Firmeza a Distintas Humedades y Pruebas de Rompimiento. En las primeras se evaluó los beneficios de humedecer las semillas antes del rompimiento. Para ello, se usó grupos de 20 semillas del mismo calibre, sometidas a humedecimiento durante 2,5; 4; 8 y 20 horas, más un grupo control sin humedecer. Posteriormente, se realizaron pruebas de presión para determinar el punto de ruptura.

Para las Pruebas de Rompimiento se usó el procedimiento operacional de una empresa española productora de piñones, que consiste en mojar las semillas, dejarlas macerar en un depósito durante 12 horas, repetir el proceso de humedecimiento, y macerar otras 12 horas. Este procedimiento busca aumentar la elasticidad, reduciendo las pérdidas por piñones rotos durante el proceso de rompimiento de la cáscara. Para la evaluación, se utilizó 75 semillas humedecidas según este método y 75 sin humedecer, todas del mismo calibre. Se ajustó la distancia óptima de los rodillos para el calibre, y se comparó la cantidad de piñones enteros obtenidos con respecto a los que sufrieron daños mecánicos.



Figura 1. Máquina neumática de determinación de firmeza de cascara (Universidad de Kiel, Kiel, Alemania, fabricación propia)

Análisis de Resultados

Los datos obtenidos de la máquina rompedora de piñas se analizaron mediante un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con estructura factorial de tratamientos (1). Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa InfoStat.

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{(ij)} + \beta_k + \varepsilon_{ijkl} \quad (1)$$

Donde;

Y_{ijkl} es la variable respuesta,

μ es la media general,

A_i es el efecto del tiempo de secado al sol,

B_j es el factor limitador,

$(AB)_{(ij)}$ es la interacción entre el tiempo de secado y el uso del limitador

$\beta_{(k)}$ es el efecto bloque y

ε_{ijkl} es el error experimental, el cual se asume normalmente distribuido.

Para evaluar los resultados de las pruebas de la máquina calibradora (máquina 2) y de la resistencia de las semillas, se realizó una prueba de comparación múltiple de Fisher, con un nivel de significancia menor o igual al 5% ($p \leq 0,05$), esto con el fin de comparar los procedimientos e identificar el óptimo. Los análisis estadísticos se realizaron con el software InfoStat.

RESULTADOS

El proceso para producir piñones pelados incluye la ruptura de piñas, limpieza de semillas, clasificación por calibre, rompimiento de semillas y limpieza de piñones blancos. Este trabajo requiere tres máquinas: la rompedora de piñas, la calibradora y la rompedora de semillas, que operan de forma independiente, pero en secuencia.

La máquina 1 rompe las piñas y limpia las semillas, separándolas de las brácteas y el corazón de la piña. La máquina 2 clasifica las semillas en tres calibres mediante harneros. Finalmente, la máquina 3 rompe las semillas con un sistema de rodillos para obtener los piñones pelados, que luego son limpiados mediante harneros que separan el piñón blanco de los restos de semillas.

Maquina 1: Rompedora de Piñas

La utilización de la máquina rompedora de piñas puede ser independiente del resto de las máquinas, ya que puede ser utilizada también como sistema para solamente obtención de semillas, ya sea para su uso en viveros, o bien para su comercialización.

- *Componentes*

La máquina partidora de piñas consiste en un molino de garras o púas, que se encuentra al interior de un tambor de 40 cm de diámetro y un largo total de 1,2 metros, dentro del cual, los primeros 100 cm corresponden al sistema de rompimiento como tal. Siendo el resto destinado a la eliminación de los raquis y brácteas por expulsión. Las piñas se parten mediante el aplastamiento entre las púas y las paredes del tambor. Las garras del sistema rompedor de piñas están dispuestas en 9 grupos de cuatro púas, cada una con largos diferentes (**Figura 2**, derecha).



Figura 2. Detalle de la partidora de piñas. a) Tambor rompedor; b) tolva de alimentación; c) Sistema de expulsión de raquis. A la derecha, esquema trasversal de las garras del molino.

La máquina rompedora de piñas utiliza sistemas de limpieza con cribas circulares y harneros, logrando un 95% de limpieza en las semillas. Sin embargo, el proceso no es totalmente eficiente, y algunos piñones pueden quedar en los restos de las piñas, representando pérdidas. El material restante se limpia con 4 aspiradoras que eliminan la mayoría de los restos de brácteas.

La única regulación disponible, aparte de la intensidad de carga, es un limitador en la zona de rompimiento, que controla el tiempo de permanencia de las piñas en esa área (**Figuras 3 y 4**). Con el limitador abierto, las piñas pasan rápidamente, lo que puede dejar semillas adheridas a las brácteas o expulsarlas junto con

material grueso. Esta configuración permite un trabajo más fluido, pero requiere repasar manualmente o con la máquina el material sobrante.

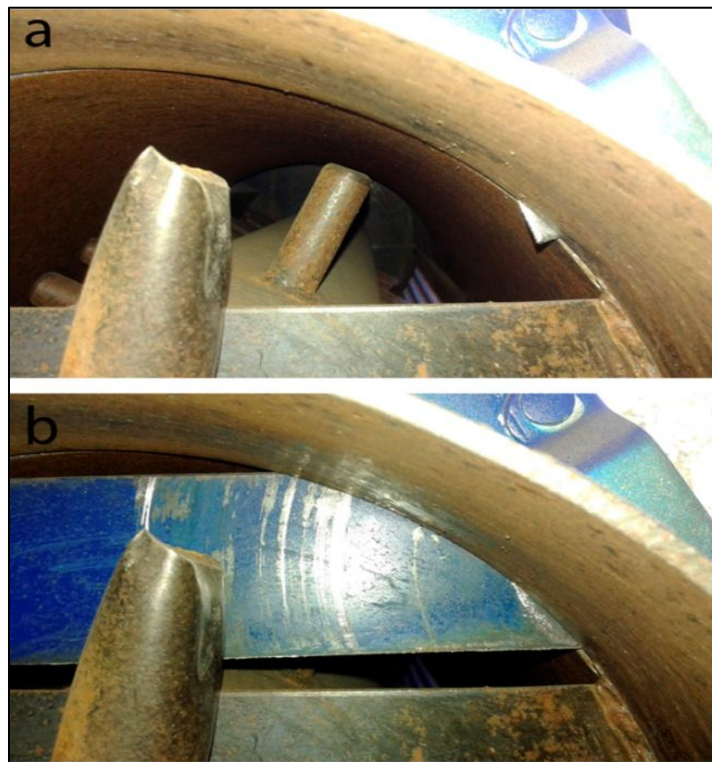


Figura 3. Abertura regulable del tambor: a) Abierto; b) Cerrado



Figura 4. Limitador del sistema rompedor de piñas.

Con el limitador cerrado, las piñas permanecen más tiempo en la máquina, lo que reduce las pérdidas, pero disminuye la producción. Con un operario, el proceso es más lento; con dos, uno puede encargarse de la carga y el otro del manejo del limitador. Una mala regulación puede causar excesivo rompimiento de piñas y semillas

- *Problemas y soluciones*

En el **Cuadro 1**, se aprecia un resumen de los problemas asociados y las soluciones realizadas en la maquina rompedora de piñas.

Cuadro 1. Problemas identificados y soluciones implementadas en maquina rompedora de piñas.

Problema y/o imperfecto	Solución y/o mejora
Perdida semillas por harnero en sinfín alimentador.	Levantar estructura con instalación de soportes para establecer bandeja receptora.
Apertura del limitador en punto inferior genera aglomeraciones de suciedad y trabazón del alimentador.	Modificación física del alimentador para cambiar el punto mínimo inferior.
Perdida de semillas por harnero separador de brácteas-semillas	Modificación del tamaño de las cribas del harnero separador brácteas-semillas

La máquina rompedora de piñas, se utiliza para extraer las semillas de las piñas. Su capacidad de procesamiento con compuerta cerrada es de 0,75 ton/h, operada por un solo trabajador encargado de abrir sacos, cargar piñas y controlar el limitador.

La principal modificación realizada fue en el sistema de limpieza. Dado que las semillas recolectadas contenían brácteas, algunas más grandes que las semillas, se reemplazó el harnero inferior del sistema partidor por uno de menor diámetro (**Figura 5**).

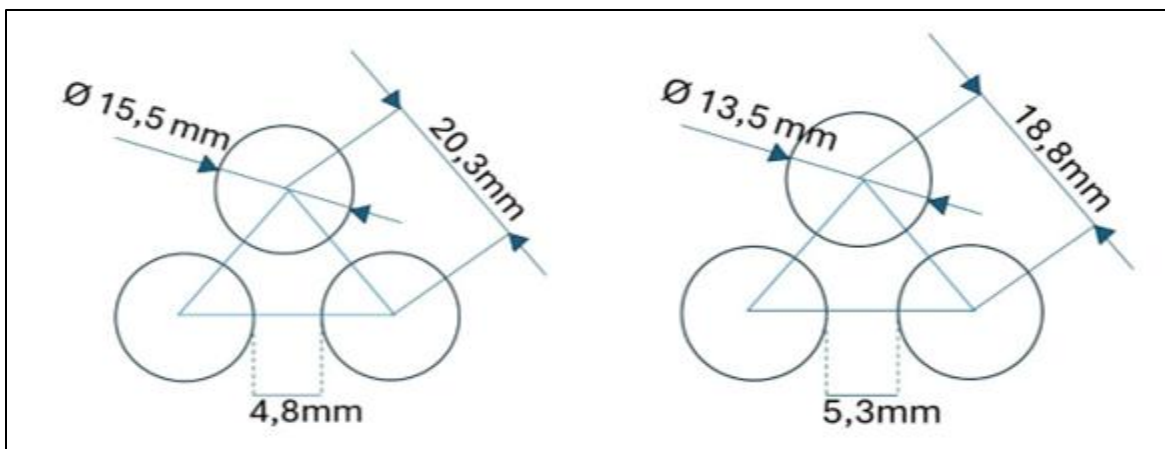


Figura 5 Esquema de modificación de diámetro del harnero. Izquierda original, derecha nuevo.

- *Resultados evaluaciones*

Con la compuerta abierta, se obtiene el doble de pérdida total, explicada en su mayoría por las pérdidas presentes en el rotor. Con respecto a los restos o residuos, las diferencias no son tan marcadas, pero parecen ser más abundantes cuando la compuerta está abierta (tratamiento 2).

En el **Cuadro 2** se muestra el funcionamiento bajo dos condiciones de uso: con compuerta limitadora abierta (libre paso del material hasta el exterior), y con la compuerta cerrada combinada con su apertura esporádica, manteniendo material más tiempo antes de liberarlo.

Cuadro 2. Resultado del comportamiento de la máquina rompedora de piñas con limitador cerrado-abierto y limitador abierto siempre.

Resultados	Limitador	
	Abierto	Cerrado-abierto
Semillas		
Rendimiento piñas/semillas %	18,1	21,4
Limpieza, peso semillas/peso residuos %	95,1	94,5
Pérdidas		
Semillas (respecto total) %*	8,8	2,4
Piñones (respecto potencial) %**	0,3	0,3

*semillas que fueron eliminadas por los sistemas de limpieza o quedaron atrapadas en los restos de piña.

**corresponde al porcentaje de piñones que fueron rotos durante la ruptura de la piña con respecto al potencial que pudo obtenerse asumiendo una relación piña/piñón pelado de 0,04.

Cuadro 3. Datos obtenidos de máquina rompedora de piñas (promedio $\pm$ error estándar).

Exposición al sol (días)	Apertura del limitador	% Residuos	Perdidas semillas (%)				
			Suelo	Harnero	Rotor	Aire	Total
2,5	Abierto	1,2 $\pm$ 0,5	0,1 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,4	2,2 $\pm$ 1,1	0,2 $\pm$ 0,1	2,8 $\pm$ 1,5
2,5	Cerrado	0,6 $\pm$ 0,3	0,0 $\pm$ 0,0	0,4 $\pm$ 0,2	0,8 $\pm$ 0,9	0,2 $\pm$ 0,2	1,4 $\pm$ 1,1
5	Abierto	2,9 $\pm$ 0,3	0,1 $\pm$ 0,1	0,4 $\pm$ 0,2	2,5 $\pm$ 0,5	0,1 $\pm$ 0,2	3,2 $\pm$ 0,8
5	Cerrado	2,1 $\pm$ 0,7	0,0 $\pm$ 0,0	0,6 $\pm$ 0,3	0,6 $\pm$ 0,3	0,4 $\pm$ 0,5	1,7 $\pm$ 0,3
10	Abierto	1,1 $\pm$ 0,5	0,1 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,1	1,4 $\pm$ 0,6	0,1 $\pm$ 0,1	1,9 $\pm$ 0,6
10	Cerrado	1,0 $\pm$ 0,2	0,1 $\pm$ 0,1	0,3 $\pm$ 0,0	0,3 $\pm$ 0,1	0,1 $\pm$ 0,1	0,8 $\pm$ 0,2

Suelo: bajo la máquina; Harnero: referido a que salen por harnero de limpieza; Rotor: referido a pérdidas por salidas junto con las brácteas; Aire, que salen por sistema de limpieza por aire

Se determinó que no hay interacción ($p > 0,05$) entre los factores "días de exposición al sol" y "condición del limitador (abierto o cerrado)", actuando de forma independiente. El factor "exposición al sol" no afecta el porcentaje de pérdidas de semillas, pero el "estado del limitador" sí tiene un efecto ($p = 0,0077$). Mediante una prueba de comparación múltiple de Fisher ($p \leq 0,05$), se confirmó que, independientemente de los días de exposición al sol, cerrar el limitador reduce las pérdidas de semillas durante el procedimiento de ruptura.

Máquina 2: Calibradora de Semillas

• Componentes

La máquina calibradora, permite procesar las semillas recolectadas desde la máquina rompedora de piñas, y poder separar en tres tamaños, aspecto crucial para el proceso de rompimiento posterior de las semillas. Esta máquina cuenta únicamente con un sistema de vibrador de dos harneros de diferente tamaño de criba, los cuales separan tres grupos de piñones en función de su diámetro.

El proceso de calibrado es crucial para el buen procesamiento en la máquina rompedora de semillas, ya que el traslape entre los diámetros de las semillas dificulta su rompimiento y la limpieza de los piñones.



Se utiliza un movimiento vibratorio que permite separar en tres tamaños de semillas mediante la existencia de dos harneros superpuestos con aberturas de diferente tamaño (**Figura 6**).



Figura 6. Criba del harnero superior de la máquina calibradora

Bajo cada harnero, se encuentra una malla con pequeñas esferas de goma que rebotan con la vibración, las cuales golpean aquellas semillas que se quedan atascadas en la criba del harnero, el cual tiene perforaciones oblongas de 25 mm de largo.

El movimiento vibratorio junto con la pendiente de los harneros transporta los grupos de semillas a cada una de las tres salidas según se muestra en la **Figura 7**.



Figura 7. Máquina calibradora con sus tres salidas.

Luego, en función de su tamaño o calibre, las semillas procesadas saldrán por alguna de las tres salidas de la máquina, de acuerdo con el detalle del **Cuadro 4**.

Cuadro 4. Tamaño medio de las semillas obtenidas en cada salida de la máquina calibradora.

Salida	Diámetro promedio (mm)
S1	10,99
S2	10,32
S3	8,61

- *Problemas y soluciones*

En el **Cuadro 5**, se aprecia un resumen de los problemas asociados y las soluciones realizadas a la máquina calibradora

Cuadro 5. Problemas identificados y soluciones implementadas en máquina calibradora de semillas.

Problema y/o imperfecto	Solución y/o mejora
Separación muy heterogénea de las semillas en 3 calibres, tanto en tamaño como en cantidad.	Cambio de harnero de cribas ovaladas por cribas redondas
	Pruebas de distribución en diferentes diámetros de cribas redondas para determinar el más adecuado.

Para una buena calibración, se recomienda pasar las semillas unas 5 veces por la máquina 2, con un rendimiento mínimo de 45 Kg/h, basado en pruebas de maquinaria donde no hubo limitaciones para procesar mayores volúmenes. La capacidad máxima de volumen de procesamiento aún es desconocida.

Con dos harneros de limpieza, las semillas y restos de suciedad se distribuyen en tres salidas, manteniéndose en la salida 1 los materiales y semillas que no atravesaron los harneros. El **Cuadro 6** muestra la distribución de las semillas entre las tres salidas de la máquina y el porcentaje de material limpio, es decir, la relación entre el peso de las semillas y los residuos.

Cuadro 6. Porcentaje de las semillas obtenidas en cada salida de la máquina clasificadora.

Resultados	Salidas		
	S1	S2	S3
Semillas (% del total)	1,3	10,6	88,1
Semilla limpia (%)	65,1	95,5	97,7

Los harneros de esta máquina no clasifican correctamente, ya que el 88,1% de las semillas se concentran en la Salida 3. Como solución, estas semillas se reprocesan con los harneros de la máquina 3 (rompedora de semillas), separándolas en dos grupos (**Cuadro 7**). El uso de harneros ovalados y la forma ovalada de las semillas provoca una clasificación inexacta, ya que las semillas pueden quedar mal distribuidas según cómo caigan en las perforaciones, lo que afecta la calidad del posterior rompimiento. Las semillas S1 y S2 de la calibradora se juntan en un solo grupo denominado S1' (o semillas-Grandes), Las semillas S3 de la Calibradora se pasan por los harneros de limpieza de la Rompedora de semillas, la cual también cuenta

con 3 salidas, pero en este caso sólo se utilizarán las salidas 1 y 2 de esta máquina, ya que la tercera salida sólo sale basura fina, de esta manera, las dos salidas a utilizar constituyen los grupos S2' y S3' (semillas medianas y pequeñas)

Cuadro 7. Distribución de las semillas tras ser calibradas secuencialmente con los harneros de la máquina calibradora y posteriormente con los de la máquina rompedora de semillas.

Resultados	Calibración con maquina Calibradora			Calibración con harneros de limpieza de máquina rompedora de semillas		
	S1	S2	S1'	S3	S2'	S3'
Semillas (% del total)	1,3	10,6	11,9	88,1	41,1	47,0
Semilla limpia (%)	65,1	95,5	92,2	97,7	98,3	97,2

Considerando que los harneros ovalados no logran diferenciar si se calibra por diámetros máximos o mínimos, sino que por la posición que haya caído la semilla, es que se determinó cambiarlos por harneros de perforación redonda (**Figura 8**), lo cual permitiría reducir en parte la variabilidad, al separar en ese caso por diámetros máximos, aunque la maquina rompedora tiende a romper por diámetros mínimos.

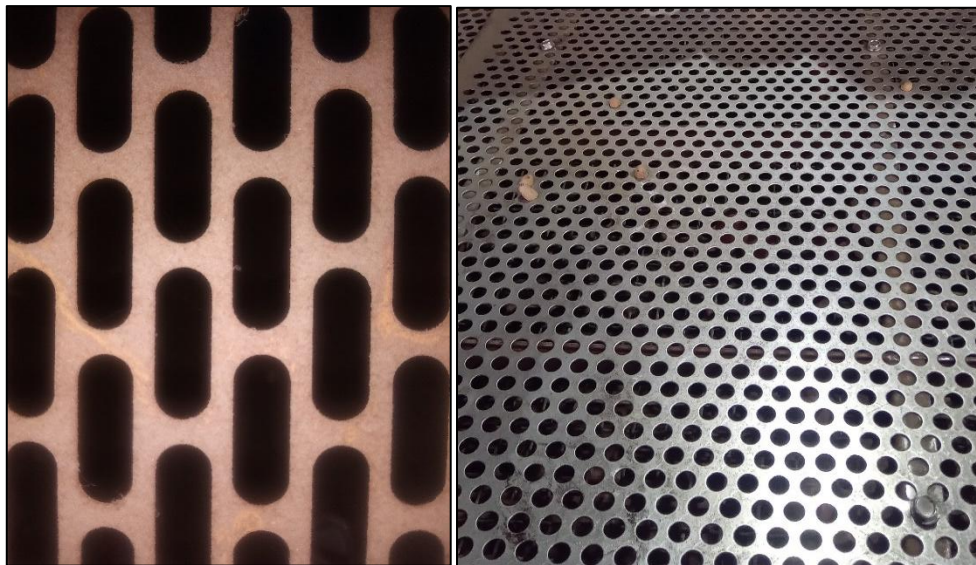


Figura 8. Harneros originales de perforación ovalada (izquierda) y harneros de reemplazo con perforación redonda (derecha)

Se realizó un análisis preliminar de los datos históricos disponibles, y así determinar que diámetros logran separar la población de semillas en tres grupos uniformes. Se utilizó, más de 6.000 registros obtenidos entre los años 2017 y 2022, determinándose que las poblaciones se separaban en diámetros máximos de 8,54 y 9,41 milímetros (**Figura 9**). En la **Figura 10** se muestra la distribución de los diámetros máximos de las semillas según localidad.

Al probar los harneros de 8,5 y 9,5 mm no se logró obtener las agrupaciones esperadas, por lo que se evaluaron múltiples medidas procesando 60 kilos de semilla. Se analizaron tanto las medidas de apertura de harneros preseleccionadas, como otras superiores, ya que las primeras no garantizaban una separación

precisa. Finalmente, se identificaron rangos preferenciales y se probaron harneros con perforaciones de 8, 9, 10 y 11 mm, determinando la necesidad de realizar pruebas con harneros de 9,5 y 10,5 mm (**Cuadro 8**).

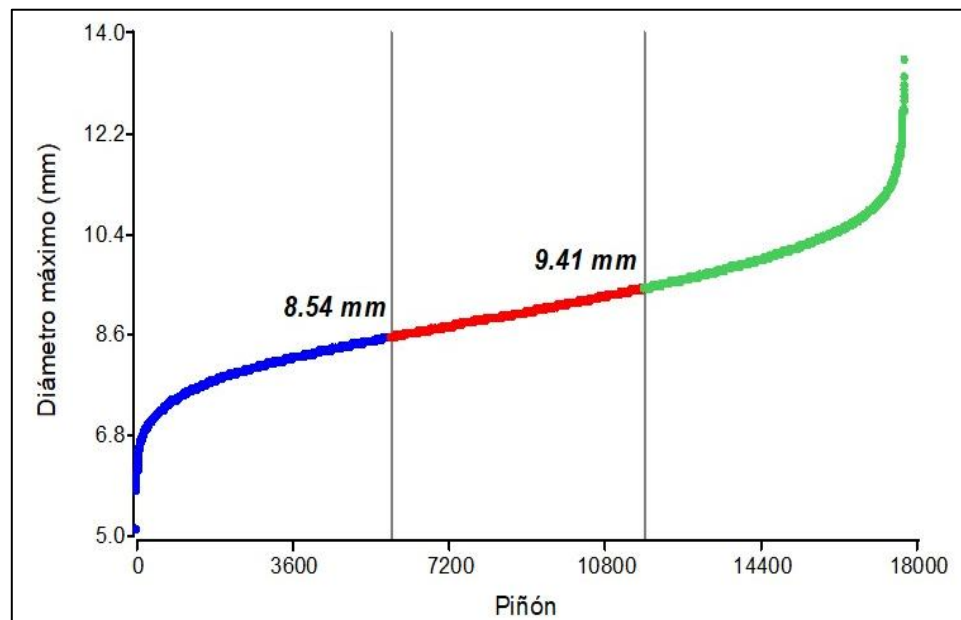


Figura 9. Distribución del diámetro máximo de semillas y separación en tres grupos de igual cantidad de semillas ($n=6.000$ semillas).

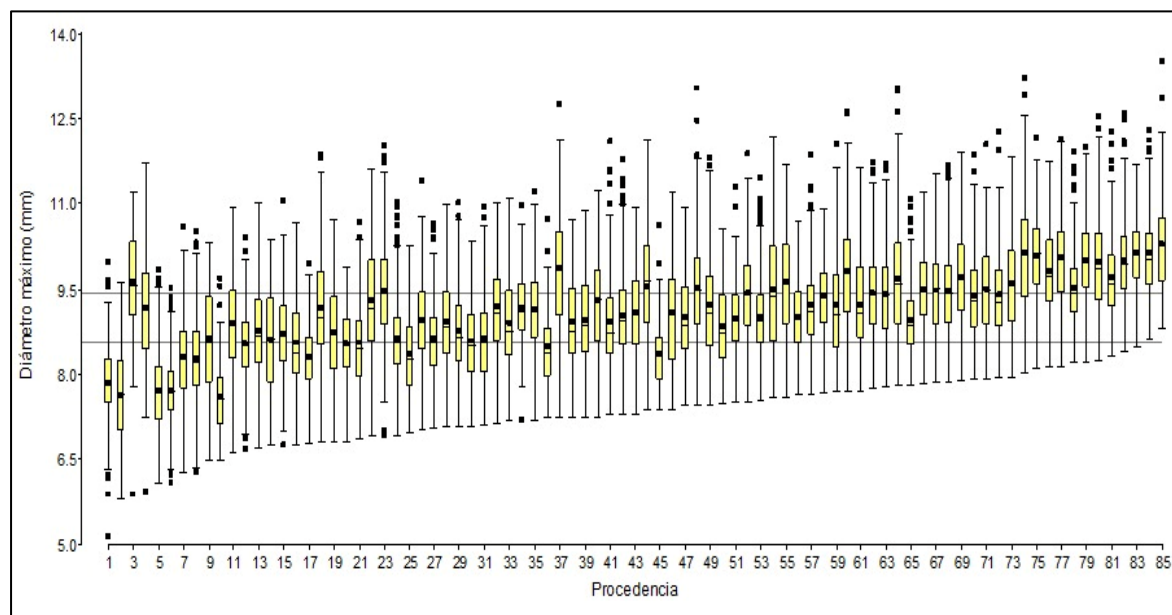


Figura 10 Distribución de las medidas de diámetro máximo según localidad.

Intentando obtener grupos lo más parecidos posible, se seleccionó los harneros de 10,5 y 9,5 mm, procediéndose a cambiar los harneros existentes previamente por unos nuevos de dichas medidas. En la **Figura 11** se aprecia con más detalle la configuración de las perforaciones de estos harneros.

Cuadro 8. Distribución porcentual de las semillas en cada una de las tres salidas según tamaño de los dos harneros de la máquina calibradora de semillas.

Medida harneros (mm)	Salida	Semilla en cada grupo (%)	Peso en cada grupo (%)
10 9	1	39,52	46,15
	2	41,83	39,53
	3	18,65	14,32
11 9	1	10,13	12,48
	2	71,22	73,20
	3	18,65	14,32
11 10	1	10,13	12,48
	2	29,39	33,67
	3	60,48	53,85
10,5 9	1	20,73	24,71
	2	61,75	60,89
	3	18,65	14,32
11 10,5	1	10,13	12,48
	2	10,59	12,23
	3	80,40	75,21
10 9,5	1	39,52	46,15
	2	24,56	23,53
	3	36,64	30,32
11 9,5	1	10,13	12,48
	2	53,95	57,20
	3	36,64	30,32
10,5 9,5	1	20,50	24,71
	2	44,26	44,89
	3	36,64	30,32
11 10,5	1	10,02	12,48
	2	10,48	12,23
	3	79,50	75,21

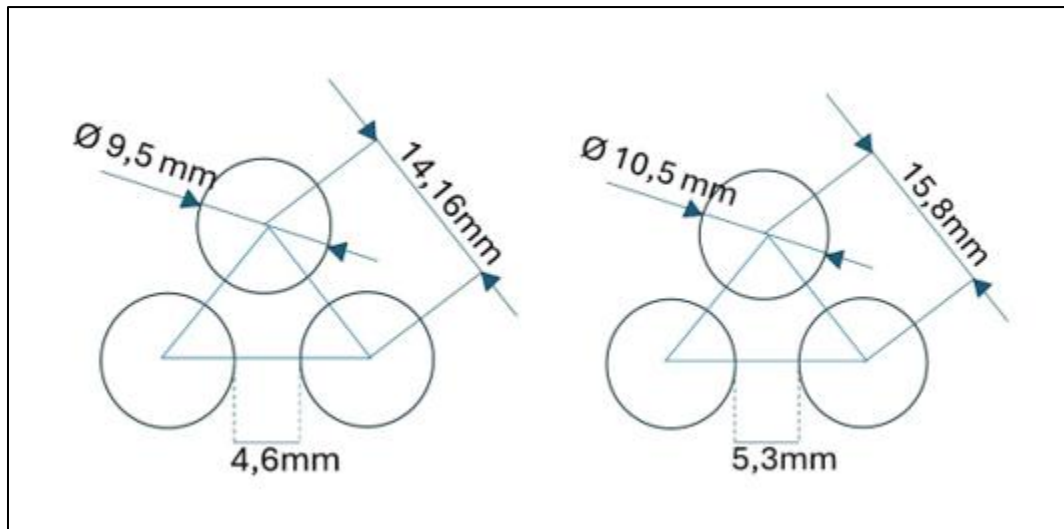


Figura 11. Detalles de la distribución de las perforaciones en los harneros de reemplazo de la máquina calibradora, siendo el diagrama de la derecha el harnero superior y el de la izquierda el inferior.

Un problema asociado a este método de separación de semillas por calibre, mediante su paso a través de dos harneros ubicados uno sobre el otro, es que las primeras semillas que pasen por el harnero superior estarán más tiempo sobre el harnero inferior, aumentando así su posibilidad de poder ser separadas; por el contrario, las semillas que tardan más en pasar el primer harnero tendrán menos tiempo en el harnero inferior. En la **Figura 12** se ilustra esta situación, donde las primeras semillas en pasar el primer harnero (amarillo) pueden recorrer más distancias (rojo y azul), mientras que las semillas que logren pasar más al final (verde) solo podrá estar en zona azul.

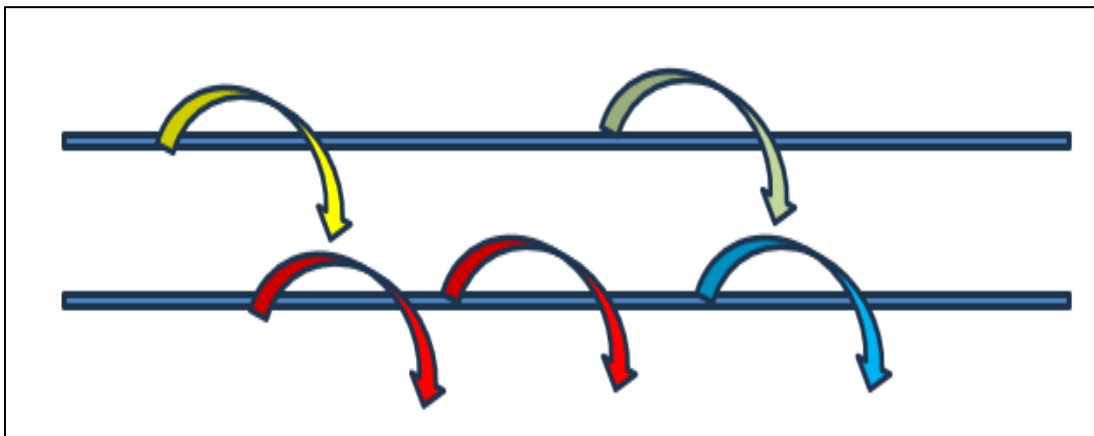


Figura 12. Esquematación de la clasificación de semillas por calibre, utilizando un sistema de dos harneros superpuestos.

Tal problema se logra solucionar parcialmente repasando las semillas del primer harnero, aumentando de esa forma la posibilidad que caigan al inicio y no al final, sin embargo, las semillas del segundo harnero no pueden ser repasadas. Por dicha razón se diseñó y construyó una adaptación consistente en crear un espacio al inicio del primer harnero (el superior), de modo que las semillas del segundo harnero (el inferior), ahora si pueden ser repasadas al colocarlas directamente en él a través del espacio que se realizó en el

primer harnero (Figuras 13 y 14).

- *Resultados evaluación*

Las evaluaciones de calibración se realizaron con tres prototipos: (1) máquina original (sin modificar); (2) máquina reformulada (con harneros nuevos); y (3) máquina con adaptación (con harneros nuevos y acceso directo como en Figuras 13 y 14). Según los valores promedios de las segundas pasadas (**Cuadro 9**), el prototipo 3 mejora la clasificación al aumentar un 10% la salida de semillas por la salida 2 respecto al prototipo 2, incrementando la repetibilidad.

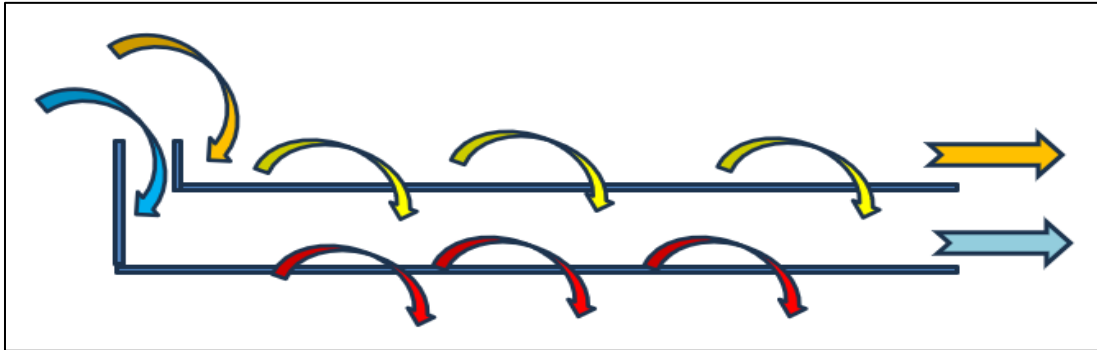


Figura 13. Esquematación de la clasificación de semillas por calibre, utilizando el sistema de dos harneros superpuestos modificado.



Figura 14. Detalles de la modificación del primer harnero, para tener acceso directo al harnero inferior para repaso de las semillas.

Cuadro 9. Porcentaje de semillas obtenidas al repasar (pasar por segunda vez) las semillas de cada salida de 3 prototipos de la máquina calibradora de semillas.

Prototipo	Primera pasada	Segunda pasada	n	Media	D.E.
1 (Original)	Salida 1	Salida 1 (%)	10	93,95	1,84
		Salida 2 (%)	10	3,80	2,31
		Salida 3 (%)	10	2,25	2,84
	Salida 2	Salida 1 (%)	10	1,95	0,49
		Salida 2 (%)	10	94,65	0,79
		Salida 3 (%)	10	3,39	0,82
	Salida 3	Salida 1 (%)	10	0,24	0,13
		Salida 2 (%)	10	13,18	9,10
		Salida 3 (%)	10	86,56	9,19
2 (Reformulado)	Salida 1	Salida 1 (%)	10	73,80	25,69
		Salida 2 (%)	10	18,21	4,15
		Salida 3 (%)	10	7,98	22,25
	Salida 2	Salida 1 (%)	10	13,04	1,77
		Salida 2 (%)	10	74,28	1,81
		Salida 3 (%)	10	12,67	2,97
	Salida 3	Salida 1 (%)	10	14,60	28,96
		Salida 2 (%)	10	24,60	11,45
		Salida 3 (%)	10	60,81	22,97
3 (Adaptado)	Salida 1	Salida 1 (%)	10	73,80	25,69
		Salida 2 (%)	10	18,21	4,15
		Salida 3 (%)	10	7,98	22,25
	Salida 2	Salida 1 (%)	10	0,00	0,00
		Salida 2 (%)	10	84,99	4,23
		Salida 3 (%)	10	15,01	4,23
	Salida 3	Salida 1 (%)	10	14,60	28,96
		Salida 2 (%)	10	24,60	11,45
		Salida 3 (%)	10	60,81	22,97

El prototipo 1 distribuye mejor en un repaso y no muestra diferencias significativas tras una segunda pasada. Sin embargo, su clasificación inicial es deficiente, ya que solo logra separar en dos grupos similares, lo que lo hace inadecuado para obtener tres grupos homogéneos necesarios para el trabajo eficiente en la máquina 3 (rompedora de semillas).

Máquina 3: Rompedora de Semillas y Limpiadora de Piñones

- *Componentes*

Esta máquina está conformada por un sistema rompedor de semillas que posee un cilindro aprisionador encargado de romper las semillas y un sistema vibratorio de harneros de limpieza que permite la obtención final de piñones (**Figura 15**).

Las semillas depositadas en el rompedor de semillas caen a un sistema que las presiona entre un rodillo y una contra-estructura plana que es regulable en su distancia hacia el rodillo, dependiendo de los tamaños de las salidas de la máquina calibradora (**Figuras 16 y 17**). Estos dos subcomponentes poseen una separación regulable de tal forma que sea capaz de romper la cáscara sin romper el piñón en su interior. Los subproductos de este proceso caen sobre el sistema vibratorio de harneros de limpieza.

La separación del rodillo rompedor estático se debe realizar manualmente, mediante la liberación del soporte de la contra-estructura soltando la tuerca 1 señalizada en la **Figura 18**.



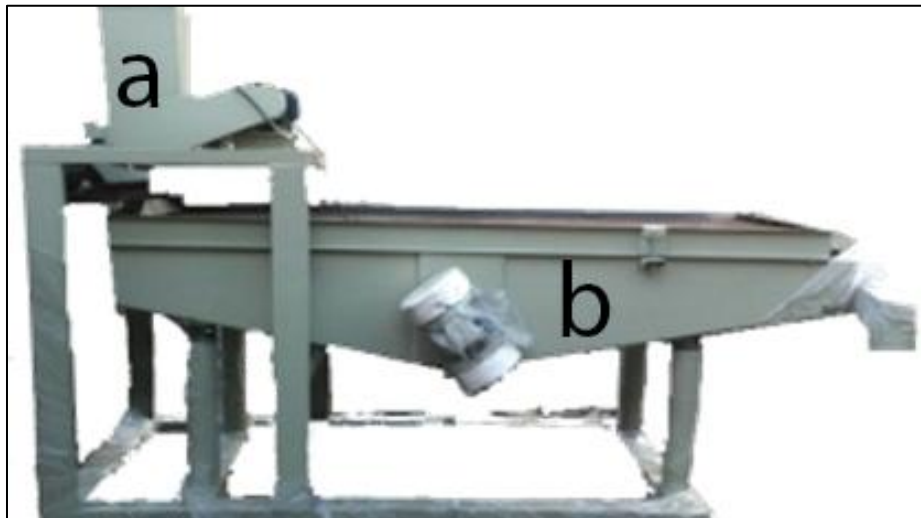


Figura 15. a) Rompedor de semillas; b) Harneros de limpieza de piñones.

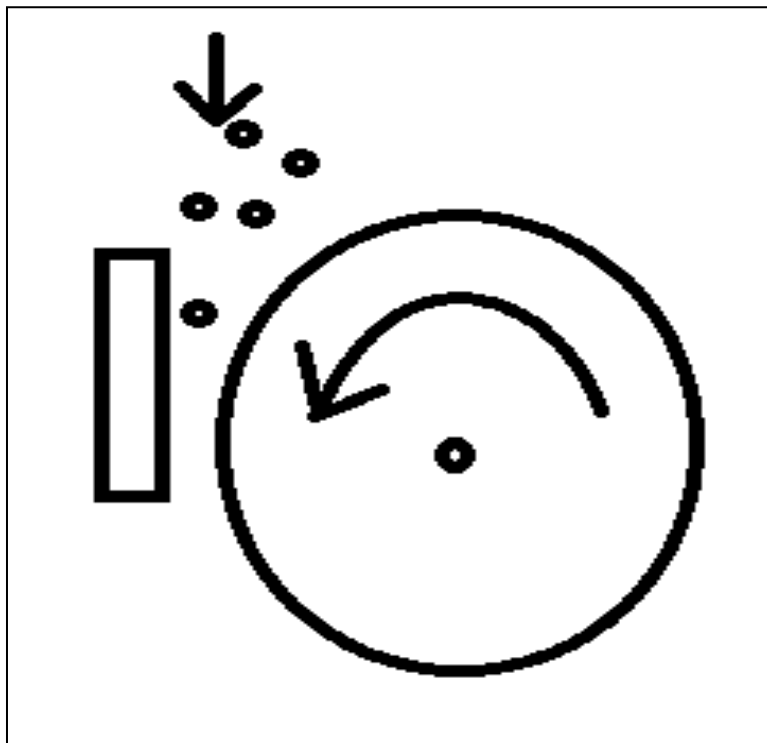


Figura 16. Vista transversal del rodillo y contra estructura del rompedor de semillas.

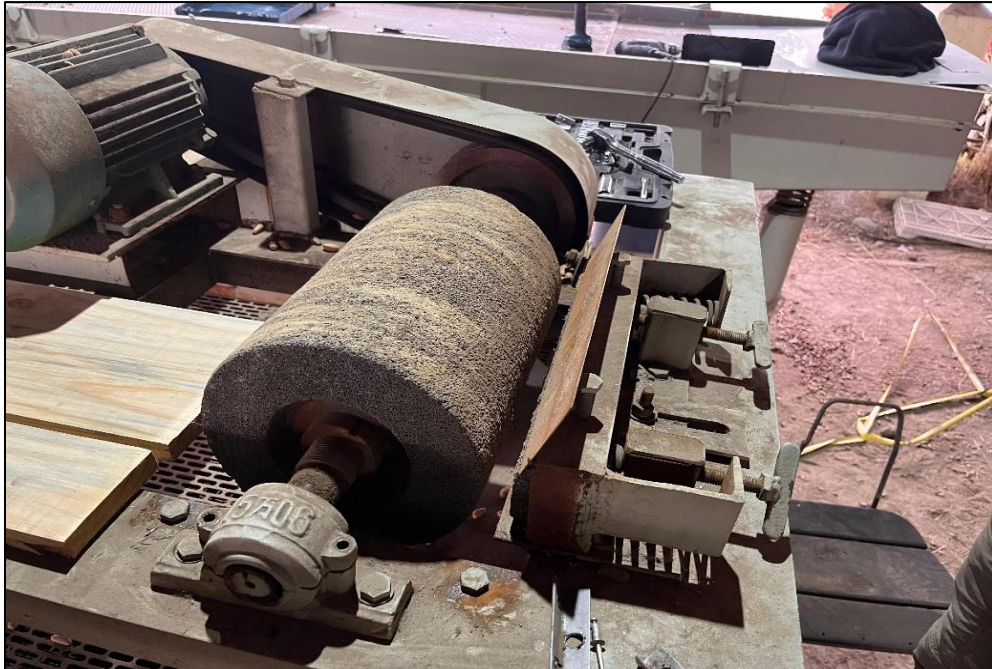


Figura 17. Vista del rodillo rompedor estático con la contra-estructura removida de la partidora de semillas.

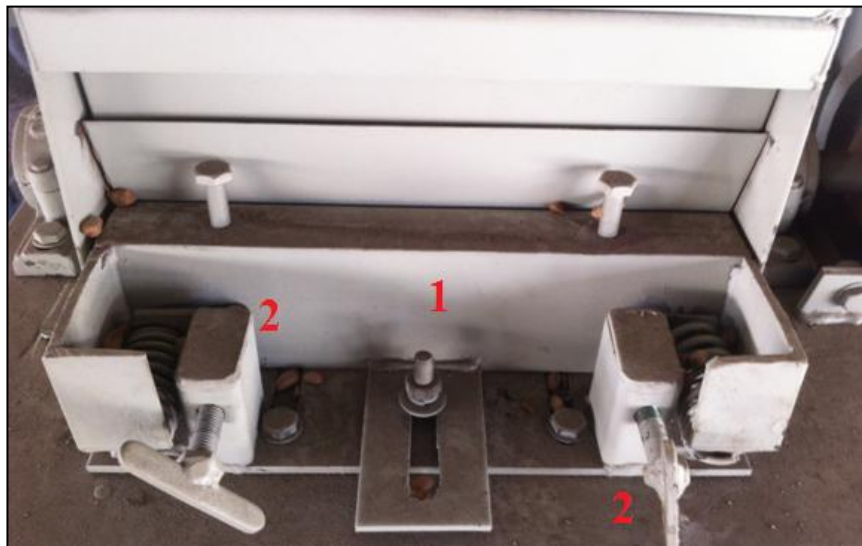


Figura 18 Detalle del sistema de regulación de la compresión del rompedor de semillas. 1 Soporte; 2 mariposas de regulación.

Después de elegirse la separación adecuada, se procede a reapretar la tuerca 1 para mantener firme el elemento de soporte. Ajustes menores se pueden hacer con las mariposas de regulación de la **Figura 18**, pero deben ajustarse correctamente ya que hace cambiar la distancia en forma dispereja.

El material que ha pasado por el sistema rompedor, pasa después a un sistema de limpieza compuesto

por 2 harneros. El tamaño de criba fue diseñado para separar semillas no rotas y cascara, de los piñones y trozos pequeños de cascara, y debe ser intercambiado dependiendo del tamaño del calibre de entrada de semillas (S1, S2 y S3).

En condiciones ideales, debiese existir una malla para cada uno de los tres calibres descritos anteriormente, siendo el harnero más pequeño que la semilla, pero más grande que el piñón, para así poder separar arriba las semillas no rotas, como los trozos grandes de cáscaras, dejando en la segunda salida los piñones con restos de cáscaras, y en la tercera los elementos más pequeños, como aquellos piñones rotos.

- *Problemas*

En el **Cuadro 10**, se aprecia un resumen de los problemas identificados y las soluciones implementadas en la maquina rompedora de semillas y limpiadora de piñones.

El partidor de semillas del diseño original de la máquina utilizaba un sistema de rompimiento con un rodillo y una contra-estructura plana (**Figuras 16, 17 y 18** anteriores), presentando dos problemas principales: (1) la regulación de la distancia entre la pieza plana y el rodillo tenía dos puntos de ajuste, dificultando el paralelismo, y (2) el rozamiento entre el rodillo y la estructura plana causaba desgaste en la superficie de la semilla sin lograr la ruptura deseada.

Respecto a los harneros de limpieza, las semillas no rotas se procesan aproximadamente 5 veces, con un rendimiento actual de 6 Kg/h. Estas semillas se combinan con las del calibre menor siguiente tras cada pasada.

Cuadro 10. Problemas identificados y soluciones implementadas en maquina rompedora de semillas y limpiadora de piñones.

Problema y/o imperfecto	Solución y/o mejora
Deficiente ruptura de semillas en el sistema rompedor de rodillo con contra-estructura lisa.	Modificación de sistema rompedor, reemplazando la contra-estructura lisa por un rodillo ajustable.
Ruptura irregular de semillas debido a que el regulador de tamaño no se calibra de forma paralela.	Modificación del sistema de regulación para que funcione de modo paralelo.

El desempeño del sistema rompedor de semillas depende de una correcta calibración de las semillas en la máquina calibradora (**Cuadro 11**). Según el calibre de entrada (S1', S2', S3), se debe cambiar el harnero superior de la máquina rompedora por uno con cribas adecuadas. La falta de este ajuste reduce la eficiencia de limpieza, aumenta las pérdidas y exige más limpieza manual. De igual manera se detectó la presencia de semillas semirrotas, en las cuales, aunque se observó cascara fragmentada por el sistema rompedor, esta ruptura no fue capaz de liberar al piñón.

Aunque las máquinas cumplen sus funciones específicas, solo la rompedora de piñas funciona correctamente. Las otras dos han presentado problemas debido a que las medidas de las semillas no corresponden a las medidas proporcionadas al proveedor de la máquina, por lo que no se estaría realizando una calibración correcta, lo cual afecta el funcionamiento de los harneros. Esto obliga a usar ambas máquinas (la calibradora y la rompedora de semillas) para definir los tres grupos, lo que limita el adecuado desempeño de la calibración, y donde solo el grupo S2' (medianas) opera correctamente. Es necesario reemplazar los harneros por otros con medidas adecuadas y establecer los rangos de tamaño en la calibradora para optimizar su uso en la rompedora.

Cuadro 11. Resultado sistema rompimiento según calibre de entrada.

Resultados	Tamaño semillas		
	Grandes (S1')	Medianas (S2')	Chicas (S3')
Semillas rotas (%)	92,7	83,3	80,7
Semillas semirrotas (%)	0,0	0,3	1,0
Rendimiento semillas/piñones (%)*	19,8	16,2	14,9
Piñones dañados (%)	17,0	9,4	12,7
Piñones limpios (%)	89,2	76,4	72,9

* relación peso-peso

- *Soluciones*

Para solucionar las problemáticas del sistema rompedor se incorporó un nuevo rodillo, el cual cuenta con un sistema de guía móvil (**Figuras 19 a 24**). El efecto que tiene la incorporación de este nuevo rodillo es que se elimina el efecto de desgaste que generaba la contra-estructura plana, haciendo que la cáscara de la semilla tienda a fraccionarse.

Se probó con la implementación de un rodillo en base a múltiples discos de desbastes, generando así un rodillo relativamente semejante al original, de 8" de ancho y 30 cm de largo, montados con dos descansos laterales que van apoyado en el sistema que hace correr ese rodillo (**Figuras 20, 21 y 23**).

A su vez se diseñó e implementó un sistema de corredera que permita el movimiento del rodillo libre, con un movimiento lineal, en base a dos guías, pero solo un tornillo sinfín de movimiento (**Figura 23**). De esta forma se eliminó el problema presentado en modelo original, donde eran dos los tornillos, lo que provocaba que había que revisar la separación de las unidades en cada uno de los extremos, permitiendo que se pueda trabajar generando cambios en la distancia entre los dos rodillos.

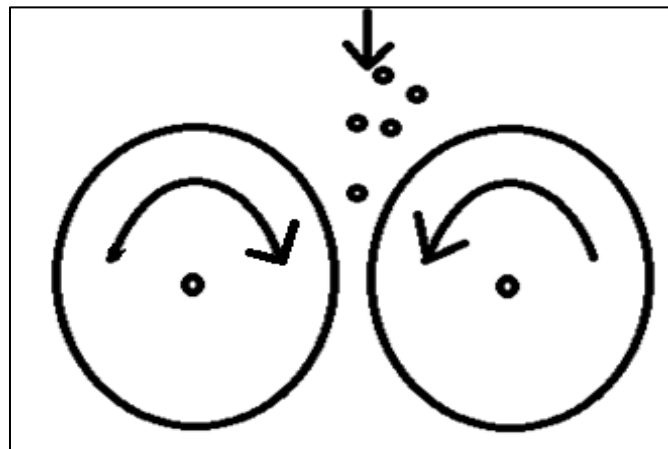


Figura 19. Adaptación sistema rompedor de semillas mediante la incorporación de un nuevo rodillo que reemplaza a la contra-estructura plana del diseño original.



Figura 20. Implementación de rodillos del nuevo sistema rompedor de semillas.



Figura 21. Rodillos del nuevo sistema rompedor de semillas

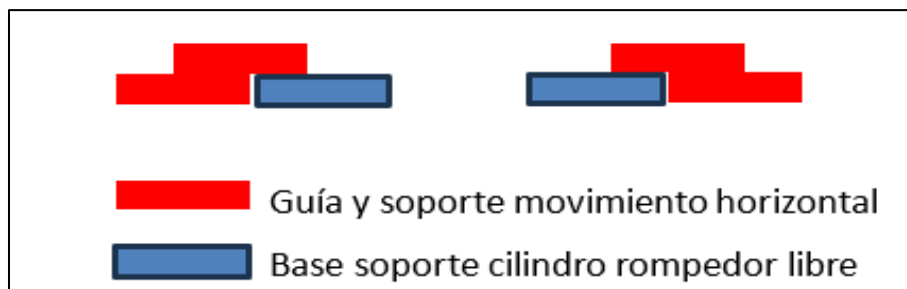


Figura 22. Sistema de guías para rodillo móvil de la rompedora de semillas modificada.



Figura 23. Sistema unitario de regulación de distancia entre rodillos de la rompedora de semillas, con un solo tornillo



Figura 24. Sistema de medición del movimiento horizontal del rodillo libre de la rompedora de semillas.

Resultados Evaluaciones

- *Prueba de Firmeza*

En los **Cuadros 12** y **13**, se muestran los resultados de caracterización y firmeza de las semillas por localidad.

Como se aprecia en los cuadros, la variación de la presión para romper la cáscara tiene estrecha relación con el origen de la semilla, afectando el ancho máximo de la semilla, no así su peso

Cuadro 12. Caracterización de las semillas según localidad.

Ubicación	Semillas					Piña		
	peso [g]	Largo [mm]	Ancho Máx. [mm]	Ancho Min. [mm]	Firmeza (Bar)	Peso [g]	Largo [mm]	Ancho [mm]
Quilvo	1,26	20,60	11,24	6,92	1,42	665,0	135,0	99,0
Cahuil	0,95	18,58	9,85	8,23	1,71	529,5	127,0	89,5
El Carmen	0,84	18,11	9,34	8,03	0,94	605,0	141,5	96,5
Apalta	0,96	18,64	10,13	8,44	1,15	389,0	119,5	76,5
Toconey	0,69	17,40	8,83	7,42	0,88	306,5	101,0	82,0
Verallia	0,87	18,57	9,39	7,76	1,23	420,5	111,5	89,5
Constitución	1,07	21,17	10,41	8,80	1,11	574,5	159,0	89,5
Sto. Domingo	0,90	18,43	9,42	8,02	1,26	496,0	126,5	88,0

Cuadro 13. Firmeza de semillas en bares según localidades de origen.

Ubicación	Medias	n
El Carmen 1	0,79 ^a	20
Toconey 1	0,81 ^a	20
Toconey 2	0,94 ^{ab}	20
El Carmen 2	1,04 ^{bc}	20
Constitución 2	1,08 ^{bcd}	20
Apalta 1	1,12 ^{cde}	20
Constitución 1	1,14 ^{cde}	20
Apalta 2	1,18 ^{def}	20
Santo Domingo 1	1,22 ^{def}	20
Verallia 1	1,23 ^{def}	20
Verallia 2	1,24 ^{ef}	20
Quilvo 1	1,25 ^{ef}	20
Santo Domingo 2	1,31 ^f	20
Quilvo 2	1,58 ^g	20
Cahuil 1	1,60 ^g	20
Cahuil 2	1,81 ^h	20

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).
1 y 2 son dos muestras por localidad

- *Pruebas de firmeza con distintas humedades*

Existe una disminución de la resistencia al rompimiento mientras más permanencia tengan las semillas en el agua (**Cuadro 14**). En relación con los restos de cáscara, visualmente no se perciben grandes diferencias en los fragmentos, siendo la única diferencia, en el caso de las semillas secas, la presencia de fragmentos levemente más grandes.

Cuadro 14. Firmeza de cascara de semillas según distintos tiempos de remojo en agua (bares)

	Semillas Secas	Tiempo de remojo de semillas			
		2,5 h	4 h	8 h	20 h
Promedio	0,98	0,82	0,70	0,71	0,67
Máxima	1,43	1,35	0,99	1,00	0,98
Mínima	0,38	0,57	0,45	0,42	0,46
Mediana	1,01	0,82	0,70	0,71	0,64



Remojar los piñones aumenta su elasticidad, reduciendo el porcentaje de piñones blancos rotos durante el rompimiento de la cáscara. Según Luis Lozano (comunicación personal, 12 de junio de 2023), este procedimiento busca mejorar la elasticidad del piñón. Además, permite descartar semillas flotantes, las cuales no contienen piñón, asegurando que la mayoría de las semillas procesadas en los rodillos sean útiles, aumentando la eficiencia del sistema.

- *Pruebas de Rompimiento*

Según recomendado, se mojaron 75 semillas del mismo calibre dos veces cada 12 horas. Tras la regulación de la máquina para el calibre determinado, se pasaron los grupos de semillas 3 veces por el sistema rompedor (sólo se pasaban las semillas sin romper). Se realizó el mismo procedimiento para semillas sin mojar. Los resultados de la prueba de rompimiento se presentan en el **Cuadro 15**.

Cuadro 15. Rompimiento de semillas en máquina rompedora de semillas.

	Semillas Seca (%)	Semillas Humedecidas (%)
Piñón Completo	56	83
Piñón Roto o dañado	44	17

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Máquina 1: Partidora de Piñas

En esta máquina se probaron dos tratamientos, uno respecto a los días de secado, y otro con respecto a la apertura del limitador de material (que puede variar entre abierto o cerrado). Según los resultados obtenidos en las pruebas, no existe un efecto significativo en relación con las pérdidas de semillas como consecuencia de los días de secado. Hay que comprender que los días de secado al sol se utilizan en la industria para aprovechar el calor otorgado por el sol, el cuál hará que la piña suelte cerca del 80% de sus piñones; para recuperar el 20% restante, las piñas abiertas deben golpearse repetidamente, o introducirse en molinos desgranadores que las rompen (González & Loewe, 2012).

Respecto a la posición del limitador, se estableció que el tratamiento con limitador cerrado, que consistía en mantener el limitador cerrado hasta los 10 segundos de haber caído la última piña, y luego abrir el limitador por 10 segundos más, presenta estadísticamente menos pérdida de semillas con respecto a mantener el limitador abierto. Este resultado se debe a que, al mantener el limitador cerrado, el tambor rompedor mantiene el material por más tiempo adentro, lo que permite una mayor disgregación de la piña, y por ende un desgranado más eficiente, ya que, al dejar el limitador abierto, el material a procesar queda menos tiempo en el tambor, con lo que se generará la tendencia a pérdida de semillas que no lograron separarse de la piña.

De igual manera, en el caso del limitador cerrado, existe un mayor porcentaje de residuos en las semillas entregadas al final del proceso, esto se debe a lo recién explicado, al mantenerse el material más tiempo en el tambor rompedor, este disgregará más el material, permitiendo una mayor cantidad de residuos con tamaño y peso similar al de las semillas y que se mezclará con las mismas.

Máquina 2: Calibradora de Semillas

Las evaluaciones se realizaron con 3 prototipos de máquinas calibradoras: la máquina original, máquina reformulada con nuevos tamaños de harneros, y máquina con adaptación, la cual aumenta la superficie de



harneado del segundo harnero. Si se analizan los valores promedios de las segundas pasadas (**Cuadro 9** de sección Resultados), o sea, al volver a pasar las semillas que salieron por cada salida, se aprecia que el porcentaje de semillas que se obtienen en la salida dos aumenta un 10% en el prototipo 3 (color rojo) con respecto al prototipo 2 (color azul), o sea, mejora la clasificación al aumentar la repetibilidad de las pasadas.

Al analizar el prototipo 1, o sea el original, este distribuye mejor en un repaso, es decir que no existen diferencias significativas con respecto a la realización de una segunda pasada, pero el problema que presenta este prototipo es que su clasificación es deficiente. Por lo mismo, y considerando que se debió utilizar las máquinas 1 y 2, logrando separar en la práctica solo dos grupos similares, resulta que, si bien la separación es más consistente, también es menos homogénea, por lo cual no es conveniente para el objetivo de hacer tres grupos parejos para un trabajo eficiente de la máquina 3 (Rompedora de semillas).

Máquina 3: Partidora de Semillas y Limpiadora de Piñones

- *Prueba de firmeza por origen.*

La variación de la presión para romper la cáscara parece tener más que ver con el origen de la semilla y en menor medida con sus dimensiones: peso y ancho máximo. *Loewe et al. (2016)* estudiaron la productividad de las poblaciones de *Pinus pinea* L. a lo largo de la gradiente climática de Chile, específicamente desde las regiones de Coquimbo a la Araucanía. Los resultados de esta investigación determinaron que mientras más al sur, la productividad del pino piñonero iba en aumento (tanto en peso de piñas como el número de piñas por árbol), esto gracias al efecto del aumento de precipitaciones, como también las temperaturas medias en estados específicos del ciclo reproductivo de este. Contemplando que el ciclo productivo es de 3,5 años, es de esperar que, en zonas diferentes, por la variabilidad de condiciones que se pueden presentar en estas zonas, las semillas presenten características morfológicas variables, siendo interesante del punto de vista de la apertura mecánica que, una de las características más afectadas sea la resistencia a la ruptura de las semillas.

- *Firmeza según distintos contenidos de humedad de la cáscara*

Efectivamente, existe una disminución de la resistencia al rompimiento de las semillas mientras mayor tiempo hayan permanecido en agua. En relación con los restos de cáscara, visualmente no se observó grandes diferencias en los fragmentos, siendo la única diferencia, en el caso de las semillas secas, la presencia de fragmentos levemente más grandes, lo cual es importante evaluar para la determinación del proceso de rompimiento, y la determinación del tamaño de harneros correctos al utilizar semilla humedecida.

Özgüven & Vursavus (2004) hacen referencia a la falta de información que existe sobre las propiedades físicas y mecánicas del piñón, y realizan pruebas de resistencia a la ruptura, pero manteniendo una humedad constante. *Gharibzahedi et al. (2010)* comprobaron que frente al aumento del contenido de humedad la semilla de *Pinus pinea* existe un aumento de la longitud, el ancho, el espesor y el diámetro geométrico. Se determinó que existe una disminución lineal entre la fuerza de ruptura con respecto al aumento del contenido de humedad en la semilla de piñón (*Cárcel et al., 2011*). Estas condiciones de relación física entre los contenidos de humedad de la semilla fueron fundamentales en el presente estudio para mejorar el proceso de rompimiento y disminuir mermas en la producción.

- *Rompimiento.*

Se determinó que mojar las semillas disminuye de forma importante el porcentaje de piñones pelados dañados. Es importante destacar que los piñones provenientes de las semillas que fueron remojadas presentaban en su mayoría un daño físico por el aplastamiento de la propia cascara, no así los piñones provenientes de semillas secas, que presentaban el fraccionamiento del piñón. Por lo mismo, podría existir una disminución de piñón dañado en el caso de semilla húmeda, presentando una mejor calibración en el espacio de los rodillos de la máquina rompedora. *Cárcel et al. (2011)* se refiere a la necesidad de generar

una humedad adecuada para el proceso de agrietamiento o rompimiento de la cáscara, ya que, al tener una humedad muy baja, el piñón será más propenso a romperse en el proceso, lo que afectará su comercialización.

CONCLUSIONES

Las máquinas disponibles para los procesos de postcosecha de piñón de pino no especifican la especie para la cual fueron diseñadas. Por ello, la identificación de los puntos críticos observados en estas evaluaciones permite adaptar dichas máquinas para optimizar los procesos de postcosecha del piñón de *Pinus pinea* minimizando sus pérdidas de semillas en el rompimiento de piñas a solo un 0,8%, una correcta clasificación de las semillas en tres grupos, y por último, la obtención de un 83% de piñones sin daños.

Durante el análisis, se identificó varios problemas que impedían el correcto funcionamiento de las máquinas, afectando la obtención del producto con las características deseadas. Se implementaron modificaciones para resolver estos inconvenientes, y las evaluaciones realizadas validaron las mejoras aplicadas a las máquinas de procesamiento del piñón mediterráneo.

Además, la caracterización de las semillas de *Pinus pinea* y sus condiciones de preparación para el proceso de rompimiento, mediante diferentes métodos de humedecimiento, resulta relevante debido a la escasez de estudios sobre la morfología y propiedades físicas de estas semillas. Esta información es clave para optimizar los procesos de obtención del piñón mediterráneo en condiciones aptas para su comercialización.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico, por el apoyo a la ejecución del proyecto FONDEF (ID22110034) "Aprovechamiento Comercial del Fruto del Pino Piñonero (*Pinus pinea* L.) en Chile: Validación de Tecnologías para la Obtención de Piñones", en cuyo marco se generó esta publicación. Además, a Rodrigo del Río por su apoyo en estadística y figuras 9 y 10.

REFERENCIAS

- Avila, A., Delard, C. & Loewe-Muñoz, V. (2020). Zonas potenciales para el cultivo de Pino piñonero (*Pinus pinea* L.) en Chile. Ciencia & Investigación Forestal, 26(3): 51–64. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2020.537>
- Cárcel, L., Bon, J., Acuña, L., Nevares, I., del Álamo, M. & Crespo, R. (2011). Moisture dependence on mechanical properties of pine nuts from *Pinus pinea* L. Journal of Food Engineering, 110(2): 294–297. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.04.018>
- Cervantes, M., Rodríguez, G., Enríquez, J. & Rodríguez, M. (2023). Caracterización morfológica de semillas y eficiencia germinativa de *Pinus patula* var. *longepedunculata* y *P. pseudostrobus* var. *Oaxacana*. E-CUCBA, 10(20): 44–51. <https://doi.org/10.32870/ecucba.vi20.295>
- Gharibzahedi, S.M.T., Etemad, V., Mirarab-Razi, J. & Fos'hat, M. (2010). Study on some engineering attributes of pine nut (*Pinus pinea*) to the design of processing equipment. Res. Agr. Eng., 56: 99–106. <https://doi.org/10.17221/49/2009-RAE>
- Greene, D. & Johnson, E. (1993). Seed Mass and Dispersal Capacity in Wind-Dispersed Diaspores. Oikos, 67(1): 69–74. <https://doi.org/10.2307/3545096>
- González, M. & Loewe, V. (2012). Elaboración del piñón. En: Loewe, V. & Delard, C. (Eds.). Un nuevo cultivo para Chile. El Pino piñonero (*Pinus pinea* L.). INFOR. Santiago. Pp: 104–118. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/20299>

- González, M.V. (2014).** Cosecha de pino piñonero (*Pinus pinea* L.). Antecedentes generales y experiencia en Chile. *Ciencia & Investigación Forestal*, 20(1): 51–68. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2014.415>
- Loewe, V. & Delard, C. (Eds). (2016).** Producción de piñón mediterráneo (*Pinus pinea* L.). Manual N°48. Instituto Forestal. Chile. 108 p.
- Loewe, V.; Balzarini, M.; Álvarez-Contreras, A.; Delard-Rodríguez, C. & Navarro-Cerrillo, R. (2016).** Fruit productivity of Stone pine (*Pinus pinea* L.) along a climatic gradient in Chile, *Agricultural and Forest Meteorology*, N° 223. Pp: 203-216. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.04.011>.
- Loewe, V., Bonomelli, C., Delard, C., Del Río, R., & Balzarini, M. (2025).** Effect of Fertilization on the Performance of Adult *Pinus pinea* Trees. *Biology*, 14(2): 216. <https://doi.org/10.3390/biology14020216>
- Özgüven, F. & Vursavuş, K. (2004).** Some physical, mechanical and aerodynamic properties of pine (*Pinus pinea*) nuts. *Journal of Food Engineering*, 68(2): 191-196. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.031>
- Zhang, M., Su, C. & Lu, C. (2020).** Cone's structure and seed traits of four species of large-seeded pines: Adaptation to animal-mediated dispersal. *Ecology and Evolution*, 10(12): 5293–5301. <https://doi.org/10.1002/ece3.6273>