



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

**Propuesta de modernización del vivero “Bosques del Sur”,
tecnologías para la eficiencia hídrica y automatización en
procesos productivos**

Patrocinante: Sra. Maritza Obando

Trabajo de Tesina presentado como parte
de los requisitos para optar al Título de
Ingeniero en Conservación de Recursos Naturales

SEBASTIÁN ANDRÉS IBÁÑEZ PARRAGUEZ

Valdivia

2025

	Índice de materias	Página
i	Calificación del Comité de Titulación	i
ii	Agradecimientos	ii
iii	Dedicatoria	iii
iv	RESUMEN	iv
1	INTRODUCCIÓN	1
2	MÉTODOS	3
2.1	Condiciones de infraestructura y operatividad	3
2.1.1	Flujo de trabajo y esfuerzo físico	4
2.1.2	Sistema de riego y consumo hídrico	7
2.2	Fundamentación teórica	10
2.3	Diseño de una propuesta de modernización	11
2.3.1	Modernización con cintas transportadoras	11
2.3.2	Incorporación de sensores de humedad	12
2.3.3	Sistema de captación y aprovechamiento de aguas lluvia	13
2.4	Materiales	14
3	RESULTADOS	15
3.1	Encuesta de percepción de esfuerzo físico	15
3.2	Proyección del consumo hídrico	19
3.3	Propuesta de diseño	24
3.3.1	Propuesta de Implementación de Cintas Transportadoras de Materiales	24
3.3.2	Propuesta de implementación del sistema de riego inteligente	25
3.3.3	Propuesta de implementación de sistema de captación de aguas lluvia	27
3.3.4	Estimación preliminar de inversión	29
4	DISCUSIÓN	30
5	CONCLUSIONES	32
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
Anexos	1 Cartografía área de estudio	38
	2 Encuesta de percepción de esfuerzo físico	39
	3 Diagrama general de la propuesta	42
	4 Figuras del modelamiento 3D de la propuesta	43
	5 Estimación aproximada preliminar de inversión	45

i. Calificación del comité de Titulación

		Nota
Patrocinante	Sra. Maritza Obando Camino	6,6
Prof. Informante	Sr. José Mardones Fernández	6,6
Prof. Informante	Sr. Eduardo Mattos Aguilera	6,7

El patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el Reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo acredita, que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

Maritza Alejandra Obando Camino



ii. AGRADECIMIENTOS

Al Sr. Daniel Sánchez, por su invaluable guía y apoyo, por brindar enseñanzas más allá de lo académico y a motivarme a ser siempre mejor.

A la Sra. Maritza Obando, por su ayuda y guía en el proceso de elaboración de la tesis, su gran disposición y enseñanzas desde un punto de vista práctico.

A los integrantes Informantes de mi comisión evaluadora, Sr. Eduardo Mattos y Sr. José Mardones, se les agradece su participación y los aportes a mi Trabajo de titulación.

A la Sra. Alejandra Portales, ex secretaria de la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, por su impecable trabajo y excelente disposición con los alumnos de su facultad.

Al profesor Sr. Bernardo Escobar, su disposición y enseñanzas de conocimiento técnico invaluable, inspiraron mi interés por la propagación vegetal con fines de restauración.

iii. DEDICATORIA

A mi familia, que han sido un apoyo fundamental en todo mi proceso universitario, a mis hermanos Miguel, Carolina, Felipe y Freddy, a mi madre Verónica, y hago especial dedicatoria a mi padre Mario Fernando, que siempre serás una fuente de inspiración para seguir adelante y ser mejor persona.

A mis compañeros y compañeras de carrera, cuyo vínculo trascendió para convertirse en una profunda amistad. Les doy especial agradecimiento por su apoyo constante y su cariño, y sobre todo por la invaluable sensación de sentirme acompañado y querido en cada etapa de mi largo camino. A ustedes, Eduardo Mattos, Felipe Acuña, Sofía Perucci, Savka Ramos, Jazmín Redlich, Robin Weisselberg, Fabián Díaz, Lucia Mondaca y Jaime Zavala.

A mis amigos de vida, Andrés Araya, Rodrigo Becerra, Matías Valenzuela, Natalia Ibarra y Fernanda Montoya. Por marcar de la mejor manera, un antes y un después en mi vida.

Y una dedicatoria especial a una persona que pronto conoceré Baltazar Becerra Perez.

iv. RESUMEN

Los viveros forestales en Chile enfrentan desafíos operativos relacionados con métodos tradicionales que incrementan el esfuerzo físico del personal y generan uso ineficiente de recursos hídricos. El presente trabajo diseña una propuesta de modernización del vivero "Bosques del Sur" de la Universidad Austral de Chile mediante tres componentes tecnológicos integrados: (1) un sistema de cintas transportadoras para reducir el esfuerzo físico en el traslado de materiales, (2) un sistema de riego inteligente basado en sensores de humedad, y (3) un sistema de captación y aprovechamiento de aguas lluvias. La metodología incluyó: diagnóstico mediante encuesta de percepción de esfuerzo físico (n=34 trabajadores, con un α de Cronbach de 0.72), experimentación para determinar la capacidad de campo (60% del sustrato de corteza de pino), y modelado hidrológico del sistema de captación y aprovechamiento de aguas lluvias. Los resultados de la encuesta identificaron el "transporte a zona de endurecimiento" como la tarea de mayor esfuerzo percibido (media=7.09/10), validando la necesidad de automatización. El balance hídrico anual reveló que el sistema de captación y aprovechamiento de aguas lluvias propuesto cubriría el 62,75 % de la demanda aproximada mínima anual de riego (542.300 l), con un aprovechamiento del 100% del agua captada potencial (340.323 l). La propuesta de diseño integra cintas transportadoras motorizadas y extensiones de 6 m, sensores de humedad calibrados específicos del sustrato, y válvulas solenoides controladas mediante relés de estado sólido para optimizar ciclos de riego. Este sistema propuesto representa una solución técnicamente viable para mejorar condiciones ergonómicas, reducir consumo hídrico y aumentar la resiliencia operativa del vivero ante variabilidad climática, alineándose con normativas laborales chilenas y prácticas internacionales de automatización en viveros forestales.

Palabras Clave: Viveros forestales, automatización, cintas transportadoras, sensores de humedad, ergonomía, captación de aguas lluvia, riego inteligente.

1. INTRODUCCIÓN

Los viveros forestales son piezas clave para la conservación de la biodiversidad y la restauración de ecosistemas porque permiten la producción planificada de material vegetal autóctono adaptado a condiciones locales, lo que incrementa la supervivencia de las plántulas tras su trasplante y favorece la recuperación de suelos, corredores biológicos y funciones ecosistémicas (Calderon Pico 2024). En Chile, estos espacios son clave para la producción de plantas destinadas al manejo sostenible de bosques, especialmente en un contexto de cambio climático y degradación de suelos (Ipinza et al. 2023). Según la Corporación Nacional Forestal (CONAF), Chile cuenta con más de 290 viveros forestales inscritos a nivel nacional, enfocados en la producción de especies nativas y exóticas (CONAF 2023). Entre éstos, destacan los viveros universitarios que combinan funciones académicas, de investigación y producción de especies.

El vivero “Bosques del Sur” de la Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales de la Universidad Austral de Chile, ubicado en Valdivia (Anexo 1), cumple un papel fundamental en el ámbito académico y en la investigación de la producción de plantas nativas de la región. Sin embargo, como muchos viveros en Chile, enfrenta desafíos operativos asociados a métodos tradicionales. Por ejemplo, según la “*Organización Internacional del Trabajo*” (OIT), el transporte manual de almácigos, común en instalaciones medianas, incrementa la fatiga física en trabajadores y limita la productividad (OIT 2025). A esto se suma que sistemas de riego convencionales, de forma manual o aspersión con temporizador manual, suelen desperdiciar agua por evaporación o escorrentía, además de favorecer enfermedades radiculares en plantas (Dumroese R. 2018). Esto último coincide con hallazgos de estudios en viveros de la Región de Los Ríos, donde la humedad excesiva incrementa la incidencia de *Phytophthora spp.* en plántulas de especies como *Nothofagus dombeyi* (Fajardo et al. 2017). La automatización de ciertos procesos en viveros emerge como una solución viable para reducir estos problemas. A nivel internacional, algunas experiencias demuestran que la incorporación de cintas transportadoras reduce el tiempo de manipulación de plantas y mejora la ergonomía laboral (Wheeler et al. 2018).

De acuerdo con las estadísticas nacionales reportadas por la Superintendencia de Seguridad Social (SUSESO) en el año 2023, la tasa de enfermedades profesionales calificadas en Chile alcanzó un valor de 4,1 por cada 1.000 trabajadores protegidos. Respecto a la distribución por diagnóstico, si bien las lesiones musculoesqueléticas son una causa relevante, estas representaron el 7,1% del total de enfermedades profesionales calificadas a nivel nacional. En Chile, la Ley N° 16.744 establece la obligatoriedad de los empleadores de implementar medidas preventivas de riesgos laborales, mientras

que la Ley N° 20.949 ("Ley de Pesos") regula estrictamente la manipulación manual de cargas, limitándola a 50 kg para hombres y 20 kg para mujeres, lo que impulsa la adopción de soluciones mecánicas en actividades con alta demanda física. El vivero "Bosques del Sur", como instalación universitaria, debe cumplir estas normativas actualizando su matriz de riesgos e implementando soluciones innovadoras para proteger la salud laboral y optimizar procesos. Así, una propuesta de automatización con cintas transportadoras se estima incrementará la productividad del vivero y reduciría el esfuerzo físico de los trabajadores (Arteaga et al. 2020).

En este marco, el invernadero oeste del vivero "Bosques del Sur" representa un escenario ideal para evaluar posibles soluciones innovadoras. Su enfoque en plantas nativas cultivadas en almácigos (en inglés *speedling*, contenedores diseñados para maximizar la densidad de siembra) exige precisión en el manejo de recursos y condiciones microclimáticas. No obstante, la falta de automatización limita su eficiencia, como se observa en el transporte manual de bandejas y el riego por aspersión en ausencia de sensores, en consecuencia, sin retroalimentación en tiempo real del contenido de humedad del sustrato. A partir de lo anteriormente mencionado, la presente investigación describe una propuesta piloto de modernización del invernadero para optimización de los recursos hídricos y reducción de esfuerzo físico laboral. Así, el objetivo general es diseñar una propuesta de modernización para el invernadero "Bosques del Sur" que optimice los recursos hídricos y reduzca el esfuerzo físico laboral mediante la implementación de sistemas automatizados de transporte de materiales, sensorización y captación de aguas lluvias.

Para lograr lo anterior, es necesaria la ejecución de los siguientes objetivos:

- Evaluar las condiciones operativas actuales del vivero, incluyendo el diagnóstico ergonómico de tareas y el consumo hídrico basal.
- Proyectar el impacto potencial de la propuesta en la optimización del consumo hídrico a mediano plazo.
- Diseñar una propuesta de automatización del transporte de materiales y el sistema integrado de gestión hídrica (riego inteligente y sistema de captación de aguas lluvia).

2. MÉTODOS

Esta sección describe el enfoque metodológico para analizar el impacto de la modernización propuesta para el vivero "Bosques del Sur" de la Universidad Austral de Chile. La investigación integró los contenidos estructurados en tres secciones. La primera sección se enfocó en la evaluación detallada de las condiciones operativas actuales del vivero Bosques del Sur, estableciendo una línea base para realizar comparaciones con los resultados obtenidos a partir de la propuesta piloto de este proyecto de modernización del vivero. Dichas comparaciones estuvieron orientadas a evaluar la eficiencia del sistema, en particular la optimización del uso de recursos hídricos, lo que hipotéticamente, conllevaría una reducción de los costos monetarios asociados, así como el impacto del uso de tecnologías, como las cintas transportadoras de materiales.

La segunda sección se centró en la recopilación y análisis crítico de la literatura científica pertinente, organizada en temáticas clave para la modernización, con el propósito de robustecer la discusión de los hallazgos de este estudio. Inicialmente, se examinó la bibliografía existente relativa a la automatización de viveros mediante la implementación de cintas transportadoras y su impacto en la reducción del esfuerzo físico. Posteriormente, se procedió a la búsqueda de evidencia científica sobre los efectos de la integración de sensores de humedad en los sistemas de riego para la optimización del consumo de recursos hídricos. Finalmente, se compiló información relevante acerca de la implementación de sistemas de captación de agua de lluvia en viveros, analizando su contribución a la gestión eficiente de los recursos hídricos y las proyecciones de reducción de costos asociadas al consumo de agua.

El tercer y último apartado, detalla el diseño de una propuesta de modernización, orientada a reducir el esfuerzo físico y optimizar el uso de los recursos hídricos, siempre considerando el contexto de cambio climático que intensifica la necesidad de eficiencia y resiliencia en la gestión del agua.

2.1 Condiciones de infraestructura y operatividad

Se realizaron visitas programadas al vivero para recolectar información relevante que describa las condiciones de operatividad actuales y, en específico, de las instalaciones del invernadero oeste. Este ítem se dividirá en tres secciones.

2.1.1 Flujo de trabajo y esfuerzo físico

En esta primera etapa se identificaron las funciones, procesos, capacidad de producción, tecnología existente y flujos de trabajo actuales del vivero.

De los resultados obtenidos de la identificación del flujo de trabajo, que requiere esfuerzo físico, se generó la encuesta “*Percepción de esfuerzo físico*” (ver en anexo 2), adaptada de la escala de Borg modificada (Borg 1998), y protocolo de la percepción del esfuerzo físico del ISP (Ibacache Araya 2020). La encuesta se subdivide en secciones donde se ofrece primeramente una sección de datos personales (donde se solicitan los datos de forma voluntaria), seguido de la instrucciones de relleno, luego la sección de la encuesta (donde el trabajador califica su percepción del esfuerzo físico) y, por último, una sección de preguntas abiertas.

La encuesta se aplicará a los trabajadores para complementar la información obtenida a través de la observación, indagando sobre su percepción del esfuerzo físico asociado a las labores en el vivero. El trabajador (encuestado) debe calificar en una escala de valores entre 0 al 10, que mejor represente la experiencia laboral, donde 0 representa “nada en absoluto” y 10 “máximo” esfuerzo físico asociado.

En específico, para este trabajo se identificaron siete tareas que serán consultadas en la encuesta:

1. **Transporte de sacos de sustrato:** esta tarea se refiere al movimiento de los sacos de material inerte o mezcla de cultivo desde el punto de descarga (por ejemplo, camión) hasta el área donde se preparará o almacenará el sustrato. Consiste en la manipulación física de los sacos, que suelen pesar entre 20 y 70 kilogramos, y su traslado a distancias variables dentro del vivero. Tradicionalmente, se realiza cargando los sacos manualmente sobre los hombros o utilizando carretillas de mano de una o dos ruedas. También se pueden emplear carretillas más grandes o pequeños tractores con remolques para volúmenes mayores o distancias más largas. Como alternativa a los métodos tradicionales, existen los sistemas de descarga a granel del sustrato directamente en silos o tolvas, el uso de montacargas para mover paletas completas de sacos, o incluso sistemas de cintas transportadoras si el volumen justifica la inversión. En el vivero Bosques del Sur, el transporte se realiza mediante carretilla de 2 o 3 sacos por vuelta, son aproximadamente 12 sacos para 1 [m³] de sustrato, a una distancia de 20 [m] entre el almacén y el sector de mezcla.

2. **Mezcla de sustrato:** consiste en asegurar una mezcla homogénea de todos los ingredientes para garantizar una distribución uniforme de nutrientes, aireación y retención de humedad. La mezcla de sustrato implica la combinación de diferentes componentes (fertilizantes, pesticidas, perlita, etc). De forma manual, esta tarea se lleva a cabo extendiendo los componentes sobre una lona grande o una superficie limpia, y luego revolviéndolos con palas y horquillas. En viveros un poco más grandes, se pueden usar mezcladoras de cemento adaptadas o mezcladoras de tambor pequeñas. Las alternativas a estos métodos manuales incluyen mezcladoras de sustrato mecánicas diseñadas específicamente para horticultura (de paletas o de tambor rotatorio), que garantizan una mezcla más rápida y uniforme, o incluso la compra de sustratos premezclados a granel que eliminan la necesidad de esta tarea en el vivero. En el vivero Bosques del Sur, utilizando pala, se humecta el sustrato con agua a un punto donde en la mano se sienta compacto, pero que no escurra el agua cuando se aprieta. Luego se mezcla el sustrato con diferentes componentes, pudiendo ser fertilizante y/o químicos fungicidas o insecticidas.

3. **Relleno de almácigos:** esta actividad consiste en llenar las bandejas de germinación o contenedores individuales (almácigos) con el sustrato preparado, asegurando una densidad adecuada y un nivel uniforme. Un buen relleno es fundamental para el correcto desarrollo radicular y la emergencia de las plántulas. Manualmente, el proceso implica tomar puñados de sustrato o usar una pequeña pala para llenar cada celda o contenedor. Luego, se suele presionar ligeramente el sustrato para eliminar bolsas de aire y se nivela la superficie con una regla o tabla para asegurar uniformidad. Las alternativas incluyen máquinas llenadoras de bandejas semiautomáticas o automáticas, que vibran y cepillan el sustrato en las celdas a gran velocidad, y luego nivelan el exceso, aumentando drásticamente la eficiencia y uniformidad del llenado. En el vivero Bosques del Sur, manualmente se rellena las 84 cavidades de 130 [cc] de cada bandeja.

4. **Siembra manual:** la siembra manual se refiere a la colocación individual de semillas en las celdas llenas de sustrato. Esta es una tarea de precisión que requiere cuidado para asegurar la profundidad correcta y la distribución adecuada de las semillas. Consiste en hacer un pequeño orificio en cada celda, depositar una o dos semillas en él (dependiendo de la especie y el porcentaje de germinación esperado), y luego cubrirlas ligeramente con una fina capa de sustrato o vermiculita. Los métodos alternativos más comunes son las sembradoras de precisión a vacío,

que utilizan una placa con orificios que recogen las semillas por succión y las liberan simultáneamente en cada celda de la bandeja. Existen versiones manuales, semiautomáticas y completamente automáticas, que mejoran enormemente la velocidad y la uniformidad de la siembra. En el vivero Bosques del Sur, dependiendo de la especie, se siembran hasta 3 semillas por cavidad previamente rellena, a una profundidad de 5 veces el diámetro de la semilla.

5. **Transporte a cámara germinativa:** una vez sembradas, las bandejas necesitan ser trasladadas a una cámara de germinación o a un área con condiciones controladas de temperatura y humedad para optimizar la brotación de las semillas. Esta tarea consiste en mover con sumo cuidado las bandejas para evitar que las semillas se desplacen o que el sustrato se derrame, lo que podría afectar negativamente la germinación y uniformidad. Manualmente, las bandejas se transportan una a una o en pequeñas pilas usando ambas manos o con la ayuda de carros de plataforma. Las alternativas implican el uso de carritos especializados con múltiples niveles, estanterías rodantes, o incluso sistemas de transporte automatizados como cintas transportadoras o carros motorizados que pueden manejar grandes volúmenes de bandejas de manera más eficiente y segura. En el vivero Bosques del Sur, las bandejas almacigueras previamente rellenas y sembradas, se trasladan en lotes de 3 por carretillada a la cámara de germinación, que está a 8 [m] de la zona de mezclado.

6. **Colocación de bandejas en mesón:** Después de la germinación, o en etapas tempranas de crecimiento, las bandejas de plántulas se colocan sobre mesones de cultivo en invernaderos o áreas de crecimiento. Esta tarea consiste en distribuir las bandejas de manera ordenada, asegurando un espaciamiento adecuado para la luz, el flujo de aire y el acceso para riego y manejo. Manualmente, los operarios llevan las bandejas de germinación una a una o en pequeñas pilas y las colocan cuidadosamente en los mesones, ajustando su posición para maximizar el espacio disponible y la exposición. Los métodos alternativos incluyen sistemas de cintas transportadoras, carros y rieles que permiten mover y posicionar grupos de bandejas a lo largo de los mesones, o incluso transportadores aéreos y brazos robóticos en viveros de alta tecnología que automatizan completamente el posicionamiento de las bandejas. En el vivero Bosques del Sur, las bandejas son trasladadas desde la cámara de germinación, al invernadero. Se usa la carretilla con capacidad para 3 bandejas, y luego se distribuyen, manualmente, sobre los mesones.

7. **Transporte a zona de endurecimiento:** El endurecimiento es un proceso crucial en el que las plántulas son gradualmente aclimatadas a condiciones ambientales más rigurosas (menor humedad, temperaturas más variables, mayor exposición al sol y al viento) antes de ser plantadas en campo abierto o vendidas. Esta tarea implica el movimiento de las bandejas de plántulas desde el invernadero o área de crecimiento protegida a una zona de endurecimiento (ej. un túnel, una malla sombra o directamente al exterior). Manualmente, las bandejas se cargan y transportan utilizando carretillas de mano, carritos más grandes o pequeños tractores con remolques. En viveros de mayor escala, las alternativas incluyen el uso de paletas y montacargas para mover grandes volúmenes de bandejas paletizadas, sistemas de transporte con cintas que pueden trasladar las plántulas entre diferentes secciones del vivero de forma autónoma. En el vivero Bosques del Sur, una vez finalizada la primera etapa en invernadero, se trasladan en grupos de 3 bandejas por carretilla desde el invernadero hasta la zona de endurecimiento o sombreado. Ambas estructuras se encuentran a 70 [m] de distancia y están conectadas por un sendero de tierra. Al inicio del trayecto, el sendero presenta un desnivel de aproximadamente 1 m debido a un montículo de tierra que separa ambos puntos.

Finalmente, de esta encuesta se desprenderá información esencial para análisis estadísticos, cualitativos y cuantitativos, para identificar (según la percepción de los trabajadores) las tareas que generan mayor esfuerzo físico en la operatividad actual del vivero Bosques del Sur.

2.1.2 Sistema de riego y consumo hídrico

Como segunda etapa, será el análisis de los métodos de riego actuales en el vivero "Bosques del Sur" y se estimará el consumo hídrico, considerando factores como la frecuencia y duración de los riegos, el tipo de sustrato utilizado y las necesidades hídricas en general de las especies nativas cultivadas. Se utilizará la información recopilada en el vivero, y el volumen y la frecuencia de reposición se determinarán mediante la experimentación y el uso del concepto de capacidad de campo (CC) del sustrato, un factor crítico en la disponibilidad de agua para las plantas y en el manejo de viveros a raíz cubierta (Quiroz Marchant et al. 2009).

El experimento busca determinar el tiempo óptimo de riego necesario para que el sistema de riego actual alcance el punto de saturación y posterior drenaje gravitacional del sustrato, lo cual equivale a la Capacidad de Campo (CC), determinado como el 60% de saturación del sustrato de corteza de pino. El cálculo de este tiempo óptimo de riego en invernaderos es fundamental para garantizar un adecuado

desarrollo de las plántulas forestales, evitando tanto el estrés hídrico como el exceso de humedad que puede favorecer enfermedades radiculares (Dumroese & Haase 2018).

En este experimento primero se determinó el peso promedio de 15 bandejas secas y vacías, de poliestireno expandido tipo “P”, de 84 cavidades y 130 [cc] de volumen por cavidad, registrando individualmente el peso de cada una utilizando una balanza mecánica Soehnle. Las bandejas almacigueras, también conocidas como bandejas de germinación o contenedores, son recipientes de cultivo modular diseñados específicamente para la producción de plantas en viveros forestales. Su función principal es contener el sustrato y la semilla, proporcionando un ambiente controlado para la germinación y el desarrollo inicial de las plántulas que es el medio de cultivo que reemplaza al suelo natural y proporciona soporte, aireación y nutrientes a las plantas. Mientras que existen diversos tipos de sustratos utilizados en viveros, como la perlita, la turba o las mezclas de fibra de coco, en este caso específico se trabajó con corteza de pino compostada, material ampliamente utilizado en viveros forestales chilenos por sus buenas características físicas y disponibilidad local. La humedad óptima se considera cuando el sustrato se mantiene unido al apretarlo con la mano, pero sin liberar agua fácilmente. Se procedió con el llenado de las 15 bandejas con el sustrato previamente humectado, asegurando una distribución uniforme en todas las cavidades. Se continuó con la saturación del sustrato, donde se regaron las bandejas hasta que se observó goteo constante desde la parte inferior de cada cavidad, indicando que el sustrato ha alcanzado su punto de saturación. Posteriormente, se dejaron las bandejas en reposo durante 2 horas para permitir el drenaje del exceso de agua por gravedad. Este proceso permitió alcanzar la capacidad de campo del sustrato, donde el agua retenida está disponible para las plántulas, esto con la finalidad de determinar el peso de las bandejas drenadas. Transcurrido el tiempo de reposo, se pesaron individualmente las 15 bandejas drenadas con el sustrato humedecido a capacidad de campo, y se registró el peso promedio de todas ellas.

Las 15 bandejas se distribuyeron en tres grupos de cinco; 5 bandejas en el sector delantero del invernadero, 5 bandejas en el sector medio del invernadero y 5 bandejas en el sector final del invernadero. Esta distribución busca considerar posibles variaciones en la homogeneidad de riego de los aspersores. Posteriormente se procederá con la determinación del tiempo óptimo de riego. Se activará el sistema de riego por aspersion monitoreando las bandejas de cada grupo, observando el tiempo transcurrido hasta que se inicie el goteo desde la parte inferior de la mayoría de las cavidades en cada grupo. Se registrará el tiempo necesario para alcanzar el goteo en cada grupo. El tiempo óptimo de riego (*Triego_optimo*) se determinará considerando el tiempo promedio necesario para alcanzar el goteo en los tres grupos.

El experimento anterior nos permitirá hacer una proyección del consumo hídrico actual en el vivero, el cual será comparado con un modelo piloto, a desarrollar en esta propuesta, proyectando una potencial reducción del consumo hídrico al implementar un sistema de riego automatizado basado en la lectura de sensores de humedad. Los sensores de humedad permiten ajustar el riego dentro de un rango óptimo (entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, dependiendo del cultivo y sustrato). El punto de marchitez permanente es el estado en el que una planta ya no puede recuperar su turgencia, incluso cuando la atmósfera es favorable para ello, porque el sustrato ha agotado toda el agua disponible para ella. Esto significa que la fuerza con la que las raíces pueden absorber agua es menor que la tensión con la que el sustrato retiene el agua restante, lo que lleva a un marchitamiento irreversible y, eventualmente, a la muerte de la planta si no se corrige la situación a tiempo. Es un umbral crítico para el riego, ya que cruzarlo implica un daño irreparable a los cultivos. Así, este modelo pretende considerar la optimización de la frecuencia y duración del riego en función de las condiciones reales de humedad del sustrato, evitando el riego excesivo o insuficiente.

Para establecer la línea base de consumo hídrico del vivero y poder cuantificar el ahorro potencial de la modernización (Sección 3.3), se calculará el consumo hídrico actual (C_A) anual. Este cálculo se basa en el tiempo óptimo de riego ($T_{\text{riego_optimo}}$), la frecuencia de riego, y el caudal de los aspersores utilizados en los mesones de cultivo.

El Consumo Hídrico Actual se determinará mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 1: Consumo hídrico

$$C_A = Q_{\text{aspersor}} \cdot T_{\text{riego_optimo}} \cdot N_{\text{ciclos}} \cdot N_{\text{días}} \quad [1]$$

Donde:

- C_A : Consumo Hídrico Actual (Litros/Año).
- $Q_{\text{(aspersor)}}$: Caudal de cada aspersor (Litros/minuto). Este valor se obtendrá mediante medición directa en terreno.
- $T_{\text{(riego_optimo)}}$: Tiempo óptimo de riego (minutos), determinado en el paso metodológico anterior.
- $N_{\text{(ciclos)}}$: Número de ciclos de riego por día, según la práctica actual del vivero (o asumida para la proyección).
- $N_{\text{(días)}}$: Días de operación del sistema de riego por año (se asumirá un valor representativo del ciclo productivo).

2.2 Fundamentación teórica

La búsqueda de fundamentación teórica se realizará con el objetivo de sintetizar la evidencia existente sobre la modernización de viveros forestales, enfocándose en tres áreas clave: (1) automatización de viveros, incluyendo cintas transportadoras y su impacto en la reducción del esfuerzo físico y prevención de lesiones musculoesqueléticas; (2) implementación de sensores de humedad en sistemas de riego automatizados para optimizar el consumo de recursos hídricos; y (3) sistemas de captación de aguas lluvia y sus efectos en el manejo hídrico.

La investigación empleará una revisión sistemática de literatura en diversas bases de datos electrónicas, seleccionadas por su relevancia en ingeniería agrícola, forestal, ciencias del suelo, ergonomía y recursos hídricos. Se consultarán plataformas de alto impacto como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SciELO y Google Scholar, complementadas con búsquedas en ResearchGate y la revista Bosque. A nivel institucional, se utilizará el catálogo electrónico SiBUACH y la Biblioteca Virtual de la Universidad Austral de Chile para acceder a tesis y publicaciones locales. El marco referencial se fortalecerá con informes técnicos de organismos nacionales como INFOR e INIA, además de normativas y datos globales proporcionados por la FAO y la OIT. Esta estrategia metodológica asegura una cobertura exhaustiva, integrando evidencia científica internacional con el contexto técnico y normativo de Chile. Para la obtención de los artículos en las bases de datos, se usarán los siguientes términos de búsqueda en inglés y español, con los operadores booleanos (AND, OR, NOT) y en distintas combinaciones para así evitar la exclusión de aquellos artículos relevantes, y a la vez, evitar la inclusión de artículos que no guarden relación al tema. Como ejemplo, a continuación, se muestran 3 áreas de interés principales y palabras clave con conectores booleanos a usar (cuadro 1):

Cuadro 1: Ejemplos de términos y operadores booleanos empleados.

Área de interés	Palabras clave	Conector	Palabras clave
Automatización y Ergonomía	“nursery automation”	OR	“conveyor systems”
Sensores; Humedad y Riego	"Soil moisture sensors"	AND	“Automated irrigation”
Captación de Aguas Lluvia	"Rainwater harvesting"	OR	“forest nursery”

Criterios de inclusión serán; 1) Publicaciones científicas (artículos de revista, capítulos de libro, actas de congresos revisadas por pares), 2) Tesis de pregrado y postgrado de universidades reconocidas. 3) Informes técnicos o guías de instituciones de investigación relevantes (INFOR, INIA). 4) Idioma español e inglés. 5) Énfasis en artículos publicados desde el año 2015 en adelante, para asegurar la relevancia tecnológica y contemporánea, con excepción de bibliografía que abarca conceptos o técnicas más antiguas, que siguen vigentes y aplicables al presente trabajo. 6) Disponibilidad de texto completo, y 7) Estudios que describen metodologías de búsqueda bibliográfica o revisiones de literatura.

Los criterios de exclusión serán; 1) Se excluirá la información de artículos de revistas, libros, anales de congreso y tesis que no concuerden con los objetivos planteados y especificados anteriormente, 2) Se excluirá las publicaciones que no estuvieran en idioma español o inglés. 3) Artículos de opinión, editoriales, noticias, o blogs. 4) resúmenes de congresos sin publicación de actas completas, y 5) estudios no relacionados directamente con viveros forestales, a menos que la tecnología o principio sea directamente extrapolable y se justifique su inclusión.

2.3 Diseño de una propuesta de modernización

La propuesta de modernización del vivero “Bosques del Sur” requiere enfoques basados en evidencia para abordar tres desafíos de mejora: (1) la reducción del esfuerzo físico del personal mediante sistemas automatizados de transporte de materiales, y (2) la optimización del uso de recursos hídricos mediante sensores de humedad (para riego eficiente) y (3) captación y uso de aguas lluvias. En cada uno de estos tres desafíos, con base en los resultados del diagnóstico de condiciones actuales del vivero (expuesto en sección 2.1), que incluyen análisis de procesos laborales y consumo hídrico, se procederá con un diseño técnico de soluciones para modernización del vivero, que incluyen automatización y mejoramiento en la gestión hídrica y, por último, se realizará la evaluación de viabilidad, incluyendo la proyección de beneficios esperados en disminución de esfuerzo físico y conservación de los recursos hídricos.

2.3.1 Modernización con cintas transportadoras

Se inicia con el análisis de flujos laborales, donde se pretende identificar las tareas donde se genera mayor esfuerzo físico (resultados asociados a la encuesta de percepción del esfuerzo físico). Luego, con los resultados de la búsqueda bibliográfica y el estado del arte, se procede con la selección

del tipo de cinta transportadora, en función del tipo y carga de materiales a transportar y la factibilidad de su aplicación en el vivero. Posteriormente, se propondrá la ubicación estratégica de la cinta transportadora para minimizar recorridos, eliminar movimientos repetitivos de carga y descarga, y optimizar la secuencia de operaciones conectando los invernaderos con el resto de las estructuras del vivero.

2.3.2 Incorporación de sensores de humedad

En base a los resultados de la experimentación con la capacidad de campo (CC), la búsqueda bibliográfica y el estado del arte, se procederá con la selección de los sensores de humedad, que son dispositivos electrónicos insertados en el sustrato que miden el contenido de agua, funcionando principalmente por principios capacitivos (detectando la constante dieléctrica del agua) o resistivos (midiendo la conductividad eléctrica). Su principal función es permitir un riego de precisión: al monitorear la disponibilidad de agua en tiempo real, ayudan a evitar el estrés hídrico (tanto por falta como por exceso), optimizan el uso del agua y los recursos, y son fundamentales para automatizar los sistemas de riego, asegurando el crecimiento óptimo y saludable de las plántulas, adecuados para el sustrato del vivero (corteza de pino) y las especies forestales producidas, considerando su eficiencia, durabilidad y costo. Se especificarán los rangos de humedad óptimos para la etapa inicial de crecimiento de las plántulas objetivo (Chauhdary et al. 2024; Escobar 2007).

Se procederá con el diseño de la red de sensores de humedad, donde se determinará la cantidad y ubicación estratégica de los sensores en las diferentes zonas de riego del invernadero, para obtener una representación precisa de la humedad del sustrato en tiempo real. Por último, se procederá con la selección de un software programable que permita/gestione un sistema de control y lectura de los sensores de humedad, (ej.: plataformas de monitoreo IoT, controladores lógicos programables - PLC o Arduino). Este software debería permitir:

- Monitoreo en tiempo real de la humedad del sustrato.
- Establecimiento de umbrales de riego (puntos de inicio y finalización del riego).
- Programación de ciclos de riego automáticos basados en la demanda hídrica de las plántulas objetivo y la humedad del sustrato.
- Generación de reportes de consumo hídrico y estados de riego.
- Acceso remoto a la aplicación.

2.3.3 Sistema de captación y aprovechamiento de aguas lluvia

Se realizará una estimación del potencial de captación de aguas lluvia, calculando el volumen de agua de lluvia que puede ser recolectado anualmente, basándose en la superficie de techos disponibles en el vivero y los datos históricos de precipitación en la Región de Los Ríos que se pueden obtener de diversas fuentes, como las del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)² y las de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). En esta propuesta, se hace uso de la información de datos meteorológicos de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC 2025).

A partir de lo anterior, se procederá con una propuesta de infraestructura de captación de aguas lluvia. A su vez, se propondrá un sistema de conducción, donde se diseñará la disposición de las canaletas, tuberías y filtros para transportar el agua desde las superficies de captación hasta los depósitos de almacenamiento. Luego, se desarrollará un sistema de bombeo y distribución para integrar el agua de lluvia al sistema de riego existente, con posibilidad de tratamiento si la calidad del agua lo requiere para uso en vivero. Seguidamente, se modelará el balance hídrico del vivero con la incorporación de la captación de aguas lluvia, estimando la reducción en la dependencia de fuentes de agua convencionales y la mejora en la resiliencia hídrica ante variaciones climáticas. Por último, se propondrá una proyección del consumo hídrico antes y después de la implementación del sistema de captación de aguas lluvias y sensorización.

Cabe mencionar aquí, respecto a las normativas nacionales a la fecha que tengan que ver con la captación de aguas lluvia, que el Código de Aguas (DFL 1.122 de 1981) considera las aguas lluvias como parte de los bienes nacionales de uso público, estableciendo en el ARTICULO 10°- *“El uso de las aguas pluviales que caen o se recogen en un predio de propiedad particular corresponde al dueño de éste, mientras corran dentro de su predio o no caigan a cauces naturales de uso público”*.

2.4 Materiales

Para esta propuesta se emplearán los siguientes materiales:

Cuadro 2: Materiales y software.

Actividad	Materiales y software
Experimento de capacidad de campo (CC)	Carretilla, pala, sustrato, bandejas de almácigos, balanza mecánica Soehnle, plumones marcadores, temporizador, cámara fotográfica.
Búsqueda bibliográfica Adaptación encuesta	Notebook personal (Asus TUF, F-15), Microsoft Excel, Word, internet proporcionadas por la Universidad Austral de Chile.
Análisis de resultados	Notebook personal (Asus TUF, F-15), software de diseño SketchUp 2025, software de análisis estadístico R 2025.05.0, software de sistema de información geográfico QGIS Desktop 3.40.5.

3. RESULTADOS

En esta sección se describen los resultados del desarrollo de la propuesta del sistema modernizado para el transporte de materiales y la optimización de recursos hídricos. Estos se organizan en tres ejes principales. En primer lugar, los hallazgos de la encuesta de percepción del esfuerzo físico. En segundo término, se exponen los principales hallazgos bibliográficos que nutren la argumentación de la propuesta. Como tercer punto, se presenta la proyección del consumo hídrico antes y después de la implementación del sistema de captación de aguas lluvias y sensorización, cuantificando la optimización de recursos a largo plazo. Finalmente, se expone la propuesta de diseño integral que articula ambos componentes, delineando la viabilidad técnica de la modernización.

3.1 Encuesta de percepción de esfuerzo físico

Para determinar la confiabilidad de la encuesta, se calculó el coeficiente alfa de Cronbach, el cual arrojó un valor de 0.72. Este resultado, al superar el umbral de 0.70 establecido, indica y concluye que la encuesta presenta una confiabilidad aceptable para fines de investigación. La encuesta fue contestada por 34 trabajadores.

Seguidamente se hace un análisis sobre las respuestas de las preguntas de selección única que fueron realizadas en la encuesta. Según lo evidenciado de la estadística descriptiva, se puede inferir que la tarea 7 (“Transporte a zona de endurecimiento”) es la tarea que mayor esfuerzo fue percibido por parte de los encuestados. Se observa que la mayoría (sobre el 75% de los encuestados respondieron 6 o sobre 6, “Fuerte +”), tuvieron una percepción de esfuerzo alta y muy similar, esto respaldado por la media de 7,09 (equivalente a “Muy fuerte” en la escala). Respecto a la actividad que requiere menor esfuerzo físico, fue la tarea 4 de (“Siembra manual”), con una media de valor 2,12 (ver en figura 1).

Cabe destacar que en la pregunta 1 (“Transporte de sacos con sustrato”), se registró la mayor desviación estándar, de valor 1,87 (ver en cuadro 3). Esta alta variabilidad podría explicarse principalmente por dos factores que contribuyen a explicar la heterogeneidad observada; las distintas distancias que debieron recorrerse entre las áreas de acopio y los puntos de uso del sustrato en cada invernadero (ya que fueron encuestados los trabajadores de más de un vivero), las cuales varían según la distribución y tamaño de las instalaciones. Por su parte, la tarea 5 (“transporte a cámara germinativa”), registró la menor desviación estándar de valor 1,09 (ver en cuadro 3). Este bajo nivel de dispersión podría atribuirse a la proximidad existente entre el invernadero y la cámara germinativa en todos los viveros

estudiados, ya que las distancias relativamente homogéneas entre ambas estructuras habrían favorecido un mayor consenso en la percepción del esfuerzo físico asociado a esta actividad.

Cuadro 3: Media, mediana y desviación estándar. Preguntas 1 a 7.

Tareas	Media	Mediana	Desviación estándar
1. Transporte de sacos de sustrato	6	6	1,87
2. Mezcla de sustrato	5,97	6	1,38
3. Relleno de almácigos	3,71	4	1,38
4. Siembra	2,12	2	1,27
5. Transporte a cámara germinativa	5,18	5	1,09
6. Colocación en mesones	5,47	5	1,46
7. Transporte a zona de endurecimiento	7,09	7,5	1,33

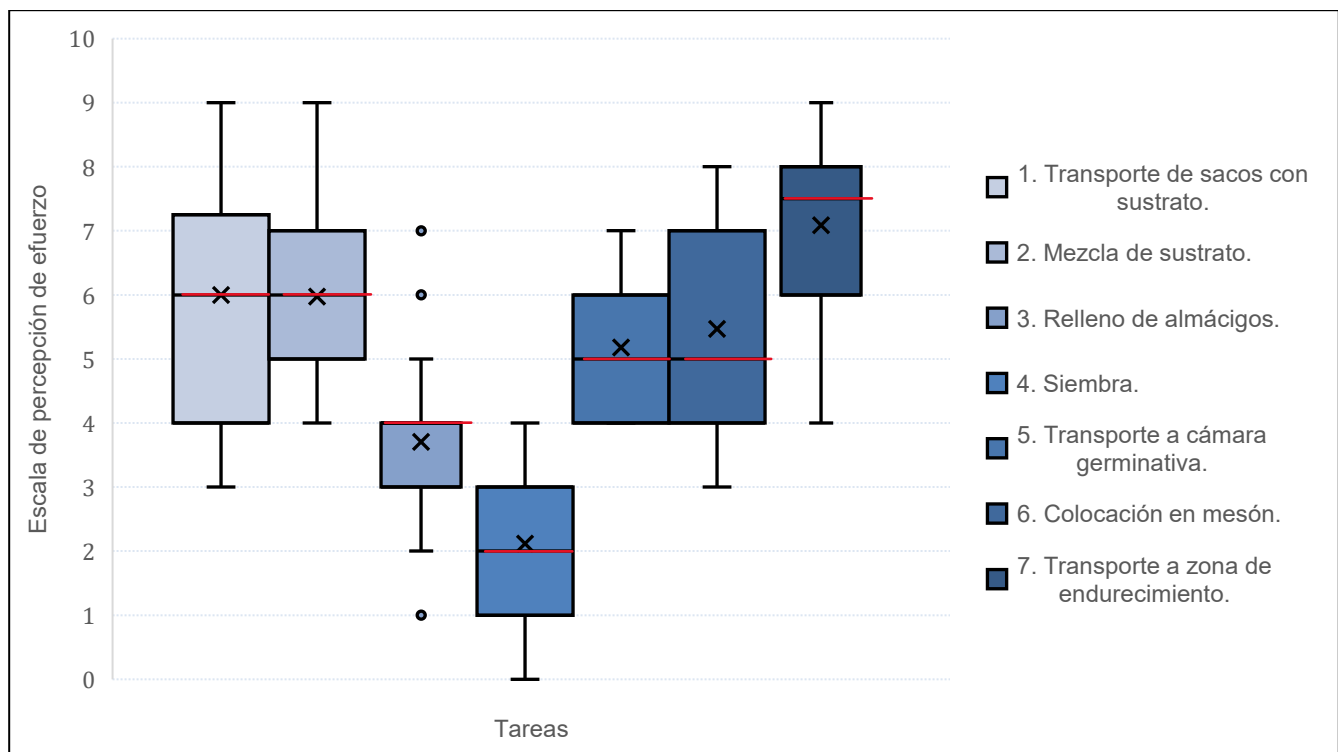


Figura 1: boxplot de las tareas 1 a 7. Dispersión en la percepción de esfuerzo de los viveristas encuestados. La línea roja es la mediana y la "X" la media.

Respecto al análisis de la sección de preguntas abiertas de la encuesta, en la pregunta n°1 la categoría "traslado de bandejas" (53% frecuencia), es percibida como la tarea más exigente físicamente (ver en figura 2).

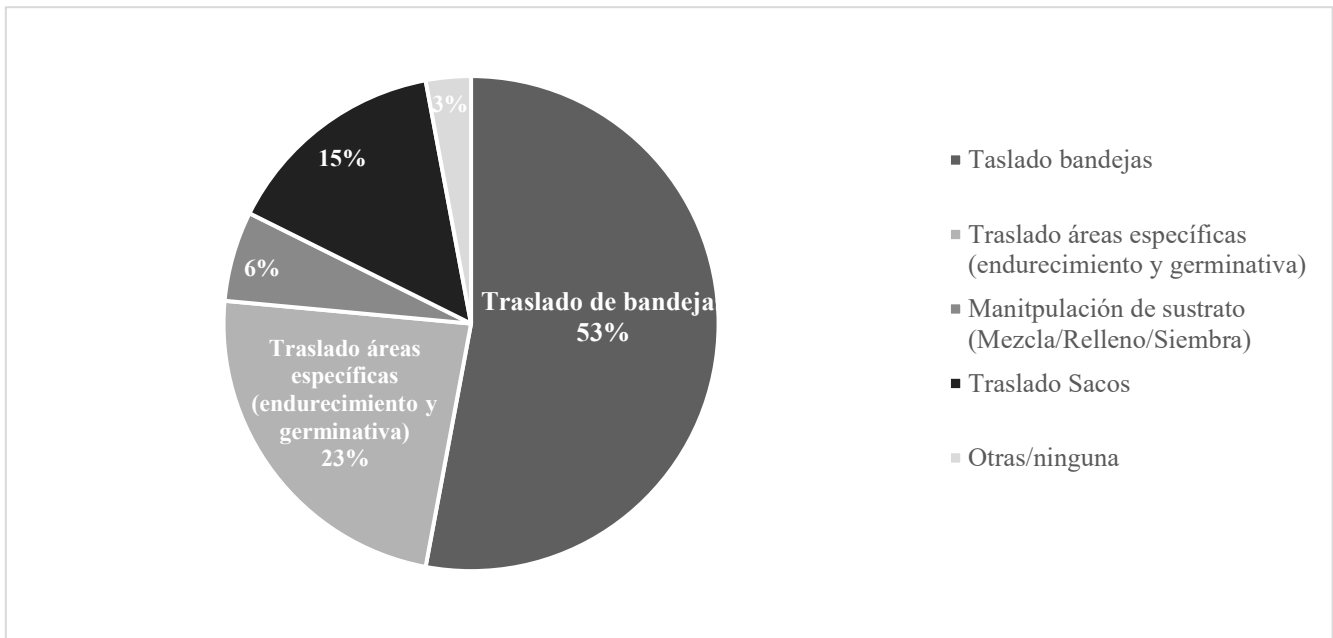


Figura 2: porcentaje de frecuencia de categorías de la pregunta abierta n°1 “Describa con sus propias palabras qué tarea(s) del vivero considera(s) la(s) más exigente(s) físicamente y por qué”.

A su vez, se observa que de la pregunta n°2 la categoría " Espalda y extremidades superiores" con una frecuencia del 53% de (ver en figura 3), es la parte del cuerpo más afectada.

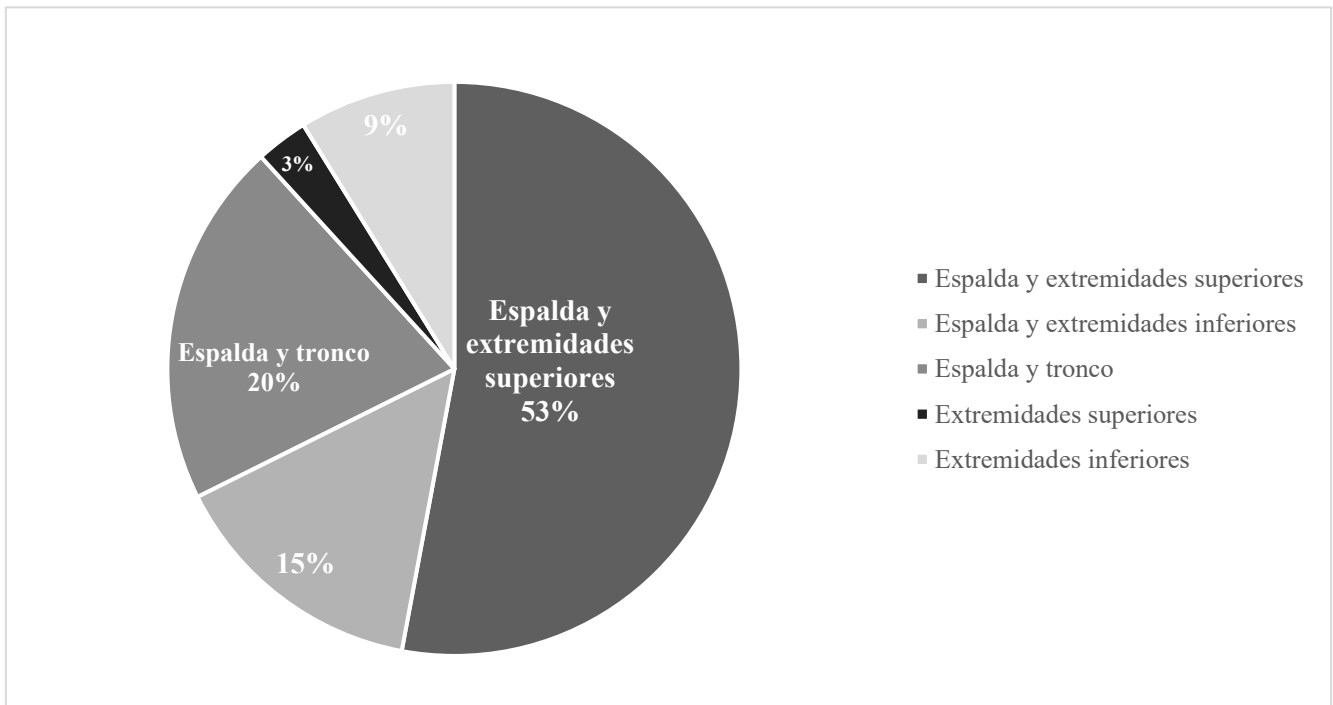


Figura 3: porcentaje de frecuencia de categorías de la pregunta abierta n°2 “¿Qué partes de su cuerpo se sienten más afectadas después de realizar sus labores en el vivero?”.

Por último, de la pregunta abierta n°3, se observa que la categoría “traslado mecánico” (41%) es la que más menciones tiene (ver en figura 4).

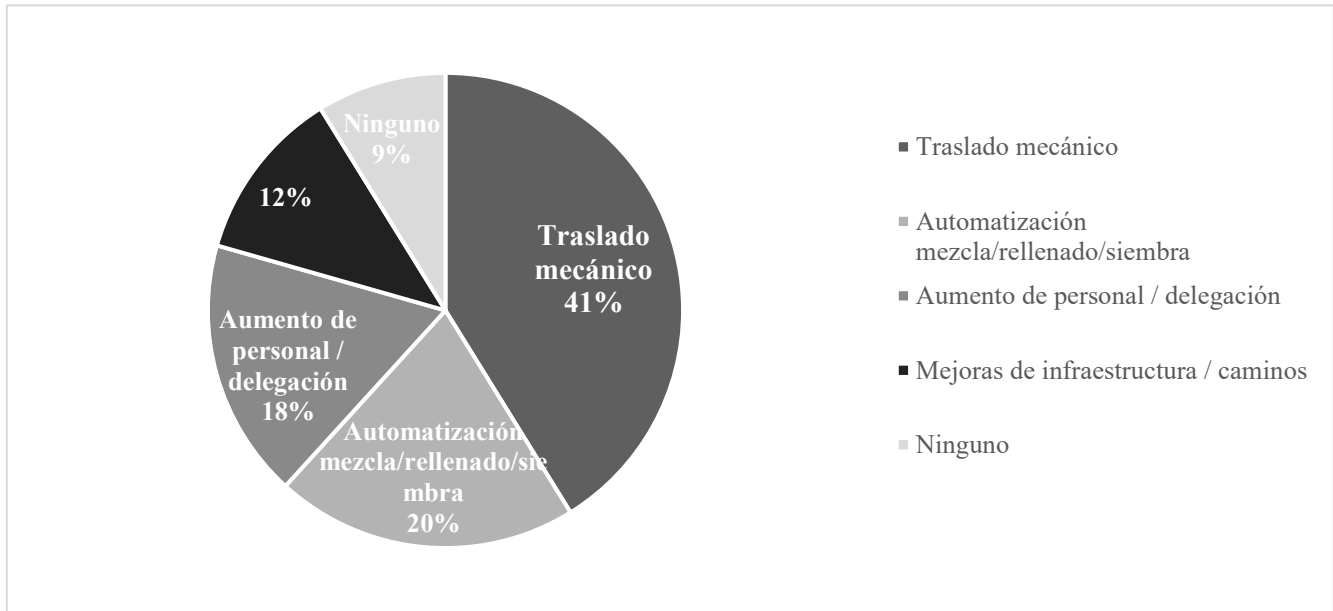


Figura 4: porcentaje de frecuencia de categorías de la pregunta abierta n°3 “Si pudiera sugerir un cambio para reducir el cansancio físico, ¿qué propondría y por qué?”.

Los resultados del análisis muestran de forma consistente que la fuente principal de exigencia física en los viveros es el traslado manual de bandejas y materiales: 18 de 34 respuestas (53%) identificaron el “traslado de bandejas” como tarea más demandante y 5 respuestas (15%) mencionaron específicamente el traslado de sacos; a la vez, 23 de 34 trabajadores (68%) reportaron molestias en la espalda (incluyendo lumbares), mientras que brazos y pies aparecen como afectación secundaria. Frente a la demanda física evidenciada, la solución más sugerida por los trabajadores encuestados fue la mecanización del traslado con 14 menciones de 34 (41%), y también hubo propuestas relevantes de automatizar mezcla y relleno con un equivalente del 21% de menciones y de aumentar personal con 6 menciones de 34 (18%). En este contexto, se puede inferir que la modernización mediante cintas transportadoras de materiales se justifica; un sistema continuo de transporte reduciría el número de tareas repetitivas y desplazamientos largos, disminuyendo la frecuencia y la magnitud de las fuerzas manuales aplicadas (menor carga por levantamiento, menos flexión/rotación repetida de la columna y menos transporte horizontal manual). Esto debería traducirse en una reducción de la exposición a factores de riesgo ergonómico asociados a los traumas musculoesqueléticos por esfuerzo físico y repetitivo (especialmente cargas lumbares y sobrecarga de hombros/brazos), además de mejorar la eficiencia del flujo entre invernadero, área de endurecimiento y sombreadero. Por tanto, y dado que la mayoría de las

molestias y propuestas se relacionan con el manejo manual de bandejas y sacos, priorizar la instalación de cintas transportadoras aparece como una intervención coherente y con alto potencial de impacto ergonómico.

3.2 Proyección del consumo hídrico

Para proyectar el consumo hídrico del invernadero oeste y poder hipotetizar sobre el impacto positivo de la modernización tras la implementación del sistema de captación de aguas lluvias y sensorización, cuantificando la optimización de recursos a largo plazo, se realizó una actividad práctica donde se utilizaron 15 bandejas almacigueras. El objetivo fue obtener dos parámetros aproximados relevantes para la gestión del riego y la estimación del consumo hídrico: 1) el peso límite aproximado óptimo de las bandejas durante el riego y 2) el tiempo de riego aproximado necesario para alcanzar el 60 % de la capacidad de campo del sustrato. La capacidad de campo se definió como la cantidad máxima de agua equivalente al 60 % de la saturación de humedad que el sustrato (compuesto por corteza de pino compostada) puede retener tras alcanzar la saturación y permitir el drenaje del exceso por gravedad.

Como indicado anteriormente, las 15 bandejas se distribuyeron en tres grupos de cinco unidades, ubicadas respectivamente en el sector inicial, medio y final del invernadero, con el fin de considerar posibles variaciones en la uniformidad de riego de los aspersores. Posteriormente, se procedió a la determinación del tiempo óptimo de riego y el peso de las bandejas. Para ello, se activó el sistema de aspersión y se monitorearon las bandejas de cada grupo, registrando el tiempo transcurrido (óptimo) hasta el inicio del goteo por la base de la mayoría de las cavidades. Una vez alcanzado este punto, se registró el peso del sustrato en su máxima capacidad de retención de agua, y a partir de dicho valor se calculó el peso correspondiente al 60 % de humectación, donde se obtuvo el peso promedio del total de bandejas, dando un valor de 5,15 kg, que sería la capacidad de campo. Finalmente, este peso objetivo permitió determinar el tiempo de riego necesario para alcanzar el nivel de humedad óptimo durante la operación normal, que fue de 16,52 minutos.

Posteriormente, se determinó el caudal aproximado del sistema de riego mediante la medición del flujo de 15 aspersores, agrupados en tres secciones del invernadero: delantero, medio y final de las cuatro líneas de riego. Estas líneas de riego corresponden a tuberías principales que distribuyen el agua a lo largo del invernadero y sobre las cuales se conectan los aspersores, permitiendo una aplicación uniforme del agua sobre las bandejas almacigueras. A continuación, se midió el tiempo que cada aspersor demoró en emitir un litro de agua, obteniéndose un promedio general de 37 segundos. De esto se

desprende que el sistema actual del invernadero oeste del vivero Bosques del Sur usa aspersores de caudal medio, con un promedio de 97,3 [l/hr]. El caudal de los aspersores es del tipo más común en la producción en invernadero para riego de macetas y bandejas. Con dicho valor y considerando el número total de aspersores instalados (76 unidades), se estimó el caudal total del sistema de riego del invernadero. Con esta información, y considerando la frecuencia y duración de los eventos de riego según la estacionalidad, se calculó el consumo hídrico mínimo estimado del invernadero. El régimen de riego del invernadero oeste se caracteriza por una duración constante de 20 minutos por evento de riego a lo largo de la temporada. Sin embargo, la frecuencia de aplicación varía significativamente en función de la estacionalidad para satisfacer la demanda hídrica de las plantas. Durante la temporada invernal, la frecuencia se reduce a un promedio de 26 eventos (aproximadamente dos eventos por semana). En contraste, en la temporada estival (verano), el número de eventos asciende a 91, lo que sugiere una aplicación diaria e incluso en múltiples ocasiones en el mismo día, reflejando el incremento en la evapotranspiración y las mayores necesidades hídricas de las plantas. Las temporadas de primavera y otoño presentan frecuencias intermedias de 52 y 51 eventos, respectivamente, marcando la transición entre los extremos de demanda hídrica

El resultado obtenido corresponde a un consumo aproximado de 542.300 litros por temporada para el invernadero oeste del vivero Bosques del Sur (ver en cuadro 4).

Cuadro 4: resumen consumo de agua por temporada del invernadero.

Estación	Eventos	Consumo total (L)
Invierno	26	64090
Primavera	52	128180
Verano	91	224315
Otoño	51	125715
Total temporada	220	542300

Para cuantificar el impacto de la implementación de un sistema de captación de aguas lluvias (SCALL) en el consumo hídrico del invernadero oeste, se desarrolló un modelo de balance hídrico basado en la metodología propuesta por Sucozhañay et al. (2024). El modelo simula la dinámica mensual del sistema mediante la ecuación:

Ecuación 2: Volumen de agua lluvia captada [1]

$$RW = P \times A \times rl \times cl \quad [2]$$

Dónde “RW” representa el volumen de agua lluvia captada (l), “P” la precipitación mensual (mm), “A” el área de captación del techo del invernadero. En el caso del invernadero oeste del vivero Bosques del Sur la superficie es de 326 [m²], que sería la “A” en la ecuación. Para “rl”, el coeficiente de pérdidas en el techo 0,9 y “cl” el coeficiente de pérdidas en la conducción 0,9. El coeficiente de pérdidas en el techo 0,9 representa que aproximadamente el 90% del agua lluvia que cae sobre la superficie es capturada, ya que un 10% se pierde principalmente por el mojado inicial de la superficie y la evaporación inmediata. Posteriormente, el coeficiente de pérdidas en la conducción 0,9 indica que, del agua ya captada en el techo, otro 10% se pierde durante su transporte a través de canaletas y tuberías hacia el tanque de almacenamiento, debido a factores como pequeñas fugas, evaporación en el recorrido o retención de agua en las propias conducciones. La aplicación de estos factores, tal como lo establece el modelo de Sucozhañay et al. (2024), permite obtener una estimación realista del recurso hídrico disponible, determinando que, en este caso, solo el 81% del agua de lluvia que cae sobre el techo llegará finalmente a ser almacenada para su uso. Este valor se obtiene aplicando el modelo conceptual de balance hídrico propuesto por Sucozhañay et al. (2024), en el cual el volumen efectivo de agua captada considera las pérdidas tanto en la superficie del techo como en el sistema de conducción. Al asignar valores de 0,9 para cada coeficiente, que representan una eficiencia del 90% en cada etapa, se obtiene una eficiencia combinada. Esto implica que solo el 81% del total de la precipitación incidente sobre el techo llega finalmente al tanque de almacenamiento, reflejando pérdidas por humectación inicial, evaporación superficial, retención y fugas menores en la conducción.

La demanda hídrica se estimó considerando 220 eventos anuales de riego distribuidos estacionalmente, con un consumo de 2465 [l] por evento, calculado a partir del caudal total del sistema de aspersión (76 aspersores × 97,3 l/h × 0,3333 h). con una precipitación total de 1,288.8 [mm] (ver en cuadro 6) para el período junio 2024 a mayo 2025.

Para evaluar el desempeño del sistema de captación de aguas lluvias, se definen dos indicadores complementarios; 1) la eficiencia del sistema, calculada como la razón entre el volumen de agua de lluvia efectivamente utilizado para riego y la demanda total de agua del invernadero durante el período analizado, expresando así la fracción de las necesidades hídricas que logra satisfacerse con agua captada; y 2) el aprovechamiento del agua disponible, definido como la proporción del volumen total de agua

lluvia captada que realmente se utiliza para riego, en una condición virtual donde no haya límites de almacenamiento. Mientras el primer indicador refleja el grado de autosuficiencia hídrica alcanzado por el sistema, el segundo evidencia la eficacia en el aprovechamiento del recurso disponible. De lo anterior se desprende el balance hídrico [mm] mensual proyectado sin restricción de almacenamiento (ver en cuadro 5).

Cuadro 5: balance hídrico [mm] mensual proyectado. Sin restricción de almacenamiento.

Mes	Agua de Lluvia Recolectada	Demanda Mensual de Riego	Balance Hídrico Neto	Porcentaje de Cobertura
jun 2024	93.007	21.363	71.644	100,00
jul 2024	21.547	21.363	184	100,00
ago 2024	23.558	21.363	2.195	100,00
sep 2024	52.868	42.727	10.141	100,00
oct 2024	7.183	42.727	-35.544	100,00
nov 2024	22.445	42.727	-20.282	100,00
dic 2024	2.482	74.772	-72.290	3,3
ene 2025	7.129	74.772	-67.643	9,53
feb 2025	9.083	74.772	-65.689	12,15
mar 2025	21.969	41.905	-19.936	52,43
abr 2025	40.716	41.905	-1.189	97,16
may 2025	38.337	41.905	-3.568	91,48
TOTAL	340.323	542.300	-201.977	62,75

Los resultados del balance hídrico para el período junio 2024 a mayo 2025 (ver cuadro 6) revelan que:

Cuadro 6: balance hídrico anual del sistema de captación de aguas lluvias.

Parámetro	Valor
Precipitación total	1.288,8 mm
Agua captada potencial	420.149 L
Demanda total de riego	542.300 L
Agua de lluvia utilizada	340.323 L
Agua de red requerida	201.977 L
Eficiencia del sistema	62,75 %
Aprovechamiento del agua disponible	100,00 %

El valor de 420.149 [l] en el cuadro corresponde al volumen total de precipitación anual sobre el área de techo del invernadero oeste, sin considerar pérdidas, calculado mediante la ecuación de Sucozhañay et al. (2024). Posteriormente, el 81% de ese valor, determinado por los coeficientes $r_1 = c_1 = 0.9$, representa el volumen efectivamente captado y disponible 340.323 [l].

El análisis del sistema de captación de aguas lluvias (SCALL) para el vivero "Bosques del Sur" demuestra que esta estrategia constituye una solución técnicamente viable para optimizar el consumo hídrico, uno de los objetivos centrales de la propuesta de modernización. Según el modelo de balance hídrico aplicado, basado en la metodología de Sucozhañay et al. (2024), el sistema puede suplir el 62.75% de la demanda anual de riego, lo que equivale a un ahorro de 340.323 litros de agua convencional anuales. Este resultado, valida el potencial de la captación de lluvia como fuente complementaria sustancial, reduciendo significativamente la presión sobre los recursos hídricos tradicionales y avanzando hacia una gestión más circular y sostenible en la operación del vivero.

No obstante, el diagnóstico detallado revela que la principal limitante no es la cantidad total de lluvia, sino la capacidad de almacenamiento para superar la estacionalidad. El análisis mensual identifica un desfase: mientras en otoño e invierno se genera un superávit, en los meses de primavera y verano (cuando la demanda de las plantas es máxima) la cobertura del SCALL cae drásticamente, hasta cubrir solo el 3.3% de la necesidad en diciembre. Este hallazgo es crucial para los objetivos del diseño, pues señala que la eficiencia global del sistema no está limitada por el diseño de captación, sino por la

infraestructura de almacenamiento. En consecuencia, la optimización del sistema y el aumento de su resiliencia operativa ante la variabilidad climática pasan necesariamente por incrementar la capacidad de los estanques, permitiendo almacenar los excedentes invernales para su uso en la temporada de mayor demanda.

3.3 Propuesta de diseño

A partir de los hallazgos descritos en los resultados, se formula una propuesta de diseño de modernización para el vivero “Bosques del Sur” de la Universidad Austral de Chile. Esta propuesta busca integrar soluciones tecnológicas que respondan a las necesidades detectadas durante el diagnóstico del vivero, y que a la vez se sustenten en evidencia científica reciente. El diseño contempla tres componentes principales: 1) un sistema de transporte automatizado mediante cintas transportadoras, 2) un sistema de riego inteligente basado en sensorización y plataformas IoT, y 3) un sistema de captación y aprovechamiento de aguas lluvias.

La propuesta de modernización constituye un sistema integrado donde los tres componentes interactúan de forma sinérgica. El SCALL capta y almacena agua de lluvia, la cual es utilizada como fuente principal por el sistema de riego inteligente. Dicho sistema, controlado por un microcontrolador (Arduino/Raspberry Pi Pico o Pico W), activa los sectores de riego únicamente cuando los sensores de humedad ubicados en el sustrato lo indican, optimizando el recurso. Paralelamente, una red de cintas transportadoras mecaniza el flujo de materiales (sustrato, bandejas, plantas), reduciendo la carga física del personal y sincronizándose con los ciclos de riego y trasplante (ver diagrama en anexo 3).

3.3.1 Propuesta de Implementación de Cintas Transportadoras de Materiales

La implementación de la automatización en el transporte de materiales se justifica plenamente por su capacidad de incrementar de manera significativa la eficiencia operativa. Los resultados de la encuesta “Percepción de esfuerzo físico” aplicadas en distintos viveros forestales de la Región de los Ríos, Chile, junto con la evidencia recopilada en la revisión bibliográfica, indican que el transporte manual de materiales genera riesgos asociados a posturas forzadas y esfuerzos repetitivos, siendo causas directas de trastornos musculoesqueléticos y lumbalgias en el personal. La mecanización mediante el SCTA permitirá eliminar estas tareas de riesgo.

Para el vivero “Bosques del Sur” se propone la instalación de cintas transportadoras de banda y configuración móvil, destinadas a optimizar el flujo de materiales tanto en las áreas de procesamiento (como las etapas de llenado y siembra) como en las zonas de distribución o acopio temporal, particularmente en los sectores de endurecimiento y sombreado. El sistema contempla el uso de dos tipos de bandas transportadoras: la primera corresponde a una banda motorizada, equipada con un motor de velocidad ajustable mediante un controlador mecánico; la segunda consiste en secciones de acoplamiento, que pueden conectarse modularmente a la unidad motorizada. La banda motorizada, en conjunto con las secciones de acoplamiento, permitirá conformar líneas de transporte de hasta 50 metros de longitud total. En total se emplearán 12 cintas transportadoras, de las cuales 2 serán motorizadas y 10 funcionarán como módulos de extensión. Cada sección tendrá una longitud estándar de 6 metros, ancho útil de 40 [cm] y un peso aproximado de 49 [kg] más el soporte de patas. Las secciones estarán conectadas entre sí mediante un eje de transmisión ubicado bajo la plataforma y un sistema de acoplamiento rápido accionado por resorte, lo que facilita su montaje y desmontaje. Asimismo, cada unidad contará con patas trípode ajustables, un eje de transmisión de doble dirección y requerirá una alimentación eléctrica de 220 VCA monofásica, compatible con la red eléctrica local del vivero.

3.3.2 Propuesta de implementación del sistema de riego inteligente

El sistema propuesto integra tres niveles tecnológicos principales: (1) sensorización del sustrato, (2) automatización del control del riego y (3) gestión centralizada de datos y monitoreo remoto.

Respecto a la sensorización de la humedad del sustrato, se ha definido la implementación de sensores capacitivos para la medición del Contenido Volumétrico de Agua (CVA), la unidad de medida más estandarizada y directa para la gestión del riego. El CVA indica el porcentaje del volumen total del sustrato que es ocupado por agua. Aunque los sensores de Reflectometría de Dominio de Tiempo (TDR) ofrecen la mayor exactitud en la medición de la constante dieléctrica, los sensores capacitivos son más económicos y adecuados para implementaciones extensivas en sistemas de vivero, siempre que se calibren adecuadamente (Chauhdary et al. 2024). Un sensor capacitivo es un tipo de dispositivo que estima el CVA al medir la constante dieléctrica aparente del sustrato (su habilidad para almacenar energía), la cual es directamente afectada por la presencia de agua. Son populares por su bajo costo y resistencia, aunque su precisión depende de una correcta calibración. Para este fin, se propone el uso del sensor capacitivo de bajo costo (comercializado bajo el SKU SEN0193 V2.0), fabricado por DFRobot Electronics, el cual ha demostrado ser altamente eficaz en el registro de las variaciones del CVA en el

sustrato (Dal Magro et al., 2024). Estos dispositivos se ubicarán estratégicamente en sectores representativos del invernadero (frente, medio y fondo) para registrar la variabilidad espacial del CVA en tiempo real. Esta estrategia es fundamental para compensar la heterogeneidad del microclima interno, asegurando que la medición represente fielmente las condiciones reales en toda el área de cultivo (Kuo et al. 2021). La información capturada permitirá determinar cuándo el valor medido descienda del umbral establecido, que corresponde al 60 % de la Capacidad de Campo (CC) del sustrato, activando una señal hacia el controlador principal.

El núcleo operativo del sistema de riego inteligente propuesto estará conformado por una placa Raspberry Pi 4, ampliamente utilizados en automatización agrícola por su bajo costo, flexibilidad y capacidad de integración con múltiples sensores y módulos periféricos. (Taha et al. 2022; Florea et al. 2023). Estos procesadores recibirán los datos de los sensores de humedad del sustrato, y ejecutarán un algoritmo de control basado en lógica difusa (fuzzy logic). Este control es capaz de manejar las variaciones asociadas a las condiciones microclimáticas y a la heterogeneidad del sustrato, ya que se basa en la predicción de precipitación (lluvia) y la monitorización en tiempo real, ajustando en tiempo real el tiempo de apertura de las electroválvulas conforme a las condiciones de humedad predefinidas (60 % de la Capacidad de Campo, CC). El uso de lógica difusa ha mostrado resultados positivos en viveros de coníferas, al permitir decisiones autónomas de riego que hacen más eficiente el uso del agua sin comprometer el crecimiento de las plantas (Taha et al. 2022).

Para la operación hidráulica del sistema se emplearán válvulas solenoides, compatibles con la red de aspersión actualmente instalada. Estas serán controladas mediante relés de estado sólido, los cuales permiten accionar las válvulas a partir de las señales emitidas por el controlador principal. Dichos dispositivos ofrecen una conmutación silenciosa, una respuesta rápida y una mayor durabilidad al carecer de partes móviles (González-Clavijo et al. 2022). La fiabilidad del sistema se refuerza mediante la incorporación de elementos de protección electrónica y disipadores térmicos, que aseguran una operación estable y segura frente a picos de corriente o tensiones transitorias. En particular, los circuitos de supresión o amortiguación (snubber) protegen los relés frente a las sobretensiones generadas durante la conmutación de cargas inductivas, como las válvulas solenoides. Sin estos componentes, la vida útil del sistema de conmutación se reduciría considerablemente, afectando la confiabilidad general (Medina et al. 2024). De manera complementaria, se integra un módulo de control horario destinado al registro y gestión de los tiempos de activación, duración y patrones de humedad. Este componente ofrece alta precisión temporal, permitiendo programar distintos ciclos de riego en función de la estacionalidad y de las fases de desarrollo de las plantas, lo que contribuye a un manejo hídrico más eficiente y adaptable.

Esta estrategia favorece la reducción de escorrentías y la minimización de pérdidas de agua, aspectos críticos para la sostenibilidad en los viveros de contenedores (Shamshiri et al. 2018; Spinelli et al. 2024; Sanap et al. 2025).

La información recopilada por los sensores será procesada y visualizada en tiempo real a través de una plataforma IoT, como ThingSpeak o Blynk. La selección de estas plataformas se basa en su fácil integración mediante API (Interfaz de Programación de Aplicaciones), que permite que el microcontrolador envíe los datos directamente a la nube a través de comandos sencillos, y su capacidad para el data logging en la nube, es decir, el almacenamiento histórico y persistente de los datos recolectados. Esto permitirá desplegar los principales parámetros del sistema, incluyendo: humedad y pH del sustrato, temperatura, tiempo acumulado de riego y volumen de agua aplicado. Estas herramientas de visualización y análisis de datos en la nube, al transformar la información de los sensores en métricas claras e históricas, favorecen la toma de decisiones basada en evidencia, lo que reduce la incertidumbre y mejora la eficiencia operativa y el ahorro de agua, elementos cruciales en la gestión del riego inteligente (Touil et al. 2022; Chauhdary et al. 2024).

3.3.3 Propuesta de implementación de sistema de captación de aguas lluvia

Respecto al módulo de captación de aguas lluvia, este se basa en el aprovechamiento de la superficie techada del invernadero como área colectora principal, donde las precipitaciones serán conducidas mediante canaletas de PVC de 110 mm hacia bajantes equipadas con filtros de primera lluvia. Este componente permite descartar los primeros milímetros de precipitación, eliminando partículas y contaminantes superficiales antes del ingreso al sistema de almacenamiento (Campisano et al. 2017; Rahman 2016). El agua recolectada se almacenará en estanques ya existentes; uno con capacidad de 1.800 [l] y otros dos de polietileno de alta densidad (PEAD) de 1.000 [l] cada uno. La selección de materiales plásticos resistentes a radiación UV y agentes químicos, como la cloración (hipoclorito de sodio o calcio) o sulfato de cobre (CuSO_4), garantiza la durabilidad estructural y la inocuidad del agua almacenada, aspecto esencial para el riego de plántulas forestales (Barriga et al. 2024). El sistema aprovechará la bomba hidroneumática eléctrica existente en el vivero “Bosques del Sur”, actualmente utilizada para el suministro de agua a los aspersores del invernadero. Esta bomba será reintegrada y controlada electrónicamente desde el microcontrolador principal del sistema: la Raspberry Pi 4 Model B. Se selecciona esta plataforma por su capacidad de procesamiento avanzado, sistema operativo y sus capacidades nativas de Wi-Fi, esenciales para gestionar el procesamiento de los datos de los sensores y

la comunicación fluida con la plataforma IoT (ThingSpeak/Blynk). El sistema automatizado regulará la operación de la bomba y de las válvulas solenoides de 24 V, activándolas únicamente cuando los sensores de humedad del sustrato indiquen niveles por debajo del 60 % de la Capacidad de Campo (CC), valor determinado experimentalmente para el sustrato de corteza de pino compostada.

El flujo desde el estanque será regulado mediante una válvula antirretorno (para prevenir el flujo inverso y proteger la bomba) y un sistema de filtrado de malla fina, asegurando la protección de los componentes hidráulicos y la homogeneidad del riego. El sistema de control registrará continuamente los volúmenes de agua extraídos y el tiempo de funcionamiento de la bomba, permitiendo generar balances hídricos semanales detallados. Este monitoreo constante no solo sustentará las evaluaciones de eficiencia y consumo energético, sino que se alinea con la meta del riego inteligente de maximizar la eficiencia en el uso del agua y mejorar el rendimiento del cultivo (Touil et al. 2022). Este tipo de integración, basada en la comunicación en tiempo real entre sensores, actuadores y plataformas IoT, promueve la digitalización y automatización de los procesos agrícolas, lo que resulta en sistemas más amigables, sostenibles y con un notable ahorro energético (Florea et al. 2023).

A continuación, en la figura 5, se presenta una imagen del resultado del modelamiento 3D de la propuesta de modernización integral, mediante la utilización del software SketchUP 2025, que sintetiza la interacción espacial y funcional de los tres sistemas descritos. A su vez, se incorporan imágenes de los principales componentes de la propuesta (ver en anexo 4)



Figura 5: modelamiento 3D de la propuesta de modernización.

3.3.4 Estimación preliminar de inversión

Considerando la implementación de esta propuesta de modernización, se estima que la inversión total oscilaría aproximadamente entre los \$22.000 - \$32.300 USD, utilizando un tipo de cambio referencial de 1 USD \approx 930 CLP, noviembre 2025 (ver en anexo 5). Es fundamental destacar que estas cifras son estimaciones basadas en rangos de precios aproximados extraídos del mercado actual para los componentes principales y en ciertas suposiciones sobre las cantidades de material. Para obtener una estimación financiera más precisa y ajustada al proyecto, sería indispensable contar con cotizaciones detalladas de proveedores específicos y una evaluación exhaustiva de las necesidades exactas de cada componente.

4. DISCUSIÓN

La propuesta de modernización para el vivero “Bosques del Sur” se sustenta en una integración de tres pilares de modernización, automatización del transporte, riego inteligente sensorizado y captación de aguas lluvias, cuya viabilidad técnica y científica ha sido respaldada por la literatura especializada. El análisis crítico de los resultados a la luz de los objetivos planteados confirma que esta triangulación de soluciones aborda de manera integral las principales deficiencias operativas identificadas: el esfuerzo físico y la ineficiencia en el uso del agua.

Los hallazgos de la encuesta de percepción de esfuerzo, que identificaron al "transporte a zona de endurecimiento" como la tarea más demandante (media = 7,09/10), proporcionan una justificación ergonómica sólida para la incorporación de cintas transportadoras. Este resultado es coherente con estudios previos que reportan que la mecanización de tareas de manipulación manual no solo incrementa la productividad entre un 80 % y 85 % (Jangam et al. 2023), sino que también reduce significativamente la incidencia de trastornos musculoesqueléticos, particularmente lumbalgias y lesiones en extremidades superiores (Mendieta & Simbaña, 2022). La alta fiabilidad y eficiencia de costos a mediano plazo de estos sistemas (Mazurkiewicz 2015), complementada con el monitoreo en tiempo real que eleva la disponibilidad operativa por encima del 78 % (Mendes et al. 2023), los convierte en una inversión estratégica para viveros de mediana escala como lo es el vivero Bosques del Sur.

En el ámbito de la gestión hídrica, el modelo de balance hidrológico desarrollado confirma que el sistema de captación y aprovechamiento de aguas lluvia puede suplir el 62,75 % de la demanda anual de riego, equivalentes a 340.323 litros de agua convencional. Este hallazgo se alinea con investigaciones que destacan el papel de estos sistemas en la mejora de la resiliencia hídrica y la reducción de la presión sobre fuentes convencionales (Campisano et al. 2017). Sin embargo, el análisis de estacionalidad revela una limitación crítica: la eficiencia global del sistema está condicionada por la capacidad de almacenamiento disponible, lo que resulta en una cobertura insuficiente durante los meses de máxima demanda estival Barriga et al. (2024). Esta situación subraya la necesidad de optimizar el dimensionamiento de los estanques, tal como proponen metodologías de modelado hidrológico como Yield-After-Spillage, que permiten una evaluación realista del rendimiento aprovechable y una fiabilidad temporal superior al 90 % en períodos secos (Rahman, 2016). Adicionalmente, el uso de agua de lluvia,

generalmente blanda, contribuye a reducir la formación de scaling o incrustaciones en los equipos de riego, disminuyendo costos de mantenimiento (Amos et al. 2016).

La implementación de un sistema de riego inteligente basado en sensores capacitivos de humedad, calibrados para el sustrato de corteza de pino compostada, representa un encaminamiento hacia el riego de precisión. La definición del umbral de riego en el 60 % de la capacidad de campo (CC) permite mantener un contenido hídrico óptimo, minimizando tanto el estrés hídrico como las pérdidas por drenaje, que pueden reducirse entre un 20 % y 30 % (Majsztrik et al. 2017). La adopción de lógica difusa (fuzzy logic) en el controlador principal (Raspberry Pi 4) permite manejar las variabilidades microclimáticas y la heterogeneidad espacial del sustrato, tomando decisiones autónomas y adaptativas que optimizan el uso del agua sin comprometer el crecimiento de las plántulas (Taha et al., 2022; Florea et al., 2023). Esta aproximación ha demostrado ahorros hídricos entre 20 % y 92 % en sistemas de agricultura controlada (Touil et al. 2022; Chauhdary et al. 2024), además de reducir la dependencia de la intervención manual y mejorar la uniformidad del riego por sectores.

La integración de los tres componentes en una arquitectura centralizada gestionada mediante plataformas IoT (como ThingSpeak o Blynk) no solo facilita el monitoreo remoto y el data logging, sino que también promueve la digitalización de los procesos productivos, resultando en sistemas más eficientes, sostenibles y con menor huella energética (Florea et al. 2023). La reutilización de infraestructura existente, como la bomba hidroneumática y los estanques, junto con el uso de componentes de bajo costo, mejora la viabilidad económica de la propuesta y refuerza su potencial de réplica en contextos similares.

En su conjunto, la propuesta se alinea con los principios de la agricultura de precisión y la automatización de ambientes controlados, donde la sensorización, la mecanización y la gestión eficiente de recursos hídricos convergen para crear sistemas productivos más resilientes, sostenibles y ergonómicamente seguros (Taha et al. 2022).

5. CONCLUSIONES

La implementación integrada de cintas transportadoras, riego inteligente basado en sensores y un sistema de captación de aguas lluvias en el vivero "Bosques del Sur" demuestra ser una solución técnicamente viable que cumple con el objetivo general de optimizar los recursos hídricos y reducir el esfuerzo físico laboral. La mecanización del transporte optimiza las tareas de mayor exigencia ergonómica identificadas, mientras que la sensorización del riego permite un uso preciso del agua, evitando tanto el déficit como el exceso de humedad en el sustrato. El sistema de captación de aguas lluvia, por su parte, confirma su potencial como fuente complementaria sustancial, alcanzando a cubrir más del 60% de la demanda hídrica anual mínima.

Como recomendación para trabajos futuros, se propone priorizar la ampliación de la capacidad de almacenamiento del sistema de aguas lluvias para superar la limitación estacional y aumentar la resiliencia operativa. Asimismo, se sugiere evaluar la incorporación de energías renovables para alimentar los sistemas automatizados y desarrollar estudios de escalabilidad que permitan adaptar este modelo de modernización a otros viveros forestales con condiciones operativas similares.

Este trabajo sienta las bases para la transformación tecnológica de viveros forestales mediante un modelo integral que articula eficiencia operativa, sostenibilidad hídrica y bienestar laboral. Las soluciones propuestas constituyen un precedente replicable que da pie a la estandarización de protocolos de automatización accesible y gestión inteligente de recursos en el sector viverístico nacional.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amos, C. C., Rahman, A., & Gathenya, J. M. (2016). Economic analysis and feasibility of rainwater harvesting systems in urban and peri-urban environments: A review of the global situation with a special focus on Australia and Kenya. *Water*, 8(4), 149. <https://doi.org/10.3390/w8040149>
- Arteaga, O., Amores, K., Terán, H., Cangui, R. S., Ramírez, A., Hurtado, S., Inlago, D., & Chuquimarca, B. R. (2020). Automation of a seed on tray seeder machine. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/872/1/012003>
- Barriga, F., Gómez, G., Diez, M. C., Fernandez, L., & Vidal, G. (2024). Influence of catchment surface material on quality of harvested rainwater. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16156586>
- Borg, G. (1998). Borg's perceived exertion and pain scales. *Human Kinetics*.
- Calderon Pico, A. E. (2024). El papel de los viveros forestales en la restauración ecológica comunitaria. *Revista Pulso Científico*. <https://doi.org/10.70577/rps.v2i4.28>
- Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M. J., Friedler, E., DeBusk, K., Fisher-Jeffes, L. N., Ghisi, E., Rahman, A., Furumai, H., & Han, M. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056>
- Chauhdary, J. N., Li, H., Jiang, Y., Pan, X., Hussain, Z., Javaid, M., & Rizwan, M. (2024). Advances in Sprinkler Irrigation: A Review in the Context of Precision Irrigation for Crop Production. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010047>
- Chile. (1981). Código de Aguas (Decreto con Fuerza de Ley N.º 1.122). Diario Oficial de la República de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=5605>
- Chile. (2016). Ley N.º 20.949: Modifica el Código del Trabajo para reducir el peso de las cargas de manipulación manual. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://bcn.cl/2f8n8>

Chile. (2022). Ley N.º 16.744: Establece normas sobre accidentes del trabajo y enfermedades profesionales. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://bcn.cl/24k96>

Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2023). Listado de viveros forestales 2023. https://www.conaf.cl/centro-documental/listado-viveros-forestales-2023/?ind=1713888998113&filename=Listado_Viveros_Forestales_2023.xlsx&wpdmdl=55555&refresh=6900b9ea04d711761655274

Dal Magro, S. Z., Trevizan Chiomento, J. L., Werner, H. A., Campanhola Bortoluzzi, E., & Possebon Bortoluzzi, M. (2024). Enhancing greenhouse strawberry irrigation: Integrating IoT technologies and low cost moisture sensors in substrate. *Revista Caderno Pedagógico*. <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n8-274>

Dirección general de aeronáutica civil. Dirección meteorológica de Chile – Servicios climáticos. Ficha de estación Pichoy, Valdivia Ad. (390006), 2025. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/informacion/fichaDeEstacion/390006>

Dumroese, R. Kasten; Haase, Diane L. 2018. Water management in container nurseries to minimize pests. *Tree Planters' Notes*. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/56063>

Escobar Rodríguez, R. (2007). Manual de viverización. *Eucalyptus globulus a raíz cubierta* (1.ª ed.). INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/17185>

Fajardo, S. N., Valenzuela, S., Dos Santos, A. F., González, M. P., & Sanfuentes, E. A. (2017). *Phytophthora pseudosyringae* associated with the mortality of *Nothofagus obliqua* in a pure stand in central-southern Chile. *Forest Pathology*. <https://doi.org/10.1111/efp.12361>

Florea, A., Popa, D.-I., Morariu, D., Maniu, I., Berntzen, L., & Fiore, U. (2023). Digital farming based on a smart and user-friendly IoT irrigation system: A conifer nursery case study. *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*. <https://doi.org/10.1049/cps2.12054>

González-Clavijo, E. M., Contreras-Niño, J. C., & Eslava-Blanco, H. J. (2022). Automatización del vivero Semigar. *Visión electrónica*.

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele/article/view/18951>

Ibacache Araya, J. (2020). Percepción de esfuerzo físico mediante uso de escala de Borg: Consideraciones acerca de la utilización del método en ambientes laborales. Sección Ergonomía, Departamento Salud Ocupacional, Instituto de Salud Pública de Chile.

http://www.ispch.cl/sites/default/files/Nota_T%C3%A9cnica_BORG%20_140819%20%282%29_pdf.pdf

Ipinza, R., Barros, S., de la Maza, C., Jofré, P., & Torres, J. (2023). Manejo forestal sustentable y biodiversidad. *Ciencia & Investigación Forestal*. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.586>

Jangam, D. D., Gurav, V. B., Pawar, N. N., Khatave, P. B., & Sutar, U. S. (2023). Automation of fruit sorting process using conveyor belt system. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.53976>

Kuo, P.-F., Huang, T.-E., & Putra, I. G. B. (2021). Comparing Kriging Estimators Using Weather Station Data and Local Greenhouse Sensors. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s21051853>

Majsztrik, J. C., Fernandez, R. T., Fisher, P. R., Hitchcock, D. R., Lea-Cox, J., Owen, J. S., Jr., Oki, L. R., & White, S. A. (2017). Water use and treatment in container-grown specialty crop production: A review. *Water, Air, & Soil Pollution*. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3272-1>

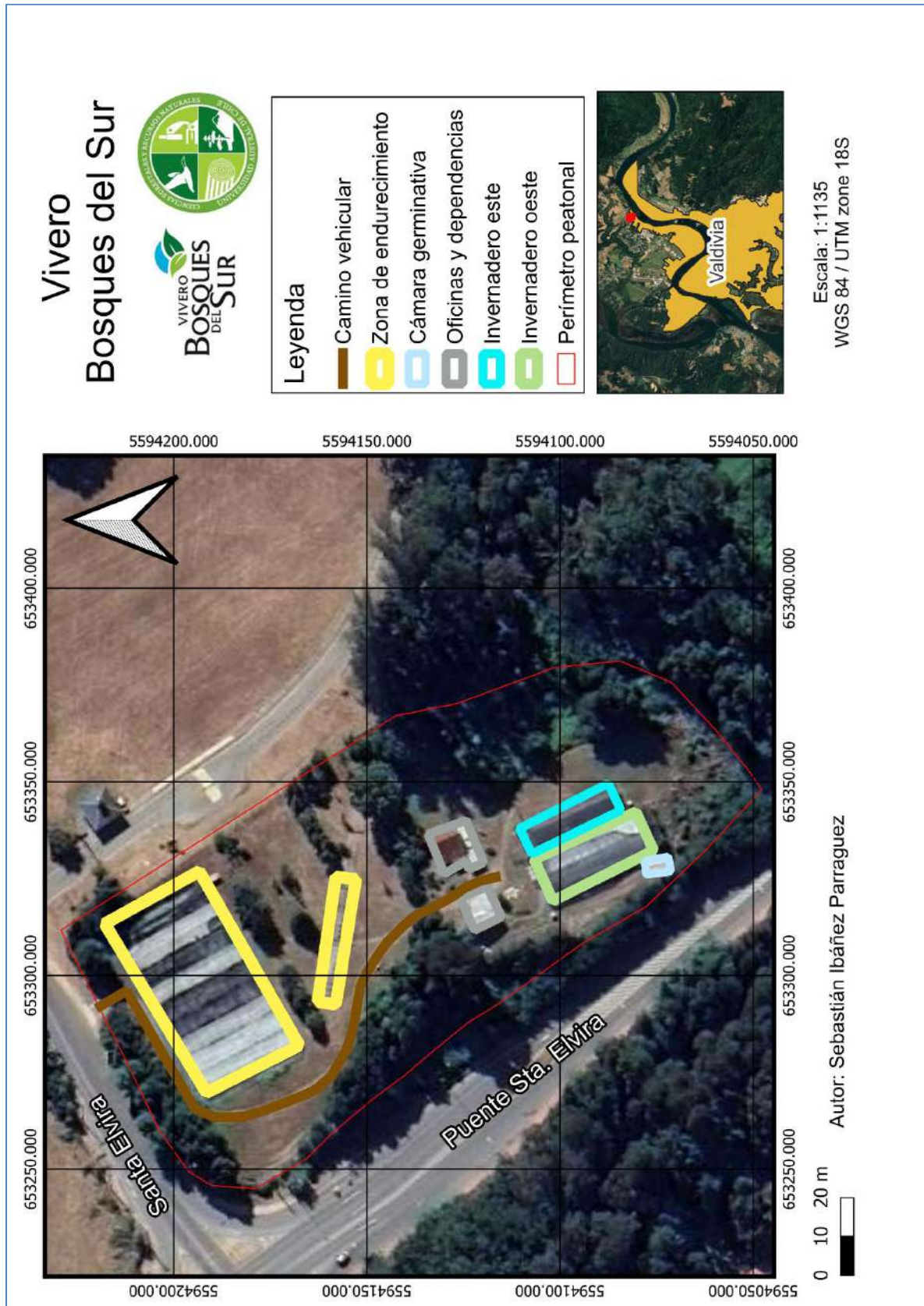
Mazurkiewicz, D. (2015). Maintenance of belt conveyors using an expert system based on fuzzy logic. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.12.009>

Mendes, D., Gaspar, P. D., Charrua-Santos, F., & Navas, H. (2023). Enhanced real-time maintenance management model-A step toward Industry 4.0 through lean: Conveyor belt operation case study. *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics12183872>

- Medina, Jorge & Barros, Kevin & Ramirez, Juan. (2024). Design and Construction of a Controlled Solid-State Relay with Variable Duty Ratio for DOMOTIC Applications. Engineering Proceedings. 77.
https://doi.org/10.3390/engproc2024077014?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26medium%3Darticle
- Mendieta Vélez, J. C., & Simbaña Paz, K. Y. (2022). Riesgos derivados de las actividades laborales en los trabajadores del vivero municipal del GAD Chone (Trabajo de Integración Curricular). Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.
<https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/8223526>
- Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2025). Trabajo, empleo, protección laboral y social en América Latina y el Caribe, 1994-2024 (Informe técnico). <https://doi.org/10.54394/XHIY3470>
- Quiroz Marchant, I., Chung Guin-po, P., García Rivas, E., et al. (2009). Vivero forestal: Producción de plantas nativas a raíz cubierta. INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/17366>
- Rahman, A. (2016). Recent advances in modelling and implementation of rainwater harvesting systems towards sustainable development. Water. <https://doi.org/10.3390/w9120959>
- Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Shad, Z. M. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210>
- Sanap, Prof. (2025). Design and Implementation of Real Time Clock using RTC DS3231 and Arduino Uno. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.67162>
- Spinelli, G., Bonarrigo, A. C., Cui, W., Grobowsky, K., Jordan, S. H., Ondris, K., Prieto García, C., Redding, K., Zalis Waldman, K., & Dahlke, H. E. (2024). Evaluating the distribution

- uniformity of ten overhead sprinkler models used in container nurseries. *Agricultural Water Management*, 303, Article 109042. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109042>
- Superintendencia de Seguridad Social (SUSESO). (2023). Informe regional 2023: Estadísticas de accidentes del trabajo y enfermedades profesionales. SUSESO. https://www.suseso.cl/607/articles-732522_archivo_01.pdf
- Sucozhañay, D., Rodríguez, L., Cevallos-Sierra, L., & Vásquez, M. (2024). Rainwater harvesting as a sustainable solution for the production of urban hydroponic crops. *Sustainable Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s40899-024-00865-y>
- Taha, M. F., ElMasry, G., Gouda, M., Zhou, L., Liang, N., Abdalla, A., Rousseau, D., & Qiu, Z. (2022). Recent advances of smart systems and Internet of Things (IoT) for aquaponics automation: A comprehensive overview. *Chemosensors*. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10080303>
- Touil, S., Richa, A., Fizir, M., Argente García, J. E., & Skarmeta Gómez, A. F. (2022). A review on smart irrigation management strategies and their effect on water savings and crop yield. *Irrigation and Drainage*. <https://doi.org/10.1002/ird.2735>
- Universidad Austral de Chile. (2023). Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales. <https://www.forestal.uach.cl/predios/vivero-bosques-del-sur.php>
- Wheeler, W. D., Thomas, P., van Iersel, M., & Chappell, M. (2018). Implementation of sensor-based automated irrigation in commercial floriculture production: A case study. *HortTechnology*. <https://journals.ashs.org/horttech/downloadpdf/view/journals/horttech/28/6/article-p719.pdf>

Anexo 1: Cartografía área de estudio



Anexo 2. Encuesta de percepción de esfuerzo físico

Percepción de esfuerzo físico

Encuesta modificada de protocolo ISP basado en escala de Borg modificada (0-10)

Autor: Sebastián Ibáñez

Instrucciones:

A continuación se describen las tareas que se realizaban en el invernadero. Para cada una, **califica tu esfuerzo físico** usando la **escala del 0 al 10**, donde:

Nivel indicador	Valor	Denominación
	0	Nada en absoluto
	1	Muy débil
	2	Débil
	3	Moderado
	4	Moderado +
	5	Fuerte
	6	Fuerte +
	7	Muy fuerte
	8	Muy, muy fuerte
	9	Extremadamente fuerte
	10	Máximo

Asigna un número del 0 al 10 que mejor represente tu experiencia.

Sección 1: Datos generales

1. Nombre (opcional):	Edad:	Sexo:	
		F	M
3. Tiempo trabajando en el vivero (días/meses):			
4. ¿Tienes antecedentes de lesiones musculares o articulares	Sí	No	
	[]	[]	

relacionadas con el trabajo? Marca con una "X":		
---	--	--

Sección 2: Evaluación por tarea

Tarea específica	Escala 0-10
1. Transporte de sacos con sustrato: aproximadamente 12 sacos para 1 m ³ , a 20 m de distancia. Considerar que para mujeres se trasladan máximo 2 sacos por carretilla.	
2. Mezcla de sustrato: Palear 1 m ³ de mezcla en una sola tanda.	
3. Relleno de almácigos: Llenar bandejas con sustrato manualmente.	
4. Siembra manual: Colocar semillas (hasta 3 por cavidad).	
5. Transporte a cámara germinativa: Llevar 3 bandejas en carretilla (10 m).	
6. Colocación en mesón: Mover bandejas al mesón (3 por tanda).	
7. Transporte a zona de endurecimiento: 3 bandejas en carretilla (70 m).	

Preguntas adicionales:

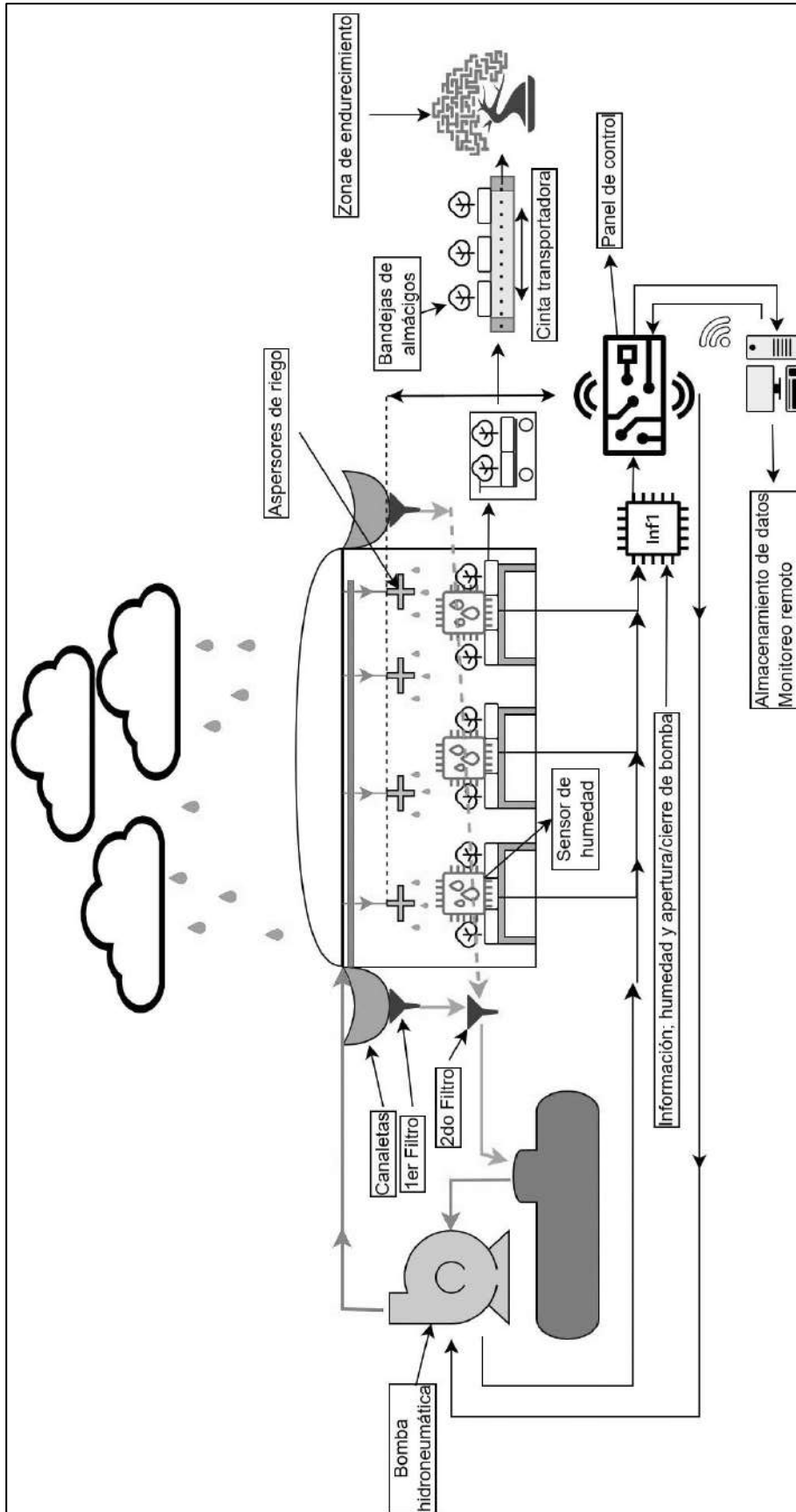
1. Describa con sus propias palabras qué tarea(s) del vivero considera(s) la(s) más exigente(s) físicamente y por qué.
<i>(Por ejemplo: "Mover los sacos al final del traslado").</i>
2. ¿Qué partes de su cuerpo siente más afectadas después de realizar sus labores en el vivero?

(Por ejemplo: “Me duele la espalda al usar la carretilla”).

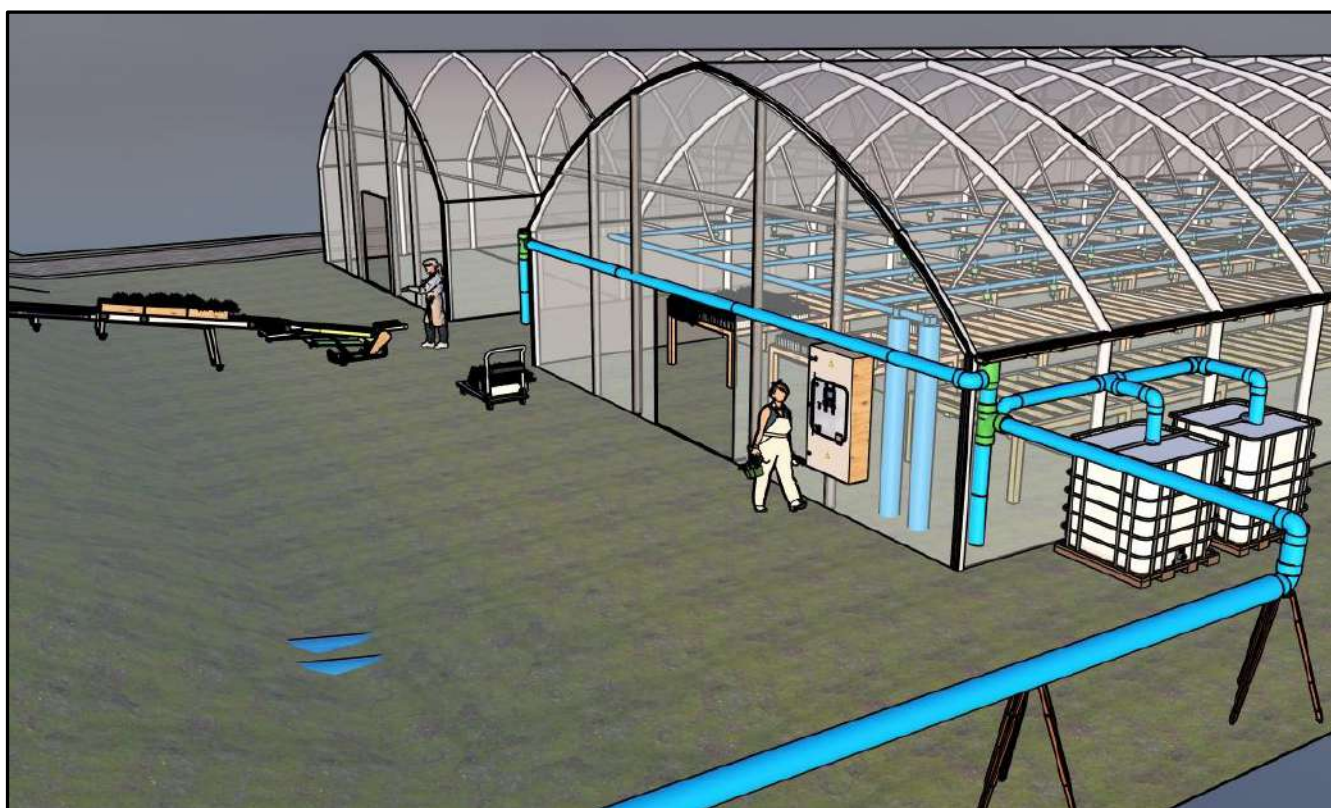
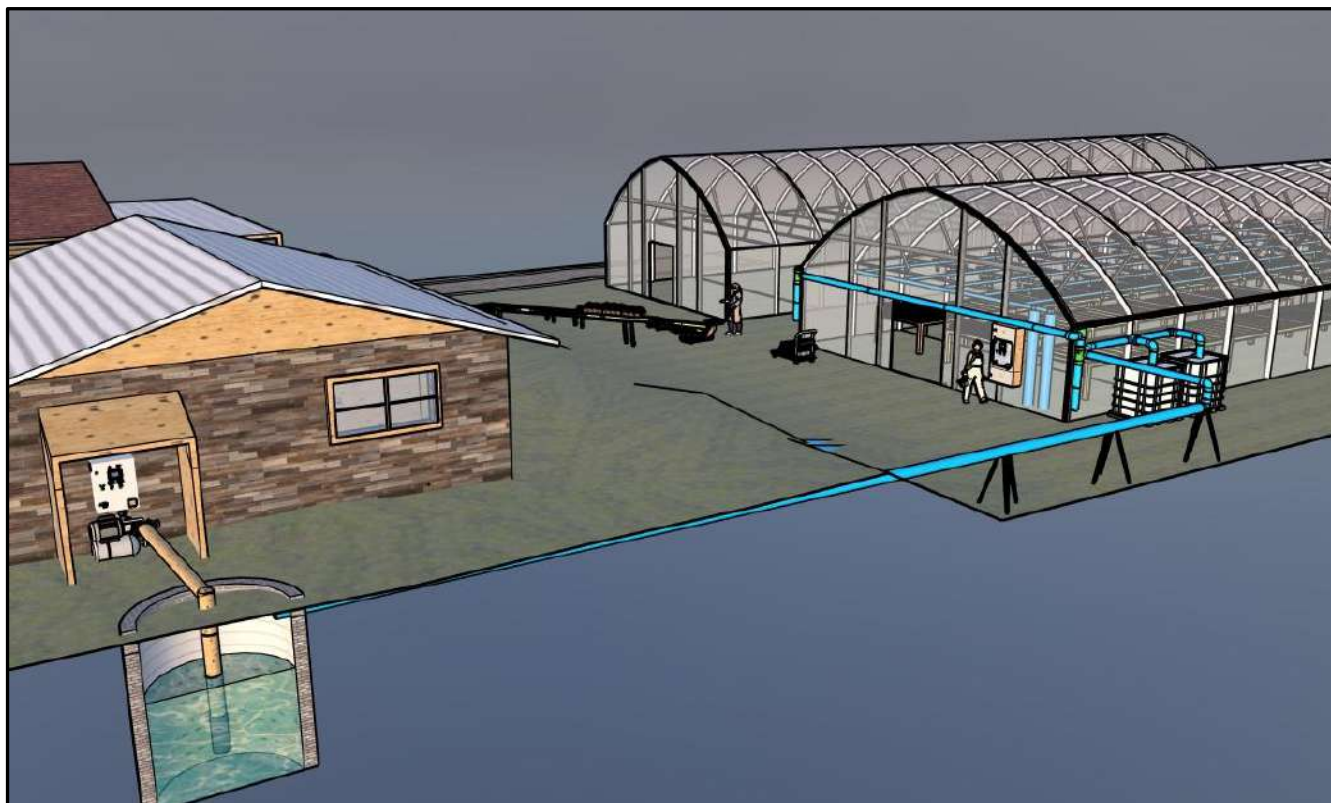
3. Si pudiera **sugerir un cambio para reducir el cansancio físico**, ¿qué propondría y por qué?

(Por ejemplo: “Que pavimenten el camino hacia la zona de endurecimiento”).

Anexo 3: Diagrama general de la propuesta



Anexo 4: Figuras del modelamiento 3D de la propuesta.





Anexo 5: Estimación aproximada preliminar de inversión.

Categoría	Componente	Unidad de medida/Cantidad referencial	Rango de precio aproximado en CLP
1. Sistema de transporte de materiales (automatización mecánica)			
Sistema de transporte de materiales	Cintas transportadoras motorizadas	2 unidades	3.200.000 - 4.400.000
Módulos de extensión o acople	Secciones complementarias de 6 [m] de longitud.	12 unidades	8.400.000 - 10.800.000
Controlador y sistema eléctrico básico	Tablero de mando, protecciones eléctricas, cableado y control de encendido.	1 sistema completo	370.000 - 730.000
Soportes y estructura de montaje	Soportes ajustables o fijaciones para adaptar la altura y alineación de los módulos.	24 unidades	Incluido en el precio de la cinta o entre 3.000.000 a 6.000.000
2. Sistema de riego inteligente sensorizado			
a) Sensores y control central			
Sensores capacitivos de humedad	modelo SEN0193 V2.0 o similar	15-30 unidades	140.000 - 340.000
Microcontrolador y computadora	Raspberry Pi Pico 2 Raspberry Pi 5	1 unidad	120.000 - 220.000
Chip reloj de tiempo real (Real-Time Clock)	Módulo RTC DS3231	1 unidad	2.500 - 5.000
Relés de estado sólido	SSR DC-AC 5A	1-2 por sector de riego	5.000 - 30.000
b) Actuadores y componentes hidráulicos			
Válvulas solenoides	Válvulas solenoides 24VCA	2 por sector de riego	150.000 - 250.000
Filtros de malla	1er y 2do filtro	2 unidades	100.000 - 200.000
Tuberías y conexiones	PVC diferentes calibres	1 lote completo	50.000 - 170.000
3. Sistema de Captación de Aguas Lluvias			
Canaletas y tuberías	PVC 110 [mm]	50-60 metros lineales	160.000 - 350.000

Bajantes con filtro primera lluvia	Diferentes calibres	4 - 6 unidades	40.000 - 100.000
Tanques adicionales	Estanques cisterna flexible (50.000 l)	1 unidad	3.000.000 - 5.000.000
Filtrado	Desviación de primer flujo, primer y segundo filtro	2 lotes	15.000 - 50.000
Desinfección	Cloración	Adecuado a la cantidad acumulada de agua	25.000 - 100.000
4. Plataforma IoT y Monitoreo			
Plataforma IoT	Código abierto	1 unidad	0
Raspberry Pi	Raspberry Pi 5	1 unidad	95.000 – 135.000
5. Infraestructura Eléctrica			
Tablero eléctrico principal	Tablero de Distribución General, Control y Automatización	1 unidad	400.000 - 600.000
Gabinete	Kit completo 100A	1 unidad	550.000 - 800.000
Total USD	22.000 - 32.000		Total CLP 19.500.000 - 30.000.000