



FACULTADA DE INGENIERIA ESCUELA DE  
INGENIERIA CIVIL INDUSTRIAL

**Evaluación de la Factibilidad Técnica-Económica para la  
Implementación de Sensores en la Producción de Tomates en  
Agrícola Aurora Limitada**

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de  
la Ingeniería y al Título de Ingeniero Civil Industrial

**Mariana Paola Ticona Marca**

**Prof. guía: Marcelo Cisternas Fruns**

**Junio, 2025.**

## **Agradecimientos**

*En primer lugar, agradezco profundamente a mis padres, Aurora y Hugo, por brindarme siempre todo lo necesario, sin que me faltara nada. Gracias por su apoyo incondicional a pesar de la distancia, por motivarme y confiar en mí, por darme libertad y, al mismo tiempo, sostenerme con amor. En momentos de angustia, escuchar sus voces diciéndome “¡tú puedes!” y “todo tiene solución” fue suficiente para darme fuerzas y continuar durante estos seis años de universidad.*

*A mi hermano Frank, gracias por tu apoyo constante, tu comprensión y por regalarme la alegría inmensa de ser tía de un sobrino maravilloso. También agradezco tu generosidad al compartir conmigo tus conocimientos y ayudarme en momentos clave de esta investigación.*

*Agradezco al universo por cruzar en mi camino a mi querida amiga Javiera, quien ha estado presente desde el primer año de carrera, acompañándome con su apoyo incondicional y una amistad tan sincera. Gracias por motivarme en los momentos difíciles, por levantarme el ánimo cuando lo necesité, y por enseñarme a confiar en mí, en mis habilidades y en mis conocimientos.*

*Agradezco a mis chicas super poderosas quienes fueron mi refugio y alegría en esta última etapa. Estoy infinitamente agradecida por su compañía, por cada plan sencillo, cada salida recreativa, cada entrenamiento. Gracias por su comprensión y cariño incondicional. Con ustedes, viña fue más bonito.*

*A mis amigos Danilo y Alan, gracias por su constante apoyo, por cada consejo, por su disposición y voluntad de ayudarme cada vez que lo necesité.*

*También agradezco la oportunidad de haber estado, cada noche, en compañía de mi gatito Ónix, quien llegó en el momento indicado. Gracias por acompañarme y no permitir que me volviera loca.*

*A mi profesor guía, gracias por su acompañamiento, sus observaciones constructivas y por guiarme con paciencia durante el desarrollo de este trabajo.*

## **Resumen ejecutivo**

En el presente proyecto de título se busca evaluar la factibilidad técnica y económica de implementar sensores agrícolas de bajo costo que permitan medir y recolectar datos sobre temperatura, humedad relativa y humedad del suelo en cultivos de tomates. El objetivo principal es mejorar la gestión del recurso hídrico y las condiciones ambientales dentro de los invernaderos, con el fin de obtener un mayor rendimiento en la producción. Para ello, la evaluación se centra en dos factores clave: el manejo agronómico y la eficiencia en el uso de recursos.

En primer lugar, el factor agronómico fue abordado mediante un diagnóstico de la situación actual de los cultivos, a partir del cual se identificaron deficiencias en el control de humedad y temperatura, así como la forma en que esta última impacta en la calidad de los frutos. Ambas variables afectan directamente la calidad de los productos y, en consecuencia, el rendimiento productivo.

En segundo lugar, se proyectó el impacto que tendría la implementación de sensores en la operación de la empresa, evaluando los beneficios asociados a una toma de decisiones más precisa, a la reducción de pérdidas y, finalmente, a la sostenibilidad de los procesos agrícolas. Para ello, se realizó un análisis técnico económico que permitió validar la viabilidad de incorporar este tipo de herramientas en el contexto productivo de Agrícola Aurora Ltda.

Palabras clave: Sensores agrícolas; riego por goteo; monitoreo en tiempo real; agricultura sostenible; automatización agrícola; Valle de Azapa; cultivo de tomates.

## Abstract

In this thesis project, the aim is to evaluate the technical and economic feasibility of implementing low-cost agricultural sensors capable of measuring and collecting data on temperature, relative humidity, and soil moisture in tomato crops. The main objective is to improve water resource management and environmental conditions inside greenhouses in order to achieve higher production yields. To that end, the evaluation focuses on two key factors: agronomic management and resource use efficiency.

First, the agronomic factor was addressed through a diagnosis of the current situation of the crops, which revealed deficiencies in the control of humidity and temperature, as well as how the latter impacts fruit quality. Both variables directly affect the quality of the products and, consequently, the productive yield.

Second, the potential impact of implementing sensors on the company's operations was projected, evaluating the benefits associated with more accurate decision-making, a reduction in losses, and, ultimately, the sustainability of agricultural processes. For this purpose, a technical and economic analysis was carried out to validate the feasibility of incorporating this type of technology within the productive context of Agrícola Aurora Ltda.

**Keywords:** agricultural sensors; drip irrigation; real-time monitoring; sustainable agriculture; agricultural automation; Azapa Valley; tomato cultivation.

## Índice:

Resumen ejecutivo.....	2
Introducción.....	10
Capítulo 1: Descripción de la organización.....	12
1.1 Historia: .....	12
1.2 Información General de la empresa: .....	12
1.3 Lugar de investigación:.....	13
1.4 Misión y visión:.....	13
1.4.1 Misión: .....	14
1.4.2 Visión: .....	14
1.7 Valores:.....	14
1.8 Estructura Organizacional: .....	15
Capítulo 2: Diagnóstico de la Situación Actual.....	18
2.1 Contexto Productivo y Comercial de agrícola Aurora Limitada .....	18
2.1.1. Principales Proveedores y Comisionistas .....	18
2.2 Desempeño Productivo y Comercial.....	19
2.2.1. Producción y Calidad del Tomate.....	19
2.2.2 Uso del Recurso Hídrico .....	24
Capítulo 3: Identificación del Problema.....	26
3.1 Análisis del Problema .....	26
3.2 Definición del Problema.....	29
Capítulo 4: Objetivos.....	30
4.1 Objetivo General.....	30
4.2 Objetivos Específicos .....	30
Capítulo 5: Marco Teórico.....	31
5.1 Agricultura de precisión: .....	31
5.2 Sensores Agrícolas: .....	32
5.2.4. Plataforma Arduino para sensores agrícolas. ....	34
5.2.5 Ejemplos de aplicaciones exitosas en el extranjero. ....	37
5.3.1 Riego tecnificado vs. riego inteligente.....	38
5.3.2 Impacto en la productividad y sostenibilidad.....	38
5.4 Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades (MIP) .....	39

6.1 Diagnóstico de la situación actual .....	40
6.2 Identificación de tecnologías disponibles.....	40
6.3 Diseño de solución técnica.....	41
6.4 Evaluación económica del proyecto.....	41
6.5 Síntesis y validación de resultados .....	41
Capítulo 7: Aplicación metodológica .....	42
7.1 Diagnóstico de la situación actual .....	42
7.1.1 Recopilación de información documental .....	42
7.1.2 Observación directa en el campo.....	43
7.1.3 Entrevistas semiestructuradas al personal .....	44
7.2 Identificación de tecnologías disponibles.....	44
7.2.1 Contexto agrícola y criterios de idoneidad .....	45
7.2.2 Presentación de las tecnologías disponibles.....	45
7.3 Diseño de solución técnica.....	48
7.3.1 Descripción general del sistema .....	48
7.3.2 Materiales y componentes utilizados.....	48
7.3.3 Montaje de los sensores.....	49
7.4 Evaluación económica del proyecto.....	56
7.4.1 Objetivo de la evaluación .....	56
7.4.2 Inversión inicial del sistema .....	56
7.4.3 Costo de mantenimiento Productivo del sistema de sensores.....	59
7.5 Síntesis y validación de resultados .....	61
Capítulo 8: Conclusiones.....	67
8.1 Resultados .....	67
8.2 Recomendaciones .....	69
Anexos:.....	74

## Índice Figuras

Figura 1: Estructura Organizacional de agrícola Aurora Ltda.....	15
Figura 2: Ingresos por nave productiva 1, Temporada 2023 v/s 2024.....	20
Figura 3: Ingresos por nave productiva 2, Temporada 2023 v/s 2024.....	21
Figura 4: Ventas anuales brutas de Agrícola Aurora Ltda .....	22
Figura 5: Porcentaje de tomates seleccionados por calibre Nave 1.....	23
Figura 6: Porcentaje de tomates seleccionados por calibre Nave 2.....	24
Figura 8: Diagrama Causa-Efecto (Ishikawa), Deficiencia en la productividad de tomates en agrícola aurora limitada. ....	27
Figura 9: Sensor DHT11.....	35
Figura 10: Sensor DHT22.....	35
Figura 11: Sensor FC-28.....	36
Figura 12: Arduino.....	37
Figura 13: Montaje conexión del sensor DHT11 .....	49
Figura 14: Conexión sistema de sensores con ordenador.....	50
Figura 15: Programación del sensor DHT11 .....	50
Figura 16: Inicio de mediciones del sensor DHT11 .....	51
Figura 17: Mediciones de temperatura del sensor DHT11 .....	51
Figura 18: Conexión de sensor FC-28.....	52
Figura 19: Conexión de sensor FC-28 al ordenador. ....	52
Figura 20: Programación del sensor FC-28.....	53
Figura 21: Inicio de mediciones de humedad. ....	54
Figura 22: Sensor FC-28 sumergido en la tierra.....	54
Figura 23: Mediciones de humedad sensor FC-28. ....	55
Figura 24: Mediciones de humedad sensor FC-28. ....	55
Figura 25: Flujo de caja proyectado. ....	60
Figura 26: situación actual v/s situación proyectada con sensores en agrícola aurora Ltda. 61	
Figura 27: Producción en kilogramos.....	61
Figura 28: Producción, situación actual. ....	62
Figura 29: Aumento en la producción con sensores. ....	62
Figura 30: Kilogramos Producidos en terreno.....	63
Figura 31: Reducción de pérdidas respecto a las mermas. ....	63

Figura 32: Análisis de beneficio respecto al aumento de la producción .....	64
Figura 33: Análisis de beneficio respecto al aumento de la producción. ....	65
Figura 34: Ahorro hídrico m3. ....	65
Figura 35: Consumo hídrico proyectado. ....	66

## Índice tablas:

Tabla 1: Metodología de los 5 ¿Por qué? Aplicado a la producción de tomate.....	28
Tabla 2: Tabla comparativa de sensores Arduino con comerciales. ....	47
Tabla 3: Materiales Utilizados para el sistema de sensores.....	48
Tabla 4: Costos asociados a los materiales del sistema, nave 1.....	56
Tabla 5: Asignación de HH en las etapas del sistema, nave 1. ....	57
Tabla 6: Costos asociados a los materiales del sistema, nave 2.....	58
Tabla 7: Asignación de HH en las etapas del sistema, nave 2. ....	58
Tabla7: costo de mantenimiento. ....	59

## Índice Anexos:

Anexo 1: Desempeño productivo nave 1.....	74
Anexo 2: Desempeño productivo nave 2.....	74
Anexo 3: Datos sobre la superficie cultivada y plantas por nave. ....	75
Anexo 4: Datos de gamelas cosechadas en terreno y gamelas procesadas .....	75
Anexo 5: Desempeño económico de agrícola aurora Ltda. ....	76
Anexo 6: Desempeño productivo del año 2023 respecto a la nave 1.....	76
Anexo 8: Cotización de sensor Teros 12 .....	77
Anexo 9: Precio del sensor Drill & Drope .....	78
Anexo 10: Registro del consumo hídrico de la parcela, 2024. ....	79

## Introducción

En los últimos años, la optimización de los recursos ha sido de gran importancia en el sector agrícola. Con la implementación de tecnologías de precisión, esta práctica se ha convertido en una prioridad para mejorar la eficiencia productiva y reducir el impacto ambiental. El uso eficaz de recursos como fertilizantes, agua y energía es esencial para garantizar una producción agrícola sostenible en un entorno donde la demanda de alimentos está en constante crecimiento. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la demanda de alimentos podría aumentar en un 60% para 2025, lo que exige una mayor eficiencia en el uso de los recursos agrícolas.

Sin embargo, a nivel mundial, uno de los recursos más indispensables para la vida y la producción agrícola es el agua, se estima que alrededor del 70% del agua extraída que se ocupa en la agricultura es agua dulce y es por ello que se enfatiza en la importancia de gestionar bien este recurso de manera más responsable y consciente. Por otro lado, el consumo de agua se ha visto limitado en muchas regiones del país, y la región de Arica y Parinacota no es la excepción puesto que posee un clima árido y baja disponibilidad de fuentes hídricas. Es por ello que los agricultores de la zona han enfrentado dificultades para asegurar el acceso de agua a sus cultivos.

En este contexto, la incorporación de tecnologías avanzadas, como los sensores agrícolas, presenta una alternativa viable para abordar las limitaciones de producción asociadas a la falta de monitoreo en tiempo real. Este estudio se centra en la gestión operativa de Agrícola Aurora Ltda., empresa dedicada a la producción de tomate en la región de Arica y Parinacota. A pesar de su experiencia en el rubro agrícola y de contar con un sistema de riego por goteo instalado, la empresa enfrenta dificultades operativas derivadas del monitoreo manual y visual de variables agronómicas clave, como la humedad del suelo y las condiciones climáticas. La falta de mediciones objetivas obliga a tomar decisiones basadas en la percepción de los trabajadores, lo que genera ineficiencia en el uso de los recursos hídricos y reduce la capacidad para anticipar condiciones adversas que podrían afectar la productividad y la calidad de los cultivos.

Este estudio busca evaluar la factibilidad técnica y económica de implementar un sistema de sensores agrícolas en Agrícola Aurora Ltda., con el fin de monitorear en tiempo real la humedad del suelo y las condiciones climáticas relevantes para el cultivo de tomate. La implementación de esta tecnología busca mejorar la toma de decisiones agronómicas, optimizar el uso de los recursos hídricos y prevenir pérdidas asociadas con riego ineficiente o condiciones ambientales adversas. Para ello se evaluarán los costos de inversión, operación y mantenimiento de los sensores, con el fin de determinar su viabilidad financiera en el contexto productivo de la empresa.

# Capítulo 1: Descripción de la organización

## 1.1 Historia:

Agrícola Aurora Ltda. fue legalmente constituida en el año 2023, manteniendo el nombre con el que fue originalmente establecida. Sin embargo, sus fundadores, Aurora Marca Rivera y Hugo Ticona Rivera cuentan con más de 20 años de experiencia en el rubro agrícola, quienes se han adaptado constantemente a los cambios y a la evolución que ha tenido el sector agrícola, incorporando nuevas técnicas.

Es importante señalar que Agrícola Aurora Ltda. tiene presencia en Chile, específicamente en el Valle de Azapa, ubicado en la región de Arica y Parinacota. A lo largo de los años, la empresa ha expandido su capacidad de producción, adquiriendo su propia parcela y arrendando terrenos en dos ubicaciones distintas para incrementar la producción de tomates.

La parcela propia fue adquirida en 2011 y cuenta con una superficie de 4 hectáreas, la cual está ubicada en el kilómetro 17 del Valle de Azapa, estableciéndose como la sede principal de la empresa. Durante la temporada del año 2017, se construyó un packing permitiendo a la empresa llevar a cabo varios procesos, ya sea desde la selección, limpieza, clasificación según el calibre de los tomates, calidad y empaquetamiento para su posterior traslado y venta comercial.

## 1.2 Información General de la empresa:

- Razón social: agrícola Aurora Limitada
- Rut: 77.579.859-9
- Dirección: Valle de Azapa, Parcela La Tara, km17.
- La sucursal principal cuenta con las siguientes superficies:

Una superficie de **4 hectáreas**, donde opera 2 invernaderos bajo malla anti-áfido, distribuidos de la siguiente manera:

- **Nave 1:**  $\frac{3}{4}$  hectárea.

- **Nave 2:** 2 hectáreas.

Segunda Sucursal con superficie de 2 hectáreas

- **Nave 1-2:**  $\frac{3}{4}$  hectárea
- **Nave 3:** 1 hectárea

Tercera Sucursal con superficie de 2 hectáreas

- **Nave 1:** 1 hectárea
- **Nave 3:**  $\frac{1}{2}$  hectárea

Agrícola Aurora Ltda. mantiene relaciones estables y duraderas con sus proveedores, clientes locales y comisionistas que se dedican a vender los productos en la región metropolitana, lo cual ha sido clave para el crecimiento y desarrollo de la empresa. Esta unión entre las alianzas comerciales ha permitido optimizar sus procesos año tras año, beneficiando a ambas partes y fortaleciendo su posicionamiento en el sector agrícola.

### **1.3 Lugar de investigación:**

El desarrollo de este proyecto se llevará a cabo en Agrícola Aurora Ltda., centrándose exclusivamente en la sucursal principal, ubicada en el kilómetro 17 del Valle de Azapa. Esta sede será el foco de la investigación, permitiendo un análisis detallado de sus procesos y operaciones.

### **1.4 Misión y visión:**

El sector Agrícola en Chile es un pilar fundamental para el desarrollo económico y social, especialmente en la región de Arica y Parinacota, donde el clima y las condiciones del suelo favorecen el cultivo de hortalizas. Agrícola Aurora Ltda. desempeña un rol clave en este sector, enfocándose en la producción y comercialización de tomates frescos para el mercado nacional mediante la incorporación de mejoras en sus procesos, la empresa busca progresar cada año respecto a términos como: eficiencia, sostenibilidad y calidad de sus productos, asegurando su competitividad en el mercado. Del mismo modo, se compromete con el desarrollo sustentable de la agricultura (Agrícola Aurora Ltda., 2024). A continuación, se presenta la misión y visión de la empresa:

### **1.4.1 Misión:**

La misión de la empresa es producir y comercializar tomates de alta calidad, utilizando prácticas agrícolas sostenibles para garantizar frescura, sabor y seguridad alimentaria a nuestros clientes. Nos comprometemos con el desarrollo del sector agrícola, generando empleo y aportando al crecimiento económico de la región de Arica y Parinacota (Agrícola Aurora Ltda., 2024).

### **1.4.2 Visión:**

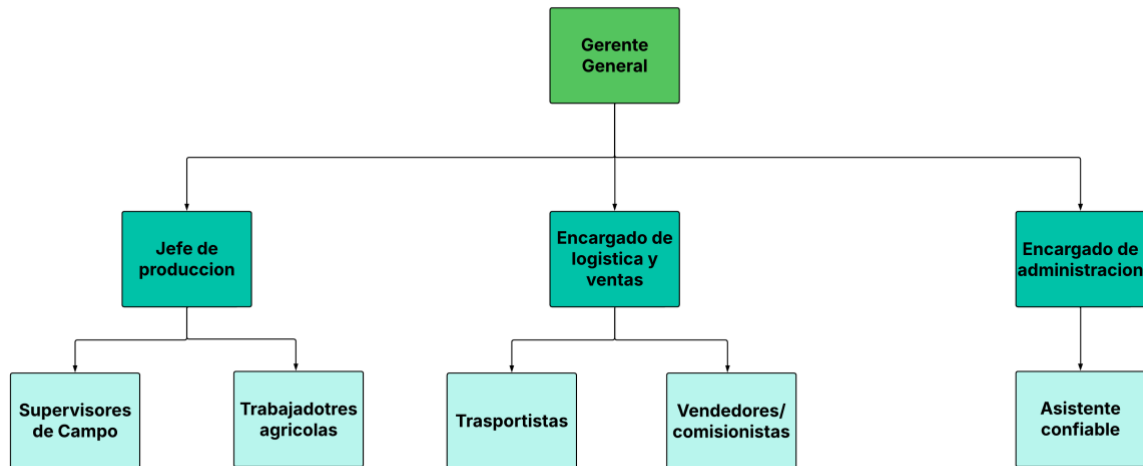
Aspiramos a ser reconocidos a nivel local y nacional como un referente en la producción y comercialización de tomates de alta calidad, reconocida por su compromiso con la sustentabilidad, ampliando nuestra presencia hacia supermercados y mercados especializados. Pretendemos integrar soluciones innovadoras en la agricultura que permitan maximizar la productividad, reducir el impacto ambiental y fortalecer la competitividad de nuestros productos en el mercado (Agrícola Aurora Ltda., 2024).

### **1.7 Valores:**

- **Innovación:** Estamos comprometidos con la mejora continua y la integración de tecnologías y mejores prácticas agrícolas para optimizar nuestros procesos y garantizar productos de calidad (Agrícola Aurora Ltda., 2024).
- **Sostenibilidad:** Estamos comprometidos con la gestión eficiente de los recursos naturales, fomentamos el uso responsable del agua y reducimos el impacto ambiental de nuestras operaciones (Agrícola Aurora Ltda., 2024).
- **Calidad:** Mantenemos altos estándares en todas las etapas de producción para garantizar que se vendan tomates frescos y nutritivos en condiciones ideales (Agrícola Aurora Ltda., 2024).
- **Compromiso:** Valoramos el compromiso y la dedicación de nuestro equipo y promovemos un ambiente de trabajo colaborativo que fomente el desarrollo de nuestros colaboradores y de la empresa (Agrícola Aurora Ltda., 2024).
- **Responsabilidad:** Actuamos de forma ética y transparente, respetando los estándares agrícolas y comerciales, garantizando la seguridad y confianza de nuestros clientes y consumidores (Agrícola Aurora Ltda., 2024).

## 1.8 Estructura Organizacional:

*Figura 1: Estructura Organizacional de agrícola Aurora Ltda.*



*Fuente: Elaboración propia a partir de entrevistas y documentación interna de la empresa.*

El detalle de las funciones de los distintos departamentos se detalla a continuación.

- **Gerente General**

Responsable de la dirección estratégica y decisiones importantes dentro de la empresa. Su función es definir los objetivos y las estrategias de crecimiento de la empresa, supervisar el desempeño en todas las áreas, mantener las relaciones con los clientes y proveedores y evaluar las inversiones en tecnología e infraestructura.

- **Jefe de Producción (Encargado del cultivo y cosecha)**

Gestiona la producción agrícola y asegura la eficiencia y calidad de la cosecha. Su tarea es planificar el ciclo de producción de acuerdo con las condiciones climáticas y del mercado, monitorear la implementación de técnicas agrícolas modernas (riego tecnificado, manejo integrado de plagas), coordinar la optimización de la siembra y la cosecha con los supervisores de campo y monitorear el uso eficiente de insumos como fertilizantes, semillas y pesticidas.

- **Supervisores de Campo (Coordinan las labores agrícolas)**

Supervisar las actividades diarias en los campos. Asignar tareas a los trabajadores agrícolas, monitorear el crecimiento de las plantas y detectar problemas de plagas, garantizar el cumplimiento de los protocolos de seguridad y calidad, y administrar la distribución de herramientas y recursos en el campo.

- **Trabajadores Agrícolas (Siembra, cosecha, mantenimiento)**

Realizar tareas de producción importantes en el sitio. Como preparar el suelo y sembrar cultivos, realizar riego, poda, fertilización y control de plagas, participar en la cosecha y selección de productos, y mantener y limpiar las áreas de producción.

- **Encargado de Logística y Ventas (Distribución y comercialización)**

Responsable de la distribución efectiva de productos y la estrategia de ventas. Su función coordinar el almacenamiento y transporte de productos agrícolas, planificar canales de distribución a los mercados locales y nacionales, monitorear la gestión de ventas y precios, e identificar oportunidades de negocios y nuevas alianzas estratégicas.

- **Conductores y Transportistas (Traslado del producto)**

Responsable del transporte seguro y eficiente de productos. Su rol es cargar y transportar mercancías a los puntos de venta o distribución, asegurando que los productos lleguen en óptimas condiciones y realizar el mantenimiento básico del vehículo.

- **Vendedores o Comisionistas (Negociación y ventas)**

Intermediarios en la comercialización de productos agrícolas. Su papel principal es negociar precios, términos con compradores y distribuidores, ampliar su base de clientes y mercado.

- **Encargado de Administración (Gestión financiera y documentación)**

Gestiona las operaciones financieras y administrativas de la empresa. controlar los ingresos y gastos del negocio, administrar documentos legales y licencias agrícolas, coordinar los pagos a proveedores, empleados y supervisa la contabilidad y la gestión de costos.

- **Asistente Contable (Facturación y registros financieros)**

Apoya a la administración en la gestión contable. Registra transacciones financieras y emite facturas, administra cuentas por pagar y por cobrar, prepara informes contables y financieros, ayuda con las auditorías y garantiza el cumplimiento fiscal.

## **Capítulo 2: Diagnóstico de la Situación Actual**

### **2.1 Contexto Productivo y Comercial de agrícola Aurora Limitada**

Para el desarrollo del presente análisis, se realizaron observaciones de los registros productivos, entrevistas con el jefe de producción y trabajadores agrícolas. Gracias a los datos y materiales brindados por la empresa esto permitió identificar patrones relevantes en la producción total en terreno, volumen de la producción vendida, las pérdidas productivas y manejo actual del recurso hídrico.

#### **2.1.1. Principales Proveedores y Comisionistas**

Agrícola Aurora Limitada mantiene relaciones comerciales estables con varios proveedores que abastecen insumos para su operación, como fertilizantes, semillas, pesticidas, materiales agrícolas y servicios logísticos. Estas alianzas han permitido asegurar la continuidad operativa y una mejora constante en la calidad del producto. A continuación, se presentan los proveedores más relevantes:

- Europlant
- Naumasur S.R.L
- Marcos Godoy SPA
- Aranibar SPA
- Sociedad Comercial Mi Bodega
- Sociedad Combustible Jerry
- Agroinsumos Adela SPA
- Temiterra Limitada
- Plantinera Aconcagua Limache
- Sociedad Comercial Marbella Limitada

Como se nombró anteriormente Agrícola Aurora Limitada se dedica a la producción de tomates en el kilómetro 17 del valle de Azapa, Región de Arica y Parinacota. Sin embargo, la empresa ha cultivado diversos productos a lo largo de su trayectoria y, debido a ello, ha decidido especializarse en la producción de tomates por motivos de un buen manejo agronómico y a la rentabilidad favorable que brinda el cultivo ya que representa la principal fuente de ingresos para la empresa. Las instalaciones principales corresponden a dos naves productivas:

- Nave 1: superficie de 0,75 hectáreas, con 16.200 plantas.
- Nave 2: superficie de 2 hectáreas, con 36.450 plantas.

Sin embargo, estas y otras producciones anteriores han tenido que lidiar constantemente con hongos, virus y bacterias que atacan a las plantas de tomate. Si bien el clima de la región Arica ofrece condiciones favorables para la horticultura, como: alta radiación solar, baja humedad relativa y bajas precipitaciones, estas características pueden favorecer la propagación de insectos vectores, como mosca blanca y TRIPS, responsables de la transmisión de virus fitopatógenos, como el *Tomato yellow leaf curl virus* y el *Tomato wild sprout virus*, respectivamente (INIA, 2020; FAO, 2019).

El manejo actual de protección de cultivos en Agrícola Aurora Limitada incluye prácticas convencionales como el uso de mosquiteros y trampas adhesivas cromáticas para monitorear insectos voladores, entre ellos TRIPS, moscas blancas y minadores de hojas. Además, se han utilizado trampas de feromonas para capturar selectivamente machos de ciertas especies para monitorear las tendencias poblacionales y anticipar posibles brotes. Si bien estas herramientas son útiles, presentan limitaciones en la detección temprana de condiciones ambientales que favorecen el desarrollo de enfermedades fúngicas, bacterianas o virales.

## **2.2 Desempeño Productivo y Comercial**

### **2.2.1. Producción y Calidad del Tomate**

Durante la última temporada (2024), se registraron los siguientes volúmenes de producción:

- Nave 1: 5.751 gamelas de tomates seleccionados → 103.518 kg

- Nave 2: 12.278 gamelas de tomates seleccionados → 221.004 kg

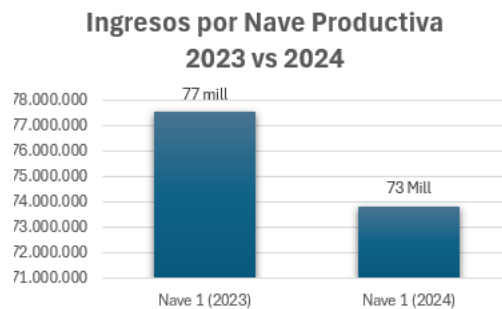
Cada gamela que es comercializada tiene un peso promedio de 18 kg lo cual permite estandarizar la medición del rendimiento productivo por nave.

Al relacionar estos resultados con los obtenidos en la temporada 2023, se visualiza una disminución del rendimiento productivo:

- Nave 1: 6.008 gamelas de tomates seleccionados → 108.144 kg
- Nave 2: 12.904 gamelas de tomates seleccionados → 232.272 kg

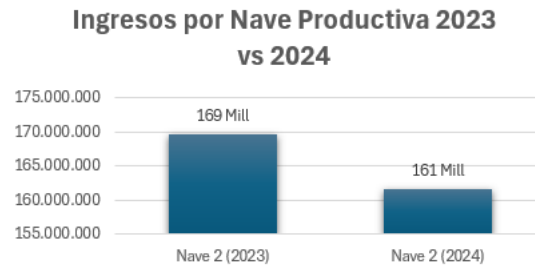
En términos porcentuales, esta disminución corresponde a un 4,3% en la Nave 1 y del 4,8% en la nave 2. Esto representa una disminución promedio del 5% en la producción anual de tomates seleccionados. Por lo tanto, este descenso repercute directamente en el rendimiento de las unidades de producción individuales y refleja una menor eficiencia del proceso de producción.

**Figura 1:** Ingresos por nave productiva 1, Temporada 2023 v/s 2024.



**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos entregados por la empresa.

**Figura 3:** Ingresos por nave productiva 2, Temporada 2023 v/s 2024.



**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos entregados por la empresa.

Los tomates seleccionados representan el producto comercial que genera ingresos directos. Sin embargo, también es importante considerar la cantidad de tomates procesados que no cumple con los estándares de calidad; Estos se consideran como merma.

En la Nave 1 se recolectaron del campo 6.357 gamelas, de las cuales solo 5.751 cumplieron con los estándares de calidad luego del proceso de selección y clasificación. Esto corresponde a una diferencia de 606 gamelas.

En la Nave 2, de mayor producción, se recolectaron del campo 14.461 gamelas. Sin embargo, después del proceso de selección y clasificación, sólo 12.278 cumplieron los requisitos de calidad. Esto supuso una pérdida en merma de 2.183 gamelas. Las mermas de ambas naves productivas corresponden a un 13,4 % de la producción total.

Estas pérdidas no solo representan un impacto económico significativo, sino que también ponen de manifiesto una limitación estructural en la gestión agronómica, derivada de la falta de herramientas tecnológicas que permitan anticipar condiciones críticas. Muchas de estas frutas podrían haberse vendido si se hubiera contado con un sistema de monitoreo en tiempo real que ajustara el riego a tiempo y alertara sobre condiciones ambientales propicias para el desarrollo de plagas o enfermedades. Esta situación afecta tanto a la calidad como la cantidad de producción, ya que los daños pueden comprometer tomates de todos los tamaños, incluidos los de calidad superior y mayor valor comercial.

Retomando el análisis de las pérdidas, para la Nave 1, la pérdida de 606 gamelas equivale a un valor estimado de \$7.914.274 considerando el valor por kg de tomate en \$726 CLP.

En el caso de la Nave 2, la pérdida de 2.183 gamelas representa una pérdida de aproximadamente \$28.527.444.

**Figura 2:** *Ventas anuales brutas de Agrícola Aurora Ltda.*

Historial de ingresos, últimos 5 años.		
AÑO	BRUTO	NETO
2020	\$469.115.620	\$376.854.950
2021	\$578.928.660	\$475.234.230
2022	\$446.773.750	\$336.632.550
2023	\$456.919.650	\$352.394.200
2024	\$554.936.370	\$463.012.660

**Fuente:** *Agrícola Aurora Ltda., archivo interno (2024).*

La Figura 4 representa el desempeño de los ingresos de la empresa durante los últimos cinco años, evidenciando su evolución económica y su aporte al desarrollo del sector agrícola nacional a través de su actividad productiva y comercial.

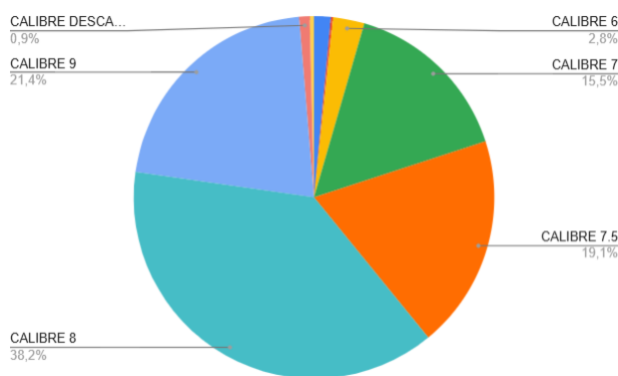
En la industria hortícola, el calibre del tomate es una variable clave que incide directamente en su valorización comercial. En este contexto, se clasifican como calibres de primera calidad aquellos tomates con diámetros correspondientes a los calibres 9, 8 y 7.5, los cuales presentan un tamaño óptimo, forma regular y excelente apariencia. Estos calibres son los más demandados por los mercados, como supermercados y ferias mayoristas, ya que son ideales para su venta directa al consumidor final, razón por la cual tienen un valor de mercado superior.

Por otro lado, los calibres 7 y 6 son considerados de tercera categoría, ya que corresponden a tomates de menor tamaño y a pesar de que no cumplan con los estándares estéticos de los calibres superiores, conservan sus propiedades nutricionales. Por ende, estos tomates poseen un valor comercial menor.

De acuerdo con los resultados obtenidos durante la temporada 2024, se observa que en la Nave 1 con  $\frac{3}{4}$  de hectárea de superficie, los tomates de primera calidad con calibres 9, 8 y 7.5 representan un 78,7% del total de tomates seleccionados para la venta. Asimismo, en la Nave 2 con 2 hectáreas de superficie, la proporción de tomates de estos calibres asciende a un 83,6%, lo que indica una mayor concentración de frutos comerciales de alto valor. Estos datos refuerzan la importancia de continuar optimizando las condiciones de cultivo, ya que existen diversos estudios como el de Zubelzu et al. (2024), titulado *Smart irrigation for management of processing tomato: a machine learning approach*, en tomates que demuestran que mediante la implementación de un sistema de monitoreo de sensores de humedad de suelo puede mejorar no solo la eficiencia del agua si no, también aumentar el rendimiento de los frutos comerciales, ya que se evitan episodios de estrés hídrico que puedan afectar al tamaño y forma del tomate.

Durante la temporada 2024, la Nave 1 tuvo un período de cosecha entre el 21 de agosto y el 23 de noviembre, abarcando un total de tres meses. En este tiempo, se llevaron a cabo múltiples ciclos de recolección del tomate, lo que permitió registrar una producción representativa para el análisis respecto a los tipos de calibres.

**Figura 5:** Porcentaje de tomates seleccionados por calibre Nave 1.

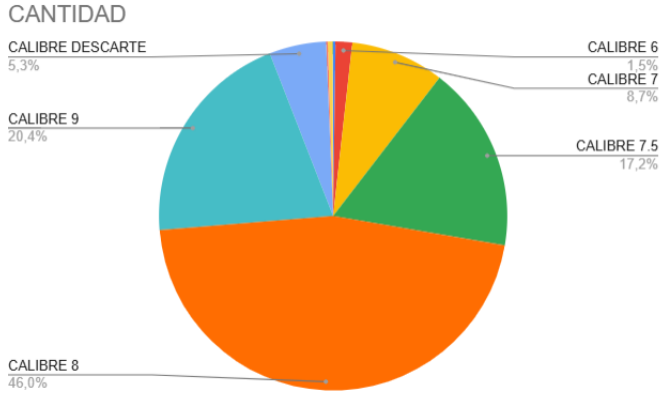


**Fuente:** Agrícola Aurora Ltda., archivo interno (2024).

Por su parte, la Nave 2 inició su temporada de cosecha antes, el 30 de junio, y finalizó el 27 de noviembre de 2024, lo que equivale a un período de cosecha de aproximadamente cuatro meses. Esta extensión en el calendario de recolección permitió alcanzar un mayor

volumen de producción total, acorde a la superficie cultivada y la densidad de plantas establecida.

**Figura 3:** *Porcentaje de tomates seleccionados por calibre Nave 2*



**Fuente:** *Agrícola Aurora Ltda., archivo interno (2024).*

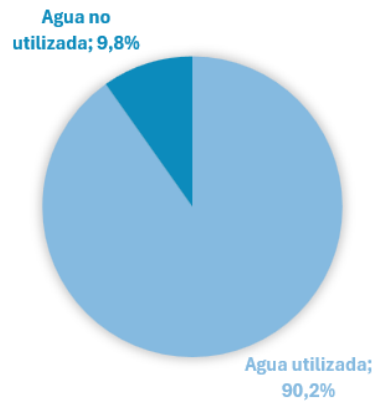
Existe una distribución de calibres que muestra un buen desempeño, sin embargo, es posible seguir perfeccionando la proporción de calibres altos con la incorporación de tecnologías de monitoreo en tiempo real.

### 2.2.2 Uso del Recurso Hídrico

Según el informe hídrico FO-1501-419, la demanda total de agua para el terreno es de 35.552 m<sup>3</sup> anuales, mientras que la disponibilidad hídrica legal y técnica haciende a 39.420 m<sup>3</sup>/año, lo que genera un balance hídrico positivo para la empresa de 3.867 m<sup>3</sup>/año. Esto indica que, desde el punto de vista de derechos y disponibilidad, la empresa cuenta con suficiente recurso para cubrir las necesidades del cultivo, en la figura 7 muestra el porcentaje de agua que fue durante la temporada 2024.

**Figura 7:** Demanda hídrica anual, periodo 2024.

**CONSUMO DE AGUA DISPONIBLE(M3)**



**Fuente:** Elaboración propia con datos de Agrícola Aurora Ltda.

En la actualidad, el sistema de riego corresponde a un sistema tecnificado por goteo, se alimenta desde un pozo mediante bombeo, filtrado y sistema de fertirriego. Sin embargo, a pesar de contar con una infraestructura moderna, la programación y decisión del riego es realizada de forma manual por los trabajadores, basándose en la observación del suelo y la experiencia, sin uso de sensores de humedad u otras herramientas de medición.

## **Capítulo 3: Identificación del Problema**

Agrícola Aurora Ltda. enfrenta dificultades para alcanzar su máximo potencial productivo en el cultivo de tomates, debido a la ausencia de tecnologías de monitoreo en tiempo real. Si bien la empresa utiliza un sistema tecnificado por goteo y prácticas agronómicas convencionales, actualmente no cuenta con sensores que permitan medir variables críticas como la humedad del suelo o la temperatura ambiental de manera continua y precisa. Esta limitación obliga a tomar decisiones basadas en métodos arbitrarios y observaciones visuales, tanto para el riego como para la detección de plagas o enfermedades.

Durante la temporada 2024, estas condiciones contribuyeron a un rendimiento subóptimo en la producción total, estimado en 324.522 kg de tomates seleccionados. Estudios y experiencias similares indican que, con herramientas tecnológicas adecuadas, ese volumen podría aumentar significativamente. El presente estudio plantea como objetivo principal la evaluación del aumento de productividad que se podría lograr mediante el uso de sensores agrícolas. La falta de monitoreo genera decisiones reactivas, impidiendo optimizar el uso de recursos y limitar los factores ambientales que afectan el crecimiento del cultivo.

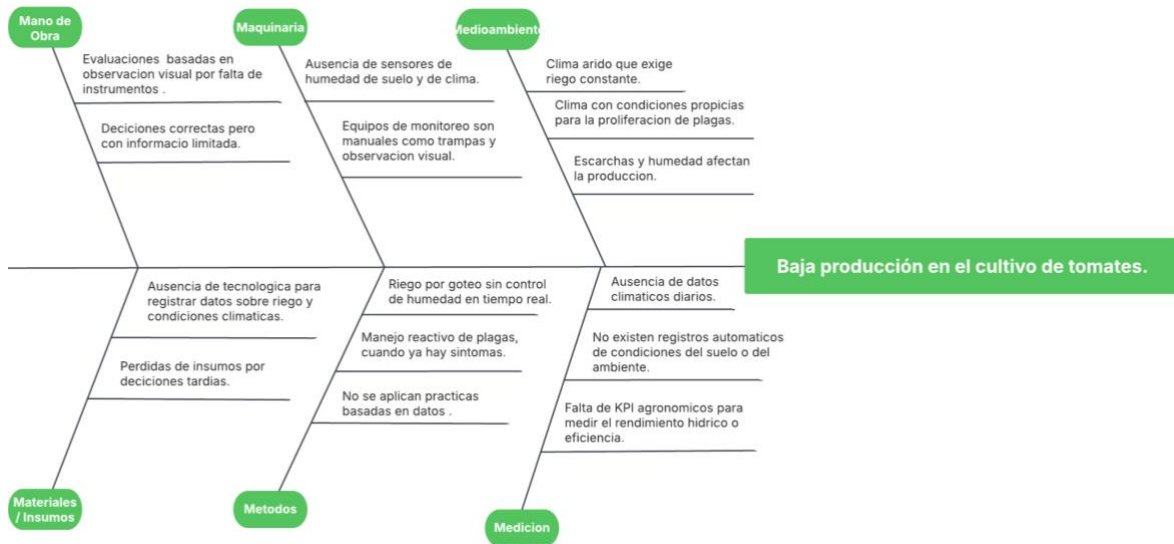
Esta debilidad tecnológica compromete la eficiencia productiva, incrementa los costos operacionales y limita la competitividad de la empresa frente a las crecientes exigencias del rubro agrícola.

### **3.1 Análisis del Problema**

Para comprender en detalle el problema identificado, se realizó un análisis causa y efecto para identificar las causas de la situación actual. El principal problema identificado es la limitada producción de tomate, ocasionada por la falta de tecnología de monitoreo en tiempo real que permita una gestión eficiente del riego y las condiciones ambientales al interior del invernadero. Este problema se puede dividir en múltiples causas y consecuencias que se presentan a continuación: Para comprender a mayor profundidad la raíz del problema identificado, se aplicaron diversas metodologías de análisis, entre ellas el diagrama de Ishikawa y la técnica de los 5 “¿Por qué?”. A continuación, se detalla la aplicación de estas herramientas en el contexto del estudio.

La Figura 9 muestra el diagrama de Ishikawa, el cual permite visualizar el problema central: la productividad limitada en el cultivo de tomates debido a la ausencia de tecnologías de medición en tiempo real para el control del riego y de las condiciones ambientales; junto con sus principales causas y los efectos que esto genera sobre las operaciones de la empresa.

**Figura 4:** Diagrama Causa-Efecto (Ishikawa), Deficiencia en la productividad de tomates en agrícola aurora limitada.



**Fuente:** Elaboración propia a partir de lo investigado en la empresa. (2025).

Por otro lado, se utilizó la técnica de los 5 “¿Por qué?” para facilitar la identificación de las causas fundamentales del problema. Los resultados de este análisis se presentan en la tabla 1.

**Tabla 1:** Metodología de los 5 ¿Por qué? Aplicado a la producción de tomate.

<p>1. ¿Por qué no se alcanza el máximo rendimiento productivo?</p>	<p>Porque los cultivos son afectados por condiciones ambientales desfavorables (como humedad excesiva o escarchas) y por la aparición de hongos y polillas que reducen la calidad y cantidad del tomate comercializable.</p>
<p>2. ¿Por qué no se controlan adecuadamente estas condiciones ambientales y fitosanitarias?</p>	<p>Porque el monitoreo de variables como la humedad del suelo y el clima se realiza de forma manual, basado en observaciones visuales y experiencia arbitraria del encargado. Por ejemplo, se aprieta un puñado de tierra o se observa el color de las hojas para estimar el estrés hídrico.</p>
<p>3. ¿Por qué se utiliza un monitoreo arbitrario y no un sistema basado en datos?</p>	<p>Porque la empresa no dispone de sensores ni sistemas tecnológicos que permitan registrar datos ambientales y de suelo en tiempo real para anticiparse a condiciones críticas.</p>
<p>4. ¿Por qué la empresa no cuenta con sensores agrícolas u otras tecnologías?</p>	<p>Porque no se ha realizado una evaluación técnico-económica que fundamente su implementación y demuestre sus beneficios en el contexto productivo de la empresa.</p>
<p>5. ¿Por qué no se implementaron sensores ni automatización?</p>	<p>Esto se debe, en parte, a la resistencia al cambio y a la confianza que el productor mantiene respecto a los métodos tradicionales, los cuales, hasta ahora, les han permitido alcanzar una producción estable.</p>

**Fuente:** Elaboración propia a partir de entrevistas con responsables de producción.

Este análisis muestra que la causa del problema no es sólo operativa, sino también estratégica, ya que no se han considerado formalmente inversiones en tecnologías capaces de incrementar la eficiencia del sistema productivo.

### **3.2 Definición del Problema**

Agrícola Aurora Limitada presenta un rendimiento productivo limitado en el cultivo de tomates, debido a prácticas agronómicas basadas en observaciones arbitrarias, como el riego manual y la detección visual de plagas. Esta forma de operar ha derivado en un uso ineficiente del recurso hídrico y en respuestas tardías frente a enfermedades, especialmente en condiciones ambientales adversas.

Durante la temporada 2024, esta situación generó mermas equivalentes al 13,4% de la producción total. Sin embargo, más allá de las pérdidas, el problema central se encuentra en la ausencia de monitoreo agronómico en tiempo real, que impide gestionar de forma oportuna y precisa las variables clave del cultivo.

## **Capítulo 4: Objetivos**

### **4.1 Objetivo General**

- Evaluar la factibilidad técnica-económica de implementar sensores agrícolas en los cultivos de tomate de Agrícola Aurora Limitada con el fin de aumentar la producción mediante un manejo más eficiente del riego y el monitoreo climático en tiempo real.

### **4.2 Objetivos Específicos**

- Identificar las principales deficiencias en la gestión actual del riego y monitoreo ambiental que inciden en el rendimiento productivo de los cultivos de tomate.
- Investigar las tecnologías disponibles de sensores agrícolas aplicables al contexto productivo de Agrícola Aurora Limitada.
- Evaluar la factibilidad técnica y económica del proyecto a través de un flujo de caja proyectado, determinando la viabilidad de inversión en tecnologías de monitoreo.
- Estimar los beneficios esperados de la implementación de sensores agrícolas en términos de aumento de la producción, reducción de las mermas y mejora en la eficiencia del uso de recursos hídrico.

## Capítulo 5: Marco Teórico

### 5.1 Agricultura de precisión:

La agricultura de precisión es un enfoque moderno que combina tecnologías digitales y herramientas de monitoreo para mejorar la toma de decisiones en la agricultura. Esta estrategia busca optimizar el uso de recursos como agua, fertilizantes y plaguicidas, adaptando las intervenciones a las condiciones específicas de cada parcela o cultivo (FAO, 2022). A diferencia de la agricultura convencional, que aplica tratamientos uniformes, la agricultura de precisión promueve prácticas basadas en datos recopilados en tiempo real.

La agricultura de precisión existe desde mediados de la década de 1990. Desde entonces, se ha consolidado como una herramienta de gestión en la vitivinicultura y fruticultura chilena. Con el paso de los años su uso se ha ampliado, aplicándose también a cultivos industriales y de cereales.

En este contexto, este tipo de herramienta ha demostrado no solo mejoras significativas en la eficiencia productiva, sino que además ha generado beneficios en términos de impacto ambiental, debido a la reducción en el consumo de agua tanto en huertos como en viñedos. De hecho, según Singh et al. (2023), un sistema de riego inteligente basado en IoT ha evidenciado reducciones del consumo de agua entre el 30 y el 40 % sin comprometer el rendimiento de los cultivos, ya que permite a los usuarios monitorear en tiempo real y ajustar automáticamente el suministro hídrico en los cultivos de tomates. Por lo tanto, en el cultivo del tomate, la implementación de este tipo de tecnología ha demostrado ser de gran utilidad, ya que permite aumentar la productividad y la calidad del producto mediante un control más preciso del riego, además de favorecer un mejor manejo de los problemas fitosanitarios.

Ventajas frente a la agricultura tradicional:

- Reducción en el uso de agua, fertilizantes y pesticidas.
- Mejora la productividad y la calidad de la cosecha.
- Mejor eficiencia energética.

- Reducción del impacto ambiental.

## **5.2 Sensores Agrícolas:**

Según la FAO (2019), los sensores agrícolas son herramientas electrónicas que proporcionan información en tiempo real sobre la actividad del campo. Recopilan datos como la humedad del suelo, el crecimiento de las plantas, la temperatura, la luz solar, la humedad ambiental y otros aspectos importantes sobre el cultivo. Toda esta información permite a los agricultores tomar decisiones antes de que surjan posibles problemas que puedan afectar su producción. Esto les permite actuar con mayor eficacia y prevenir situaciones adversas. Además, estas tecnologías han contribuido significativamente a la agricultura de precisión, ya que permite un mejor aprovechamiento de los recursos.

### **5.2.1 Sensores de humedad del suelo**

Los sensores de humedad del suelo son dispositivos que miden el contenido volumétrico de agua de la tierra productiva. Esta medida permite un riego preciso y exacto, evitando dosis innecesarias y previniendo el estrés hídrico en las plantas.

### **5.2.2 Sensores climáticos**

Según el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA, 2019), los sensores climáticos pueden monitorear variables como temperatura, humedad y radiación solar, permitiendo anticipar condiciones favorables para la aparición de plagas. Esto es particularmente relevante dado que muchas plagas tienden a prosperar en altas temperaturas.

### **5.2.3 Sensores de detección de plagas**

En la actualidad, existen varios tipos de sensores utilizados para la detección de plagas, los cuales han incorporado tecnologías más innovadoras, como por ejemplo narices electrónicas, visión artificial, sensores acústicos, entre otros. Por ejemplo, en un estudio de Cui et al. (2021), se desarrolló una nariz electrónica capaz de detectar infecciones de mosca blanca en cultivos de tomates; el sistema tenía la capacidad de distinguir plantas sanas e infectadas en minutos, mediante la identificación de variaciones en los compuestos volátiles. Asimismo, otro estudio realizado por Yang y Qiu (2024), demostró el desarrollo de un modelo YOLOv5s-Pest, alcanzando una precisión del 92,5 % en detección visual con drones respecto

a las plagas en imágenes, lo cual permitió controlar grandes superficies de campos. Por otro lado, un estudio enfocado en el sistema IoT, según Ali et al. (2023), logró identificar plagas mediante un análisis de sonido y modelos CNN-BiLSTM, analizado con la ayuda de la inteligencia artificial, alcanzando un 98,9 % de precisión para reconocer especies específicas.

En conjunto, las investigaciones nombradas anteriormente demuestran que, gracias a la combinación de sensores con inteligencia artificial, se ofrece una herramienta más potente para una detección rápida y no invasiva de plagas.

### **Requerimiento climático del tomate**

Para que el cultivo de tomate tenga un buen desempeño en la calidad de sus frutos, es fundamental que se mantenga dentro de rangos óptimos de temperatura. Según Olabisi y Nofiu (2022), en condiciones de invernadero, la temperatura durante el día debe mantenerse entre los 23 °C y 28 °C. No obstante, durante la noche, los valores ideales se sitúan entre 15 °C y 22 °C, ya que temperaturas superiores a los 25 °C o inferiores a los 12 °C pueden afectar negativamente la fertilización floral, generando abortos de flor y deformaciones en el fruto. No obstante, en lo que respecta a los niveles de humedad relativa, es fundamental mantener valores adecuados tanto durante el día como en la noche. Según Jiménez Cordero y Rodríguez Rodríguez (2020), durante el día, la humedad relativa debe situarse idealmente entre un 60 % y 70 %, ya que este rango favorece una polinización eficiente y un cuajado exitoso de la flor. Por su parte, en horario nocturno, se recomienda mantener la humedad entre un 70 % y 80 %, ya que estos niveles optimizan el proceso de cuajado y, al mismo tiempo, contribuyen a reducir la incidencia de enfermedades fúngicas en el cultivo de tomate bajo invernadero.

Ahora bien, respecto a los niveles de humedad del suelo óptimos para llevar a cabo un riego eficiente, se deben considerar ciertos rangos clave. Según Dereje y Desalegn (2021), quienes realizaron un experimento en condiciones de invernadero, mantener la humedad del suelo en torno al 75 % de la capacidad de campo permite maximizar tanto la cantidad como el tamaño de los frutos comerciales de tomate. Por el contrario, cuando los niveles de humedad descienden hasta el 60 %, se observa una reducción significativa tanto en el número de frutos como en su calibre, lo que afecta directamente el rendimiento del cultivo.

#### **5.2.4. Plataforma Arduino para sensores agrícolas.**

Arduino es una plataforma de desarrollo de hardware de código abierto ampliamente, consiste en una placa de circuito eléctrica con un microcontrolador, entradas y salidas digitales/analógicas, y un entorno de programación abierto que permite el desarrollo de soluciones personalizadas.

En el contexto de la agricultura de precisión, la plataforma Arduino se ha consolidado como una herramienta clave para el desarrollo de sistemas de monitoreo ambiental de bajo costo. Gracias a su flexibilidad y facilidad de programación, permite la integración directa con sensores de humedad del suelo, temperatura y otros módulos como pantallas LCD o dispositivos de comunicación inalámbrica. Esta tecnología ha demostrado ser eficaz para implementar soluciones accesibles y escalables en entornos agrícolas, optimizando el uso de recursos y mejorando la eficiencia operativa (Duguma & Bai, 2024; Dos Santos et al., 2021).

La principal ventaja de Arduino frente a sistemas más complejos es que permite la automatización de procesos agrícolas, como el riego, mediante la lectura e interpretación de datos en tiempo real mediante código. Esto facilita la toma de decisiones a los agricultores, sin necesidad de equipos costosos ni personal especializado en ingeniería eléctrica.

Existen varios tipos de sensores compatibles con Arduino, pero solo se van a mencionar dos de ellos:

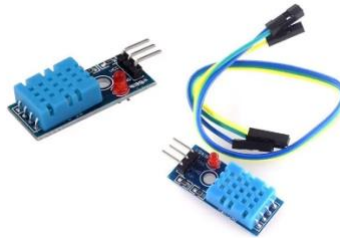
- **Sensores DHT11/ DHT22:**

Ambos sensores pertenecen a la misma familia de dispositivos electrónicos diseñados para la medición ambiental. Estos sensores permiten el registro simultáneo de temperatura y humedad relativa, lo que los convierte en componentes esenciales para los sistemas de monitoreo en entornos agrícolas.

Están equipados con un procesador interno que realiza el muestreo, el procesamiento de señales y la salida de datos a través de una salida digital estandarizada, lo que simplifica su integración con plataformas como Arduino, sin necesidad de conversión analógica-digital externa.

Aunque comparten características estructurales y una carcasa de plástico similares, difieren en color y precisión: el DHT11 (azul) es un modelo básico, con un rango de medición limitado y una resolución menor, mientras que el DHT22 (blanco) ofrece mayor precisión y un rango de temperatura y humedad más amplio. Estas características hacen que el DHT22 sea más adecuado para aplicaciones que requieren un monitoreo más detallado de las condiciones ambientales.

**Figura 9:** Sensor DHT11



**Fuente:** Adaptado de Mercado Libre (s.f.)

**Figura 10:** Sensor DHT22.



**Fuente:** Adaptado de Mercado Libre (s.f.)

- **Sensor de Humedad del Suelo FC-28 (Higrómetro):**

El FC-28 es un sensor resistivo ampliamente utilizado en sistemas de riego automatizados, ya que detecta la humedad del suelo en tiempo real y activa los sistemas de bombeo cuando esta desciende por debajo de un nivel umbral.

Este sensor funciona midiendo la conductividad eléctrica del suelo, que varía en función del contenido de agua. Si bien no proporciona mediciones absolutas ni de alta precisión como los sensores capacitivos o tensiométricos, su sensibilidad es suficiente para tareas de control binario como la activación/desactivación del riego en sistemas agrícolas de bajo coste.

El FC-28 incluye una placa de control que permite dos tipos de salidas:

- Una salida analógica, que proporciona un valor proporcional a la humedad del suelo, generalmente en el rango de 0 a 1023 (donde 0 representa suelo muy húmedo o saturado de agua, y 1023 representa suelo completamente seco).
- Una salida digital, que se activa cuando se supera un umbral predefinido, ajustable mediante un potenciómetro integrado. En este modo, el sensor envía una señal digital BAJO cuando el suelo está seco (baja conductividad) y ALTO cuando la humedad excede el punto establecido.

**Figura 11: Sensor FC-28.**



*Fuente: Adaptado de Mercado Libre (s.f.)*

### **Lenguaje de programación Arduino:**

Como se mencionó al inicio, Arduino es una plataforma de hardware y software de código abierto diseñada para facilitar el desarrollo de prototipos electrónicos interactivos. Se basa en una placa electrónica con entradas y salidas analógicas y digitales, y un entorno de desarrollo integrado (IDE) que utiliza un lenguaje de programación derivado de Processing y C++.

Gracias a su naturaleza de código abierto, tanto el diseño del hardware como el software pueden usarse, modificarse y distribuirse libremente sin necesidad de licencias comerciales, lo que lo convierte en una opción accesible para el desarrollo académico e industrial.

*Figura 12: Arduino uno.*



*Fuente: Fuente: Arduino.cl (s.f.). Imagen de placa Arduino. Recuperado de [https://arduino.cl/?s=arduino&post\\_type=product](https://arduino.cl/?s=arduino&post_type=product)*

### **5.2.5 Ejemplos de aplicaciones exitosas en el extranjero.**

A continuación, se mencionarán algunas investigaciones sobre la implementación de sistemas de sensores existentes. Por ejemplo, en la India, según Rathore et al. (2023), han implementado un sistema de riego totalmente inteligente utilizando sensores IoT, los cuales se encargan de controlar los niveles de humedad, temperatura y radiación del suelo. Los datos obtenidos son enviados en tiempo real a una aplicación móvil, lo que permite mejorar la toma de decisiones de los agricultores en plantaciones de tomates, donde se han demostrado resultados positivos.

De manera complementaria, también existe otro estudio realizado por Singh et al. (2023), quien propuso un sistema de riego de precisión basado en la utilización de sensores de humedad del suelo y algoritmos predictivos. A diferencia del sistema anterior, este se ajustaba automáticamente al suministro de agua según las necesidades de la planta y permitía un monitoreo completo a través de una aplicación móvil.

En ambos casos, los resultados mostraron mejoras significativas tanto en el ahorro del consumo hídrico como en el rendimiento de los tomates, aumentando la productividad, contribuyendo además a mejorar la calidad de los frutos. En particular, en el estudio de Rathore et al. (2023) se logró reducir el consumo de agua en un 30%, lo que evidencia el impacto positivo que puede tener la digitalización en la agricultura.

### **5.3 Eficiencia del Recurso Hídrico:**

En regiones áridas como Arica y Parinacota, el agua se ha convertido en un recurso escaso y esencial para el desarrollo agrícola. Según la FAO (2017), la agricultura es responsable de casi el 70% de las extracciones de agua dulce a nivel mundial, y muchos países han identificado prácticas de riego ineficientes y una falta de conciencia sobre la gestión sostenible del agua.

La implementación de sensores inteligentes permite un uso más preciso del agua. El Instituto Nacional de Estadística y Censos (INIA) ha indicado que su aplicación en zonas áridas puede generar un ahorro estimado de 20 a 30% en el consumo de agua, evitando riesgos innecesarios y optimizando los tiempos de aplicación (INIA, 2021).

#### **5.3.1 Riego tecnificado vs. riego inteligente.**

El riego tecnificado, como el sistema de riego por goteo, es común en el norte de Chile debido a su bajo costo y eficiencia. Sin embargo, el riego inteligente, que incorpora sensores y automatización, no solo ahorra más agua, sino que también aumenta la productividad al proporcionar exactamente lo que la planta necesita en el momento adecuado.

En un estudio realizado en Perú, en la ciudad de Abancay, se instalaron sensores de temperatura y humedad del suelo integrados con un microcontrolador Arduino, lo que permitió implementar un sistema de control de riego automatizado dentro de un invernadero con plantaciones de fresas. En dicho estudio se evidenció una optimización significativa en el manejo de las condiciones ambientales, lo que favoreció el desarrollo del cultivo y mejoró la eficiencia del riego e incluso considerando que Abancay es una zona altoandina con clima extremo, altitud elevada y limitaciones hídricas.

#### **5.3.2 Impacto en la productividad y sostenibilidad**

La gestión eficiente del agua da como resultado cultivos más sanos, menos propensos a enfermedades relacionadas con el exceso de humedad y mayores rendimientos. Desde una perspectiva sostenible, el uso racional del agua contribuye a conservar los suelos, reducir la demanda energética para riego y mantener el equilibrio ecológico (FAO 2017).

La reducción del exceso de agua también ayuda a reducir enfermedades asociadas con la de humedad, como hongos y la podredumbre.

#### **5.4 Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades (MIP)**

En cultivos sensibles, como el tomate, un control fitosanitario eficaz es esencial para proteger la productividad y garantizar la sostenibilidad del sistema agrícola. Una de las principales amenazas para este tipo de cultivo son los trips (*Frankliniella occidentalis*) y la mosca blanca (*Bemisia tabaci*), plagas que no sólo dañan directamente a las plantas, sino que también actúan como vectores de enfermedades virales, afectando gravemente la productividad. En este escenario, el Manejo Integrado de Plagas (MIP) se posiciona como una estrategia fundamental, ya que permite controlar estas amenazas mediante la combinación de técnicas biológicas, culturales, físicas y químicas, favoreciendo aquellas de menor impacto ambiental. Según la FAO (2020), el objetivo del manejo integrado de plagas es mantener las poblaciones de plagas por debajo del umbral de daño económico, contribuyendo así a una agricultura más segura y sostenible.

A nivel mundial, millones de pequeños agricultores siguen utilizando métodos manuales de monitoreo de plagas, como inspecciones visuales o trampas tradicionales, mientras que un porcentaje menor de productores tecnológicamente avanzados han integrado herramientas avanzadas que permiten una gestión de plagas más precisa y eficiente. Esto ha generado una disparidad tecnológica entre productores con y sin acceso a la innovación digital aplicada al agro.

Los agricultores de menor escala presentan restricciones significativas en la capacidad de monitorear sus cultivos de forma continua y precisa, principalmente debido a la falta de recursos económicos, escaso acceso a capacitación técnica y a la limitada infraestructura digital en zonas rurales. Estas condiciones dificultan la detección temprana de brotes, reducen la efectividad de las estrategias de control y pueden traducirse en mayores pérdidas económicas y un uso intensivo de agroquímicos, comprometiendo la sostenibilidad del sistema agrícola (FAO, 2021).

## **Capítulo 6. Propuesta metodológica**

Para alcanzar los objetivos específicos definidos en esta investigación, se desarrolló una metodología compuesta por cinco etapas.

En este capítulo se presentan los procedimientos utilizados para evaluar la factibilidad técnica y económica del uso de sensores de humedad y temperatura del suelo, orientados a optimizar el uso del recurso hídrico y mejorar el control fitosanitario en cultivos ubicados en el Valle de Azapa.

### **6.1 Diagnóstico de la situación actual**

Se recopilará información técnica y operativa relevante sobre el manejo del riego y el control de plagas en la empresa. Esta etapa incluirá un análisis de los registros de producción de la cosecha 2024, particularmente en lo que se refiere a productividad, pérdidas y consumo de agua. De igual forma, se realizará observación directa en campo de las prácticas actuales de riego y control fitosanitario, complementada con entrevistas semiestructuradas al responsable de producción y al encargado de riego. Este diagnóstico identificará deficiencias en el sistema actual, caracterizará las condiciones ambientales y productivas del cultivo de tomate RZ Antumay.

### **6.2 Identificación de tecnologías disponibles**

En esta fase se investigarán sensores agrícolas disponibles compatibles con la plataforma Arduino, centrándose en sensores de humedad y temperatura del suelo. Se realizará un estudio técnico de sensores de bajo costo como los modelos FC-28 y DHT11 y se compararán con tecnologías comerciales como Decagon, Sentek y Davis. La selección de la tecnología tendrá en cuenta criterios como coste, precisión, durabilidad y compatibilidad con los sistemas de riego por goteo existentes. Se dará prioridad al uso de sensores de bajo costo y fácil implementación, adecuados para pruebas piloto en cultivos hortícolas ubicados en ambientes áridos, como el Valle de Azapa.

### **6.3 Diseño de solución técnica**

En esta etapa se desarrollará un modelo de implementación de sensores utilizando microcontroladores Arduino. Se configurará y programará un sensor de humedad del suelo utilizando un código básico adaptado a las condiciones específicas del suelo. También se simularán escenarios de medición respecto a los niveles de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo. Este diseño permitirá proyectar el impacto de la solución tecnológica en decisiones agronómicas preventivas, particularmente en el control temprano de condiciones ambientales favorables a la aparición de plagas.

### **6.4 Evaluación económica del proyecto**

Se realizará una proyección de flujo de caja a cinco años para evaluar la rentabilidad del sistema de sensores, considerando la inversión inicial, el mantenimiento preventivo y los beneficios derivados del aumento de la producción y la reducción de pérdidas. Se calcularán indicadores financieros como el valor actual y la tasa interna de retorno para determinar la viabilidad económica del proyecto.

### **6.5 Síntesis y validación de resultados**

Finalmente, se comparará el escenario actual con un escenario proyectado utilizando sensores, evaluando las mejoras en la productividad, la eficiencia del riego y la reducción de pérdidas. Esta validación demostrará cómo la tecnología mejora la toma de decisiones y genera un impacto positivo en la gestión agrícola de la empresa.

## Capítulo 7: Aplicación metodológica

### 7.1 Diagnóstico de la situación actual

#### 7.1.1 Recopilación de información documental

Se analizaron los datos proporcionados por Agrícola Aurora Ltda. Respecto a la temporada de producción 2024. Los principales resultados obtenidos son los siguientes:

**Rendimiento por hectárea:** Según los datos disponibles en la hoja de control interno, el rendimiento promedio para la temporada 2024 fue de aproximadamente 324.522 kg de tomates, ligeramente inferior al del mismo período del año anterior.

**Frecuencia y duración del riego:** La frecuencia de riego varía según la etapa fenológica de la planta. Inicialmente, cuando la planta acaba de ser trasplantada, el riego se realiza días por medio y dura aproximadamente 5-6 minutos al día. Posteriormente, a medida que la planta madura y está lista para la cosecha, la duración del riego aumenta considerablemente, alcanzando los 40-60 minutos al día. Sin embargo, esta duración puede modificarse según las condiciones climáticas. Por ejemplo, en días nublados, se recomienda regar 40 minutos, en dos momentos del día: uno por la mañana y otro por la tarde. Esta práctica ayuda a prevenir el estrés hídrico y a mantener la humedad suficiente para un desarrollo óptimo de las plantas.

**Consumo estimado de agua por temporada:** Según el informe hídrico elaborado por la empresa, que analiza que el consumo de agua a lo largo del proceso de producción es de 35.553 metros cúbicos al año.

**Pérdidas económicas por plagas debido a las condiciones climáticas:** El análisis económico estima que las pérdidas por la presencia de plagas no controladas y los efectos de las temperaturas como bajas temperaturas y humedad alcanzan aproximadamente los \$36.423.946 para la temporada 2024, lo que equivale al 13,4% de los ingresos anuales

**Uso de tecnologías de monitoreo agronómico:** Actualmente, el monitoreo del riego y la detección de plagas se realizan sin el uso de tecnologías específicas. No se utilizan

sensores, estaciones meteorológicas ni plataformas digitales. La toma de decisiones agronómicas se basa principalmente en la experiencia del equipo de producción.

### **7.1.2 Observación directa en el campo**

Como parte de la evaluación de la situación actual, se realizó una observación directa no estructurada en las instalaciones de producción de Agrícola Aurora Ltda., para determinar las rutinas operativas diarias relacionadas con el riego, la calidad del suelo y las prácticas agronómicas generales. Esta observación se realizó en días laborables normales y sin intervención externa, lo que permitió documentar el funcionamiento eficaz del sistema.

**Observación del sistema de riego:** En ambas instalaciones se utiliza un sistema de riego por goteo superficial, con dos líneas por surco y goteros cada 20 cm. El sistema se activa manualmente mediante un panel de control y el riego se realiza por secciones debido a que la presión de agua es limitada.

**Método de tomas de decisiones sobre el riego:** Se verificó que las decisiones sobre frecuencia y duración del riego se ajustan únicamente a través de observación directa. El encargado evalúa el estado del suelo y las plantas sin instrumentos técnicos. Por ejemplo, presiona un puñado de tierra para estimar humedad o analiza visualmente el color de las hojas de la planta para determinar si alguna de ellas se encuentra con estrés hídrico.

**Textura del suelo y distribución del agua:** En la nave 1, el suelo es franco/arenoso, mientras que en la nave 2 predomina una textura arcillosa (franca). En ambos terrenos se observó un buen drenaje superficial, sin encharcamientos ni estancamientos. Sin embargo, el suelo arcilloso de la nave 2 presenta una mayor capacidad de retención de agua, por lo que es necesario ser riguroso con el tiempo de riego, ya que un exceso podría favorecer la aparición de hongos asociadas a un manejo inadecuado del agua.

**Condiciones ambientales observadas:** Durante la inspección, se observó que las plantas tienen aproximadamente dos meses desde la trasplantación realizada en abril. Hasta el momento, no se han observado manchas o daños visibles. No obstante, el personal advirtió que las bajas temperaturas por la mañana aumentan el riesgo de escarchas, lo que ha provocado en temporadas anteriores la aparición de hongos como *Botrytis*, afectando la calidad del cultivo.

### 7.1.3 Entrevistas semiestructuradas al personal

Participaron en las entrevistas: el responsable general de producción y el encargado de riego. Las entrevistas se organizaron en torno a cinco temáticas clave: percepción del rendimiento, decisiones de riego, desafíos fitosanitarios y disposición hacia tecnologías de monitoreo.

**Percepciones sobre la campaña del periodo 2024:** Los entrevistados coincidieron en que la campaña 2024 fue aceptable en términos de rendimiento. En cuanto a las plagas, mencionaron la aparición de un hongo que atacó al cultivo desde la raíz, algo que no había ocurrido anteriormente.

**Criterios actuales de riego:** Todos los entrevistados confirmaron que las decisiones de riego se basan principalmente en la experiencia del encargado y la observación visual, sin uso de sensores ni registros técnicos. Se utilizan métodos tradicionales como presionar la tierra con la mano o mirar el color de las hojas de las plantas.

**Manejo de enfermedades y plagas:** El personal indicó que la detección de enfermedades es de forma visual y reactiva, es decir, se interviene solo cuando los síntomas ya están presentes. Entre las enfermedades más comunes se encuentran los hongos como *Botrytis* y cenicilla, los cuales aparecen con frecuencia. Esto ocurre especialmente cuando se realiza un riego normal y, al día siguiente, se produce escarchado debido a las bajas temperaturas. Este fenómeno es característico de la temporada de invierno y representa un factor climático que no se puede controlar.

**Conocimiento y disposición hacia tecnologías:** Si bien ninguno de los entrevistados ha utilizado sensores o herramientas digitales, todos manifestaron interés en contar con una herramienta simple que avise cuándo regar o anticipar a posibles condiciones climáticas dentro del invernadero.

## 7.2 Identificación de tecnologías disponibles

Esta fase corresponde a una etapa de análisis exploratorio aplicado, cuyo objetivo es identificar tecnologías de monitoreo que puedan mejorar la eficiencia del uso del recurso hídrico y apoyar la toma de decisiones agronómicas en Agrícola Aurora Ltda. Se prioriza la selección de sensores compatibles con plataformas abiertas como Arduino, debido a su bajo

costo, flexibilidad de integración y facilidad de uso en entornos agrícolas de pequeña y mediana escala.

El análisis incluye tanto sensores de bajo costo ampliamente utilizados en proyectos piloto de agricultura inteligente, como sensores comerciales consolidados en el mercado de agricultura de precisión. La selección se realiza a través de una matriz de evaluación que considera criterios como: costo, precisión, durabilidad, compatibilidad con el sistema de riego por goteo y posibilidad de reutilización en cultivos de ciclo estacional.

### **7.2.1 Contexto agrícola y criterios de idoneidad**

El cultivo de tomate en el Valle de Azapa sigue un ciclo productivo anual. Al término de la cosecha, se eliminan completamente las plantas, se ara, se desinfecta el suelo, y se reinicia el proceso de producción. Este tipo de manejo dificulta el uso de sensores de instalación permanente. Por ello, se priorizan tecnologías portátiles, desmontables y reutilizables, que puedan retirarse al final de cada temporada de producción.

### **7.2.2 Presentación de las tecnologías disponibles**

A continuación, se describen dos sensores de bajo costo FC-28 y DHT11, compatibles con Arduino.

El sensor FC-28 permite medir el nivel de humedad del suelo mediante una señal resistiva, y se conecta directamente a plataformas como Arduino. Su principal ventaja es su bajo costo y su facilidad de implementación, siendo una herramienta útil para pruebas piloto de bajo presupuesto. Sin embargo, diversos estudios advierten que su precisión puede variar según la textura del suelo y que su exposición prolongada a la humedad puede deteriorar su funcionamiento (Nativa, 2021).

El sensor DHT11 es un sensor ampliamente usado en proyectos educativos y de monitoreo ambiental, capaz de registrar la temperatura y humedad relativa del aire. Aunque no mide la humedad del suelo, su integración permite relacionar las condiciones ambientales con el comportamiento hídrico de la planta, mejorando el diseño de estrategias preventivas en el riego (Adafruit, s.f.).

Por otro lado, se describen algunas tecnologías comerciales en la agricultura precisión como Teros 12, Drill & Drop y Ventage Pro2.

El análisis implica sensores agrícolas potentes y de alta precisión utilizados en sistemas de monitoreo agronómico profesionales. Aunque son muy robustas, su instalación fija puede ser un obstáculo para la rotación anual de cultivos.

El Teros 12 es un sensor capacitivo de alta precisión que mide contenido volumétrico de agua, temperatura y conductividad eléctrica del suelo. Su instalación subterránea fija y la necesidad de data loggers especializados lo hacen menos adecuado para cultivos de corta duración, donde el suelo debe ser arado o desinfectado al finalizar cada campaña (METER Group, 2024).

La sonda Drill & Drop permite monitorear humedad, temperatura y salinidad en múltiples profundidades, siendo útil para cultivos permanentes o de raíz profunda (SeedMech, s.f.). Sin embargo, su instalación mediante barrena y su retiro entre campañas puede resultar complejo, lo cual representa una limitante operativa en cultivos como el de tomates.

La estación meteorológica Vantage Pro2 proporciona datos ambientales de alta precisión como temperatura, humedad, presión, lluvia, etc. y se ha utilizado ampliamente en la agricultura de precisión para la planificación del riego. Aunque no mide humedad del suelo, su información complementa el análisis hídrico y permite establecer umbrales de decisión basados en clima (Davis Instruments, 2024).

**Tabla comparativa de sensores:**

*Tabla 2: Tabla comparativa de sensores Arduino con comerciales.*

Sensor / Marca	Costo	Precisión	Durabilidad	Compatibilidad con Arduino / Riego	Reutilizable / Portátil	Adecuación a cultivo rotativo
<b>FC-28</b>	\$1.800	Media	Media	Alta (Arduino)	Alta (móvil)	Alta
<b>DHT11</b>	\$3.400	Media	Media	Alta (Arduino)	Alta	Alta
<b>TEROS 12 (Decagon)</b>	\$721.202	Muy alta	Muy alta	Baja (requiere datalogger especial)	Baja (instalación fija)	Baja (riesgo de daño en rotación)
<b>Drill &amp; Drop (Sentek)</b>	\$1.087.653	Muy alta	Muy alta	Muy baja (sistema propietario)	Muy baja (enterrado)	Muy baja (no apto para ciclo anual)
<b>Vantage Pro2 (Davis)</b>	\$940.000	Alta (ambiente)	Alta	Media (receptores + software)	Media (reubicable)	Media (para monitoreo climático)

*Fuente: Elaboración propia, 2025.*

## 7.3 Diseño de solución técnica

### 7.3.1 Descripción general del sistema

En esta fase se diseñó y simuló un sistema de monitoreo ambiental con fines demostrativos, empleando sensores de bajo costo conectados a una placa Arduino UNO.

El sistema está diseñando para medir la humedad del suelo utilizando el sensor FC-28, junto con el registro de la temperatura y la humedad relativa del ambiente mediante el sensor DHT11. Para llevar a cabo su implementación, se utilizarán los siguientes componentes, ver tabla 3.

### 7.3.2 Materiales y componentes utilizados.

*Tabla 3: Materiales Utilizados para el sistema de sensores.*

<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>
Arduino UNO	Microcontrolador de código abierto.
Sensor DHT11	Sensor digital de temperatura y humedad.
Sensor FC-28	Sensor analógico de humedad de suelo.
Protoboard	Placa de conexiones temporales.
Jumpers	Cables de conexión macho-macho.
Cable USB	Conexión Arduino - computador.
Planta en maceta	Simulación de entorno agrícola.

*Fuente: Elaboración propia, 2025.*

### 7.3.3 Montaje de los sensores

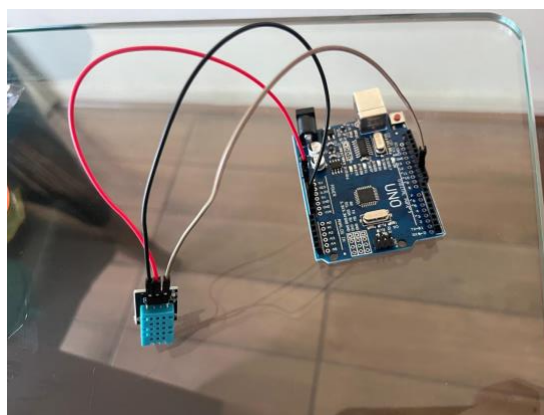
Para realizar la simulación del sistema de monitoreo, se montó un circuito básico utilizando una placa Arduino UNO y dos sensores: uno para la medición de la humedad del suelo (sensor FC-28) y otro para la temperatura y humedad relativa del ambiente (sensor DHT11). El propósito fue verificar que el sistema fuese capaz de medir correctamente ambas variables en condiciones controladas.

#### Conexión del sensor DHT11:

El montaje se llevó a cabo directamente sobre la placa Arduino, empleando cables tipo jumper (conectores Dupont macho-macho) para establecer las conexiones entre los sensores y los pines correspondientes del microcontrolador. En primer lugar, para conectar el sensor DHT11, se unió el pin VCC conectado mediante un cable rojo, es el encargado de suministrar la alimentación eléctrica al sensor, por lo que se unió al pin de 5V del Arduino.

A continuación, se conectó el pin GND asociado al cable negro, establece el punto de referencia a tierra del circuito y se conectó al pin GND del microcontrolador. Finalmente, el pin de datos (DAT), representado por el cable café, es el que transmite la información captada por el sensor (temperatura y humedad) al microcontrolador, y se conectó al pin digital 2 del Arduino UNO. Las conexiones del proceso se ven en la figura 13

*Figura 13: Montaje conexión del sensor DHT11.*

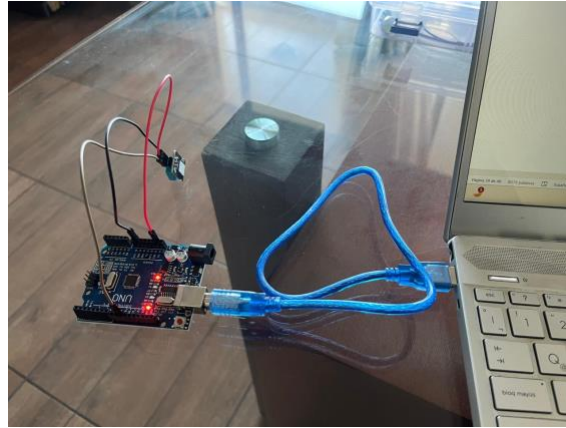


*Fuente: Elaboración propia, 2025.*

Luego de haber realizado todas las conexiones en el paso anterior se procede a conectar la placa de Arduino uno al computador mediante el cable USB, observando que se

encienda una luz de color rojo en la placa, la cual indica que ha sido conectada correctamente ver figura 14.

*Figura 14: Conexión sistema de sensores con ordenador.*



*Fuente: Elaboración propia, 2025.*

Posterior a ello se procede a realizar el lenguaje de programación, pero antes es necesario comprender los umbrales técnicos de temperatura y humedad en los que opera correctamente el cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero.

A continuación, se muestra el código implementado para la lectura y análisis de temperatura y humedad relativa del ambiente, utilizando el sensor DHT11.

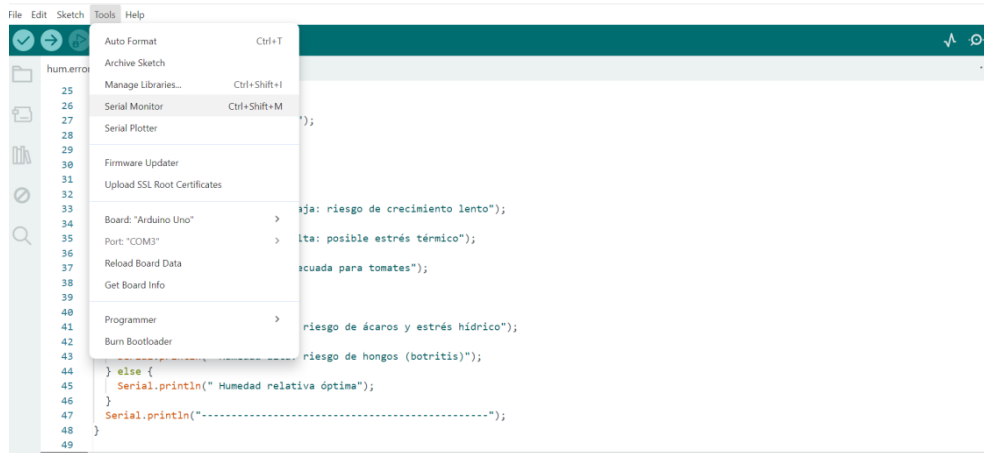
*Figura 15: Programación del sensor DHT11.*

```
File Edit Sketch Tools Help
Ψ Arduino Uno
hum.error.ino
1 #include <DHT.h> // Librería para sensor DHT
2 #include <DHT_U.h>
3 #include <Adafruit_Sensor.h>
4
5 #define DHTPIN 9 // Pin digital donde está conectado el DHT11
6 #define DHTTYPE DHT11 // Tipo de sensor
7
8 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); // Inicialización del sensor
9 void setup() {
10   Serial.begin(115200); // Inicia comunicación serial
11   dht.begin(); // Inicia el sensor
12 }
13 void loop() {
14   delay(2000);
15   float temperatura = dht.readTemperature(); // Temperatura en °C
16   float humedad = dht.readHumidity(); // Humedad relativa %
17   // Validación de lectura
18   if (isnan(temperatura) || isnan(humedad)) {
19     Serial.println("RROR: No se pudo leer del sensor DHT11");
20     return;
21   }
22   // Mostrar valores
23   Serial.print("Temperatura ambiente: ");
24   Serial.print(temperatura);
25   Serial.println(" °C");
```

*Fuente: Elaboración propia, 2025.*

Finalmente, para dar inicio con la medición de temperaturas se debe hacer “click” en la opción MONITOR SERIE.

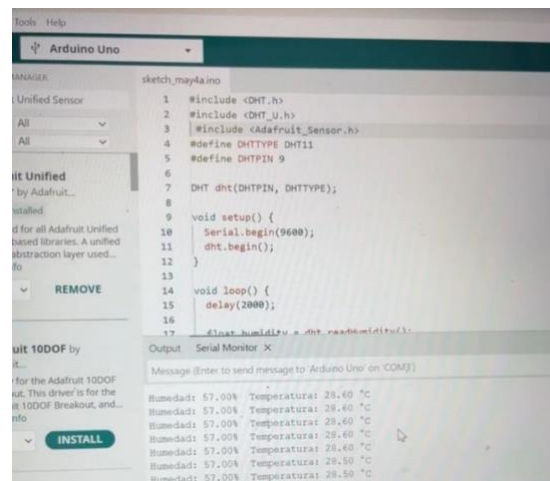
*Figura 16: Inicio de mediciones del sensor DHT11.*



*Fuente: Elaboración propia, 2025.*

Posterior a ello se comienza con la medición de la temperatura y humedad del clima.

*Figura 17: Mediciones de temperatura del sensor DHT11.*



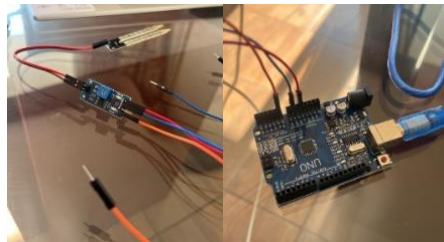
*Fuente: Elaboración propia, 2025.*

### **Conexión del sensor FC-28 (humedad del suelo):**

En cuanto al montaje del sensor de humedad del suelo FC-28, se realizaron las siguientes conexiones: el pin VCC (cable rojo) se conectó al pin 5V del Arduino para su

alimentación; el pin GND (cable azul) se unió al pin GND del Arduino, cerrando el circuito eléctrico; y el pin A0 (cable naranja), correspondiente a la salida analógica del sensor, se conectó al pin A0 del microcontrolador. Estas tres conexiones permitieron obtener lecturas continuas del nivel de humedad del suelo simulado. Adicionalmente, como se observa en la figura 18, el cable rojo (VCC) y el cable café (presumiblemente GND en este caso) están unidos mediante un conector doble, lo que permite alimentar simultáneamente tanto el módulo del sensor como las sondas que se insertan en el suelo.

**Figura 18:** *Conexión de sensor FC-28.*



**Fuente:** *Elaboración propia, 2025.*

Luego de haber realizado todas las conexiones en el paso anterior se procede a conectar la placa de Arduino uno al computador mediante el cable USB, observando que se encienda una luz de color rojo en la placa, la cual indica que ha sido conectada, ver figura 19.

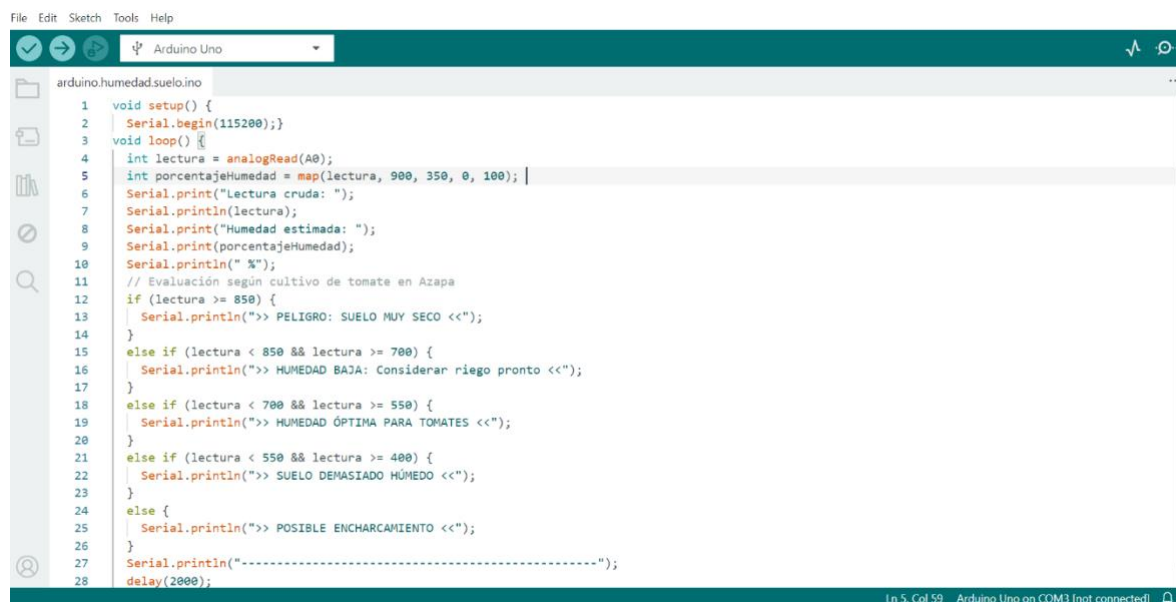
**Figura 19:** *Conexión de sensor FC-28 al ordenador.*



**Fuente:** *Elaboración propia, 2025.*

posterior a ello se procede a realizar el código de programación para medir la humedad del suelo, ver figura 20.

**Figura 20:** Programación del sensor FC-28.

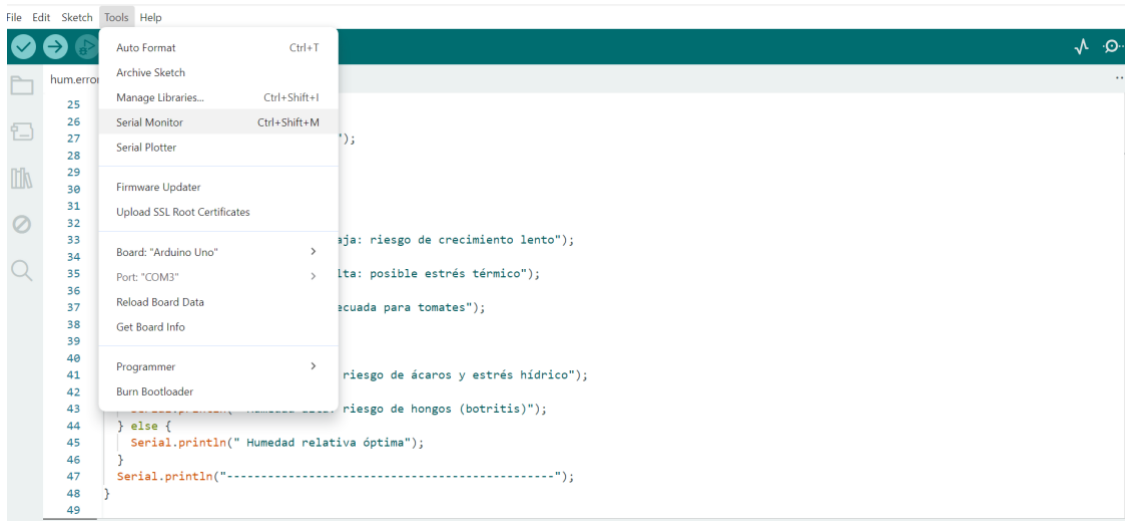


```
1 void setup() {
2   Serial.begin(115200);}
3 void loop() {
4   int lectura = analogRead(A0);
5   int porcentajeHumedad = map(lectura, 900, 350, 0, 100);
6   Serial.print("Lectura cruda: ");
7   Serial.println(lectura);
8   Serial.print("Humedad estimada: ");
9   Serial.print(porcentajeHumedad);
10  Serial.println(" %");
11  // Evaluación según cultivo de tomate en Azapa
12  if (lectura >= 850) {
13    Serial.println(">> PELIGRO: SUELO MUY SECO <<");
14  }
15  else if (lectura < 850 && lectura >= 700) {
16    Serial.println(">> HUMEDAD BAJA: Considerar riego pronto <<");
17  }
18  else if (lectura < 700 && lectura >= 550) {
19    Serial.println(">> HUMEDAD ÓPTIMA PARA TOMATES <<");
20  }
21  else if (lectura < 550 && lectura >= 400) {
22    Serial.println(">> SUELO DEMASIADO HÚMEDO <<");
23  }
24  else {
25    Serial.println(">> POSIBLE ENCHARCAMIENTO <<");
26  }
27  Serial.println("-----");
28  delay(2000);
```

**Fuente:** Elaboración propia, 2025.

Una vez que el programa ya esté listo se procede a introducir el sensor en una maceta con tierra ver figura 22, el paso siguiente es hacer clic en la opción “serial monitor”, ver figura 21, el programa comienza a realizar las mediciones correspondientes respecto a nivel de humedad ver figura 23.

**Figura 21:** Inicio de mediciones de humedad.



**Fuente:** Elaboración propia, 2025.

**Figura 22:** Sensor FC-28 sumergido en la tierra.



**Fuente:** Elaboración propia, 2025.

**Figura 23:** Mediciones de humedad sensor FC-28.

```
2 Serial.begin(115200);
3 void loop() {
4   int lectura = analogRead(A0);
5   int porcentajeHumedad = map(lectura, 900, 350, 0, 100);
6   Serial.print("Lectura cruda: ");
7   Serial.println(lectura);
8   Serial.print("Humedad estimada: ");
9   Serial.print(porcentajeHumedad);
10  Serial.println(" %");
11  // Evaluación según cultivo de tomate en Azapa
12  if (lectura >= 850) {
13    Serial.println(">> PELIGRO: SUELO MUY SECO <<");
14  }
15  else if (lectura < 850 && lectura >= 700) {
16    Serial.println(">> HUMEDAD BAJA: Considerar riego pronto <<");
17  }
18  else if (lectura < 700 && lectura >= 550) {
```

Output Serial Monitor X

Message (Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM3') New Line

Humedad estimada: -3 %  
>> PELIGRO: SUELO MUY SECO <<

-----

Lectura cruda: 922  
Humedad estimada: -4 %  
>> PELIGRO: SUELO MUY SECO <<

-----

NEW SKETCH

*Fuente: Elaboración propia, 2025.*

**Figura 24:** Mediciones de humedad sensor FC-28.

```
2 Serial.begin(115200);
3 void loop() {
4   int lectura = analogRead(A0);
5   int porcentajeHumedad = map(lectura, 900, 350, 0, 100);
6   Serial.print("Lectura cruda: ");
7   Serial.println(lectura);
8   Serial.print("Humedad estimada: ");
9   Serial.print(porcentajeHumedad);
10  Serial.println(" %");
11  // Evaluación según cultivo de tomate en Azapa
12  if (lectura >= 850) {
13    Serial.println(">> PELIGRO: SUELO MUY SECO <<");
14  }
15  else if (lectura < 850 && lectura >= 700) {
16    Serial.println(">> HUMEDAD BAJA: Considerar riego pronto <<");
17  }
18  else if (lectura < 700 && lectura >= 550) {
```

Output Serial Monitor X

Message (Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM3') New Line 115200

Humedad estimada: 85 %  
>> SUELO DEMASIADO HÚMEDO <<

-----

Lectura cruda: 432  
Humedad estimada: 85 %  
>> SUELO DEMASIADO HÚMEDO <<

-----

NEW SKETCH

*Fuente: Elaboración propia, 2025.*

## 7.4 Evaluación económica del proyecto

### 7.4.1 Objetivo de la evaluación

El propósito de esta evaluación es determinar la viabilidad financiera de implementar un sistema de monitoreo mediante sensores de humedad del suelo y sensores climáticos en Agrícola Aurora Limitada, a fin de reducir el consumo de agua, aumentar la productividad y reducir pérdidas en los cultivos.

### 7.4.2 Inversión inicial del sistema

Con el fin de estimar la inversión requerida para la implementación de un sistema de monitoreo, se consideraron los siguientes materiales para cada nave productiva.

Si bien ambas naves utilizan los mismos tipos de componentes, pero las cantidades varían dependiendo de la diferencia de superficie del terreno.

A continuación, se presenta el detalle de los costos de los materiales correspondiente a la nave 1 con una superficie de  $\frac{3}{4}$  hectárea, ver tabla 4.

*Tabla 4: Costos asociados a los materiales del sistema, nave 1.*

Recurso	Cantidad	Costo Unitario CLP	Total CLP
Sensor humedad suelo FC-28	6 unidad	\$1.800	\$10.800
Sensor temperatura y humedad DHT11	3 unid.	\$2.300	\$6.900
Arduino UNO kit	3 unid.	\$15.000	\$45.000
<b>Total</b>			<b>\$62.700</b>

*Fuente: Elaboración propia, 2025.*

De este modo el costo total de los materiales asignados a la nave 1 es de \$ 62.700. A continuación, se determina el costo asociado a los recursos humanos involucrados en cada etapa del proceso, ver tabla 4.

**Tabla 5:** *Asignación de HH en las etapas del sistema, nave 1.*

<b>Etapas</b>	<b>3/4 hectareas</b>
<b>Análisis y Diseño tecnico</b>	<b>90 HH</b>
<b>Construcción y Programación</b>	<b>50 HH</b>
<b>Implementación y Validación</b>	<b>70 HH</b>
<b>Capacitación inicial</b>	<b>10 HH</b>
<b>Total estimado</b>	<b>220</b>

*Fuente: Elaboración propia, 2025.*

Una vez determinada la cantidad total de horas hombre (HH) requeridas para el proceso, ver tabla 5, se procede a calcular el costo total asociado a los recursos humanos. Para ello, se considera un valor promedio por hora correspondiente al perfil de un Ingeniero Civil Industrial, el cual asciende a \$13.000 CLP por hora.

$$220 \text{ HH} \times \$13.000 = \$ 2.860.000 \text{ CLP}$$

Finalmente, considerando tanto los materiales como los recursos humanos, el costo total del sistema de sensores para la Nave 1 corresponde a \$2.922.700 CLP.

Ahora se procede a realizar los cálculos respecto de la nave 2 con una superficie de 2 hectáreas. En la tabla 6 se detallan los costos de los materiales.

**Tabla 6:** Costos asociados a los materiales del sistema, nave 2.

Recurso	Cantidad	Costo Unitario CLP	Total CLP
Sensor humedad suelo FC-28	10 unidad	\$1.800	\$18.000
Sensor temperatura y humedad DHT11	5 unid.	\$2.300	\$11.500
Arduino UNO kit	5 unid.	\$15.000	\$75.000
<b>Total</b>			<b>\$104.500</b>

*Fuente:* Elaboración propia, 2025.

Los costos de los materiales respecto a la nave 2 asciende a \$104.500 pesos CLP. Posteriormente se asignan las horas hombre (HH) a cada etapa del proceso ver tabla 7.

**Tabla 7:** Asignación de HH en las etapas del sistema, nave 2.

Etapas	2 hectareas
Análisis y Diseño técnico	240 HH
Construcción y Programación	133 HH
Implementación y Validación	187 HH
<b>Total estimado</b>	<b>560 HH</b>

*Fuente:* Elaboración propia, 2025.

Finalmente, el cálculo del costo total en RRHH es el siguiente:  $560 \text{ HH} \times \$13.000 = \$7.280.000 \text{ CLP}$ . Por ende, el costo total de un sistema de sensores para la nave 2 asciende a \$7.384.500 CLP.

Costo total de un sistema de sensores para ambas naves: \$ 10.307.200 CLP.

### 7.4.3 Costo de mantenimiento Productivo del sistema de sensores

El sistema propuesto incluye un costo anual de mantenimiento preventivo, que incluye el reemplazo de sensores para garantizar la adecuada recopilación de datos durante el proceso de producción. Esta medida busca garantizar la confiabilidad y la continuidad operativa del sistema de monitoreo.

Un nodo corresponde a un dispositivo de detección compuesto por un microcontrolador Arduino, sensores ambientales y/o de suelo y su respectiva fuente de alimentación. Cada nodo se encarga de recopilar y transmitir información de un área específica del invernadero. En el diseño del sistema, la nave 1 tiene 3 nodos y la nave 2, 5 nodos, que representan ambas áreas de producción. A continuación, se presenta una tabla con los costos asociados al mantenimiento preventivo anual por nodos

**Tabla7:** *costo de mantenimiento.*

<b>Materiales</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Valor Unitario (CLP)</b>	<b>Costo Total por Nodo (CLP)</b>
<b>Mano de obra técnica (3 h/nodo)</b>	1 vez/año	\$40.000/h	\$120.000
<b>Reemplazo sensor DHT11</b>	1 vez/año	\$3.000	\$3.000
<b>Reemplazo sensores FC-28 (x2)</b>	1 vez/año	\$1.800 c/u	\$3.600
<b>Insumos limpieza y calibración</b>	1 vez/año	\$10.000	\$10.000
<b>Total</b>			\$136.600

*Fuente:* Elaboración propia, 2025.

Considerando que se cuenta con 8 nodo, el costo total del mantenimiento preventivo para ambas naves es de \$1.092.800 CLP.

## Flujo de caja proyectado

*Figura 25: Flujo de caja proyectado.*

	0	1	2	3	4	5
Ingresos Anuales en base a kg. (Sistema actual)	\$271.880.138	\$271.880.138	\$271.880.138	\$271.880.138	\$271.880.138	\$271.880.138
Pérdidas Anuales	\$-36.423.946	\$ -36.423.946	\$ -36.423.946	\$-36.423.946	\$ -36.423.946	\$ -36.423.946
<b>Total</b>	<b>\$235.456.192</b>	<b>\$235.456.192</b>	<b>\$235.456.192</b>	<b>\$235.456.192</b>	<b>\$235.456.192</b>	<b>\$235.456.192</b>
Ingresos Anuales en base a kg. (Sistema nuevo)	\$287.658.222	\$287.658.222	\$287.658.222	\$287.658.222	\$287.658.222	\$287.658.222
Pérdidas Anuales	\$-36.966.663	\$ -36.966.663	\$ -36.966.663	\$-36.966.663	\$ -36.966.663	\$ -36.966.663
<b>Total</b>	<b>\$250.691.559</b>	<b>\$250.691.559</b>	<b>\$250.691.559</b>	<b>\$250.691.559</b>	<b>\$250.691.559</b>	<b>\$250.691.559</b>
<b>Diferencia</b>	<b>\$15.235.367</b>	<b>\$15.235.367</b>	<b>\$15.235.367</b>	<b>\$15.235.367</b>	<b>\$15.235.367</b>	<b>\$15.235.367</b>
Inversion nuevos sistema						
Desarrollo de un sistema de sensores	\$-10.307.200					
<b>Flujo Neto</b>	<b>\$-10.307.200</b>	<b>\$15.235.367</b>	<b>\$15.235.367</b>	<b>\$15.235.367</b>	<b>\$15.235.367</b>	<b>\$15.235.367</b>
VAN	\$40.764.114					
TIR	146%					
			TASA	15%		
Desarrolla de un sistema de sensores	\$-10.307.200					
Mantenimiento preventivo	\$-1.092.800	\$-1.092.800	\$-1.092.800	\$-1.092.800	\$-1.092.800	\$-1.092.800
Ahorro por cambio	\$59.268.275	\$59.268.275	\$59.268.275	\$59.268.275	\$59.268.275	\$59.268.275
<b>Total</b>	<b>-\$10.307.200</b>	<b>\$47.868.275</b>	<b>\$106.043.750</b>	<b>\$164.219.225</b>	<b>\$222.394.700</b>	<b>\$280.570.175</b>

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

## 7.5 Síntesis y validación de resultados

**Figura 26:** situación actual v/s situación proyectada con sensores en agrícola

Esenario	Cantidad de hectáreas producidas	Kg. De tomates en terreno.	Kg. De tomates vendidos.	Valor Total de la venta de producción.	Perdidas (kg).	Perdidas (\$).	Valor de la producción total.
Año 2024	2,75 ha.	374.724	324.522	\$235.456.192	50.202	\$ 36.423.946	\$271.880.138
Aplicado el sistema de sensores	2,75 ha.	447.420	396.470	\$287.658.222	50.950	\$ 36.966.663	\$250.691.559

*aurora Ltda.*

**Fuente:** Elaboración propia, 2025.

Para el cálculo de la situación presentada, se debe considerar que los siguientes datos:

En primer lugar, se analizaron los kilogramos de tomates cosechados en terreno durante el año 2024 y aquellos que se comercializaron, con los datos del análisis se logró calcular el porcentaje de merma que tuvo la empresa en el periodo del año 2024, ver figura 27.

**Figura 27:** Producción en kilogramos.

	Producción total en terreno (KG).	Producción vendida (Kg).
Nave 1	114.426	103.518
Nave2	260298	221.004
Total	374.724	324.522

**Fuente:** Elaboración propia, 2025.

El cálculo de las mermas se obtuvo restando los kilogramos vendidos de la producción total del terreno, por ende, se obtiene un valor de 50.202 kilogramos de tomates en perdida. Este valor corresponde al 13,4% respecto al total producido, ver figura 28.

**Figura 28: Producción, situación actual.**

<b>Situación actual</b>			
	Kg.	%	\$
Producción total en terreno (kg)	374.724	100%	\$271.880.138
Producción vendida	324.522	87%	\$235.456.192
Mermas kg	50.202	13,40%	\$36.423.946

**Fuente:** Elaboración propia, 2025.

Para evaluar el impacto de económico de esta pérdida, se consideró un precio promedio de \$726 por kilogramo, el valor mencionado fue calculado a partir de los ingresos anuales \$235.456.192 dividido entre 324.000 kg de tomates vendidos. Con la información obtenida, se determinó que las pérdidas por merma alcanzaron los \$36.423.946 de pesos.

A continuación, se realizó el análisis proyectando el escenario con la incorporación de los sensores, para determinar en cuánto aumentarían los ingresos de la empresa, se considera un aumento base del 19,4% el cual será aplicado a los \$271.880.138 correspondiente a la producción total del terreno. Al aplicar el porcentaje obtenemos que la producción total en terreno haciende a \$324.624.885, ver figura 29.

**Figura 29: Aumento en la producción con sensores.**

<b>Aumento en los ingresos de producción + 19,4%</b>			
	Kg.	%	\$
Produccion total en terreno (kg)	447.420	100%	\$324.624.885
Produccion vendida	387.479	87%	\$281.134.693
Mermas kg	59.941	13,4%	\$43.490.191

**Fuente:** Elaboración propia, 2025.

Posteriormente se calcula mediante una regla de tres simple, el nuevo valor que representarían los \$324.624.885 en kilogramos, ver figura 30.

**Figura 30: Kilogramos de Producidos en terreno.**

Producción en terreno	
\$	kg
\$271.880.138	374.724
\$324.624.885	X
447.420	X

**Fuente:** Elaboración propia, 2025.

Bajo este escenario, se obtiene que los \$324.624.885 corresponde a 447.420 kilogramos producidos en terreno, la cantidad de mermas hacienden a 59.941 kg correspondiente a \$43.490.191 Pesos chilenos, ver figura 29.

Sin embargo, la implementación de tecnología como los sensores también contribuye a una reducción en las mermas de la producción. De hecho, basándose en evidencia técnica, se estimó una reducción del 15 % respecto a las pérdidas, como se muestra en la figura 31.

**Figura 31: Reducción de perdidas respecto a las mermas.**

Disminución de las mermas de un 15%			
	Kg.	%	\$
Produccion total en terreno (kg)	447.420	100%	\$324.624.885
Produccion vendida	396.470	89%	\$287.658.222
Mermas kg	50.950	11,4%	\$36.966.663

**Fuente:** Elaboración propia, 2025.

Las perdidas en el caso anterior eran de 59.941 kilogramos, ahora con la reducción del 15% su valor disminuye a los 50.950 kilogramos, representando un 11,4% del total producido. En términos monetarios, la nueva perdida corresponde a \$36.966.663 pesos. Sin embargo, con esta reducción también aumentaría la producción vendida, la cual anteriormente era de 387.471 kilogramos ahora aumenta a 396.470 kilogramos de tomates con un ingreso para la empresa de \$287.658.222 pesos, ver figura 31.

### **Beneficios de la implementación de sensores:**

La implementación de estas nuevas tecnologías de sensores puede beneficiar a la empresa otorgándole una ganancia extra debido al aumento de la producción. Esto se debe a que, inicialmente, la empresa producía solo 374.724 kilogramos de tomates con su método de cuidados no tan precisos respecto al estado de humedad del suelo y los niveles de temperatura dentro del invernadero. Sin embargo, con la implementación del sistema de monitoreo, la cifra aumenta a 447.420 kilogramos de tomates. La diferencia entre ambos valores corresponde a 72.696 kilogramos adicionales, lo cual implica que la empresa estaría obteniendo una ganancia extra de 52.744.747 pesos únicamente por el aumento en la producción (ver figura 32).

*Figura 32: Análisis de beneficio respecto al aumento de la producción.*

<b>Beneficios</b>	<b>Situación actual</b>	<b>Situación con sensores</b>	<b>Diferencia</b>	<b>Ganancia extra</b>
Aumento en la producción (Kg)	374.724	447.420	72.696	\$52.744.747

*Fuente: Elaboración propia, 2025.*

Ahora bien, considerando el beneficio que implica reducir las pérdidas por mermas, esta mejora también genera una ganancia adicional para la empresa. Si bien al aumentar la producción las mermas también se incrementaron, alcanzando un valor de 59.941 kilogramos de tomates, el buen control de monitoreo contribuye a obtener frutos de mejor calidad y mayor calibre. Como resultado, las pérdidas por mermas se redujeron a 50.950 kilogramos. Por lo tanto, se obtiene una diferencia de 8.991 kilogramos de tomates, lo que equivale a \$6.523.529 pesos, representando una ganancia adicional para el productor, aparte de la obtenida por el aumento en la producción mencionado en el párrafo anterior, ver figura 33.

**Figura 33: Análisis de beneficio respecto al aumento de la producción.**

Beneficios	Producción (+)	Reducción del	Diferencia	Ganacia extra
	19,4%	15%		
Mermas	59.941	50.950	8.991	\$6.523.529

*Fuente: Elaboración propia, 2025.*

### Ahorro de Agua Proyectado

En relación con el uso del recurso hídrico, se estima que el consumo de agua podría reducirse hasta en un 25 % gracias al monitoreo de humedad en tiempo real mediante sensores instalados en el suelo.

Tal como se muestra en la Figura 34, se aplicó una regla de tres simple para determinar cuántos metros cúbicos representa dicha reducción respecto al consumo actual. El resultado indica que el ahorro hídrico anual sería de 8.888,3 m<sup>3</sup>, lo que representa una mejora significativa en la eficiencia del uso del agua.

**Figura 34: Ahorro hídrico m3.**

m3	Porcentaje
35.553	100%
X=	25%
X=	8888,3

*Fuente: Elaboración propia, 2025.*

En consecuencia, con la implementación del sistema de sensores, el consumo anual de agua pasaría de 35.553 m<sup>3</sup> a 26.664,8 m<sup>3</sup>, como se observa en la Figura 35. Este ahorro no solo representa una mejora operativa, sino que también fortalece el compromiso de la empresa con las buenas prácticas agrícolas y la sostenibilidad del recurso hídrico en un contexto climático cada vez más exigente.

**Figura 35: Consumo hídrico proyectado.**

Disminución del consumo de agua en un 25%
35.553 m <sup>3</sup>
8.888,3 m <sup>3</sup>
26.664,8 m <sup>3</sup>

**Fuente:** *Elaboración propia, 2025.*

Esta mejora permitiría optimizar el sistema tecnificado de riego por goteo que actualmente utiliza la empresa. Si bien el agua no representa un costo directo elevado debido a los derechos adquiridos previamente, la reducción en su consumo implicaría beneficios indirectos relevantes, tales como un menor desgaste del sistema de bombeo, una disminución en el gasto energético y un mejor cumplimiento de las buenas prácticas agrícolas.

Aunque, como se mencionó anteriormente, el ahorro hídrico no se traduce directamente en un beneficio monetario inmediato, sí representa una mejora en términos de sostenibilidad y eficiencia operativa. Además, permitiría la posibilidad de ampliar la superficie cultivada en el futuro sin necesidad de adquirir nuevos derechos de agua, lo cual constituye una ventaja estratégica en zonas de alta exigencia hídrica como el Valle de Azapa.

## **Capítulo 8: Conclusiones**

Considerando los resultados obtenidos en el presente proyecto de título, se concluye que es factible implementar un sistema de monitoreo en tiempo real en Agrícola Aurora Ltda., ya que mediante esta tecnología es posible optimizar el uso del recurso hídrico, fortalecer el manejo fitosanitario y reducir la dependencia de sistemas manuales para el riego y el control de variables clave que favorecen la proliferación de plagas o bacterias, mejorando así la eficiencia productiva.

Además, existen antecedentes donde la integración de sensores Arduino ha demostrado ser una solución efectiva y replicable, incluso en zonas con condiciones climáticas y técnicas limitantes. Este tipo de implementación no solo representa una alternativa de bajo costo para pequeños y medianos agricultores, sino que también abre la oportunidad de avanzar hacia la automatización progresiva del riego y del control ambiental dentro de los invernaderos.

Esta propuesta se alinea con los desafíos actuales del sector agrícola, particularmente en un contexto de cambio climático que ha modificado las condiciones tradicionales de cultivo. Por ejemplo, en la región de Arica y Parinacota, donde anteriormente las temperaturas eran más estables, hoy se presentan variaciones térmicas que afectan directamente al rendimiento productivo. En este escenario, la digitalización y la sostenibilidad se vuelven factores clave para garantizar la continuidad operativa y la adaptación del sector agrícola frente a estos nuevos desafíos ambientales.

### **8.1 Resultados**

La implementación de sensores agrícolas al interior de los invernaderos, tales como sensores de humedad de suelo y sensores de control climático para temperatura y humedad relativa, se presenta como una alternativa efectiva para mejorar el manejo hídrico y el control ambiental, favoreciendo así el rendimiento y la calidad de los frutos. Los resultados obtenidos mediante el análisis de factibilidad técnico-económica proyectado permiten validar la viabilidad del proyecto.

Al comparar el escenario con sensores frente al sistema tradicional, se evidencia un aumento significativo en el rendimiento del cultivo, lo que se traduce en un alza en la productividad general. La proyección anual aumenta en un 19,4%, pasando de 374.724 kg a 447.420 kg de tomates cosechados en terreno, reflejando así un uso más eficiente del espacio productivo gracias al monitoreo continuo de variables clave. Asimismo, se proyecta una reducción del 15% en las pérdidas por mermas, lo que implica un mayor volumen de tomates comercializados y una mejora en la calidad del fruto, atribuida a una gestión más precisa del riego.

En cuanto a la evaluación económica, el análisis proyectado a cinco años muestra que la inversión inicial de \$10.307.200 se recupera durante el primer año de implementación. El flujo de caja proyectado arroja un Valor Actual Neto (VAN) de \$40.764.114 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 146%, lo que indica una rentabilidad alta del proyecto. Además, al analizar los ahorros generados por el cambio desde un sistema tradicional a uno con monitoreo en tiempo real, incluyendo un costo de mantenimiento preventivo anual de \$1.092.800, se estima que los beneficios netos acumulados en cinco años generarían una ganancia adicional cercana a los \$280 millones. Esto ofrecería al productor la posibilidad de reinvertir dichos recursos en mejoras estructurales de los invernaderos o en la automatización completa de los sistemas de control.

Cabe destacar que esta investigación consideró la implementación de sensores únicamente en una parte de las naves productivas de Agrícola Aurora Ltda., y aun así los resultados demostraron ser altamente favorables. Esto abre una oportunidad de mejora al ampliar la aplicación del sistema a otros cultivos o automatizar por completo el riego por goteo. Por tanto, se concluye que la incorporación de sensores agrícolas no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también constituye una estrategia sostenible y replicable para enfrentar los desafíos productivos en zonas con limitación de recursos hídricos, como es el caso del Valle de Azapa.

## 8.2 Recomendaciones

Se propone realizar un estudio técnico económico para implementar progresivamente los sistemas de monitoreo en tiempo real mediante sensores, junto con la incorporación de nuevos dispositivos que midan la radiación solar o la conductividad eléctrica del suelo. Esto permitiría mejorar aún más la precisión en el manejo agronómico y seguir optimizando las decisiones relacionadas con el riego, la fertilización y el control ambiental.

Asimismo, se sugiere continuar innovando en los procesos productivos, por ejemplo, mediante la renovación de la máquina seleccionadora de tomates. Actualmente, existen máquinas que clasifican los frutos según su color, lo que no solo incrementaría la eficiencia del proceso, sino que también permitiría reducir los costos asociados a la mano de obra, la cual hoy representa una carga significativa para la empresa.

En este sentido, no avanzar en la incorporación de tecnologías podría representar una limitación competitiva a futuro, poniendo en desventaja a la empresa frente a productores que ya operan con sistemas inteligentes y sostenibles. Además, continuar dependiendo de prácticas manuales eleva el riesgo de pérdidas económicas, ya que el control preventivo puede variar y, en ocasiones, no se realiza a tiempo.

Por otro lado, la sostenibilidad y la eficiencia hídrica son desafíos cada vez más relevantes. Las empresas que logran cumplir con estos objetivos no solo optimizan sus procesos, sino que también aumentan su valor estratégico frente a consumidores y cadenas de distribución, los cuales valoran cada vez más las prácticas agrícolas responsables. En este contexto, la adopción de tecnologías agrícolas posicionaría a Agrícola Aurora Ltda. como una empresa innovadora y consciente de los desafíos actuales del cambio climático.

## Bibliografía

- Ahmed, S., Marwat, S. N. K., Brahim, G. B., Khan, W. U., Khan, S., Al-Fuqaha, A., & Koziel, S. (2024). IoT based intelligent pest management system for precision agriculture. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83012-3>
- Ali, M. A., Dhanaraj, R. K., & Nayyar, A. (2023). A high performance-oriented AI-enabled IoT-based pest detection system using sound analytics in large agricultural field. *Microprocessors and Microsystems*, 103, 104946. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2023.104946>
- Arduino.cl. (s.f.). *Sensor DHT11 – Temperatura y Humedad*. Recuperado el 2 de junio de 2025, de [https://arduino.cl/?s=DHT11&post\\_type=product](https://arduino.cl/?s=DHT11&post_type=product)
- Clemson University. (2021, mayo 12). *Clemson research finds using soil moisture sensors can increase farmers' net income*. Clemson News. <https://news.clemson.edu/clemson-research-finds-using-soil-moisture-sensors-can-increase-farmers-net-income/>
- Cui, S., Inocente, E. A. A., Acosta, N., Keener, H. M., Zhu, H., & Ling, P. P. (2019). Development of Fast E-nose System for Early-Stage Diagnosis of Aphid-Stressed Tomato Plants. *Sensors*, 19(16), 3480. <https://doi.org/10.3390/s19163480>
- Davis Instruments. (n.d.). *Vantage Pro2 Weather Station*. <https://www.davisinstruments.com/collections/vantage-pro2>
- Dereje, T., & Desalegn, T. (2021). Growth and yield response of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under different soil moisture regimes and irrigation intervals. *Horticulturae*, 7(12), 521. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7120521>

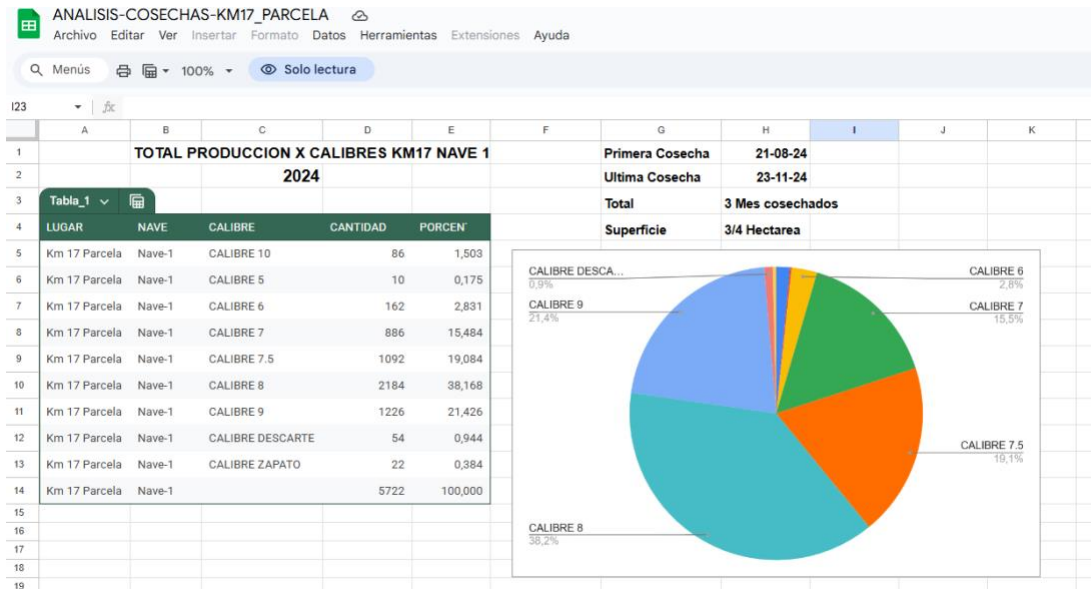
- Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Tigchelaar, M., Battisti, D. S., Merrill, S. C., Huey, R. B., & Naylor, R. L. (2018). Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 361(6405), 916–919. <https://doi.org/10.1126/science.aat3466>
- Dirlik, I., Uğurlar, F., & Kaya, C. (2025). Sensor-Guided Smart Irrigation for Tomato Production: Comparing Low and Optimum Soil Moisture in Greenhouse Environments. *Food and Energy Security*, 14(2). <https://doi.org/10.1002/fes3.70082>
- Dos Santos, F. F. L., Tavares, L. C. M., de Moura Araújo, G., de Lima Casseres dos Santos, L., Nogueira, C. P. R. A., Bachini, M. S., & Teixeira, M. A. (2021). Confidence analysis and calibration of a FC 28 soil moisture sensor mounted on a microcontroller platform. *Nativa*, 9(1), 123–128. <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i1.9152>
- Drill & Drop™ Probe Compact Troubleshooting Guide | Sentek Technologies. (s.f.). *Sentek Technologies*. <https://sentektechnologies.com/download/drill-drop-probe-compact-troubleshooting-guide/>
- Duguma, A. L., & Bai, X. (2024). How the internet of things technology improves agricultural efficiency. *Artificial Intelligence Review*, 58(2). <https://doi.org/10.1007/s10462-024-11046-0>
- FAO Knowledge Repository. (s.f.). *World food and agriculture – Statistical yearbook 2020*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb2392en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). *The future of food and agriculture: Trends and challenges*. <https://www.fao.org/3/i7959e/i7959e.pdf>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). *Digital agriculture report: Rural transformation and innovation*. FAO. <https://www.fao.org/3/cb9564en/cb9564en.pdf>
- INIA. (2019). *Monitoreo agroclimático y control de plagas en hortalizas de exportación*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias
- Khan, A., Malebary, S. J., Dang, L. M., Binzagr, F., Song, H., & Moon, H. (2024). AI-Enabled Crop Management Framework for Pest Detection Using Visual Sensor Data. *Plants*, 13(5), 653. <https://doi.org/10.3390/plants13050653>
- Kondaveeti, H. K., Kumaravelu, N. K., Vanambathina, S. D., Mathe, S. E., & Vappangi, S. (2021). A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations. *Computer Science Review*, 40, 100364. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100364>
- METER Group. (n.d.). *TEROS 12 Sensor: Soil moisture, temperature, and EC*. <https://www.metergroup.com/environment/products/teros-12/>
- Olabisi, O., & Nofiu, A. (2022). *Principles for the Production of Tomatoes in the Greenhouse*. In IntechOpen eBooks. <https://doi.org/10.5772/intechopen.106975>
- Olivera, C. D. H., Torres, Y. E., Villegas-Huamani, M. M., Gomez, L. M. A., Incahuanaco, F. C., & Carrasco, J. A. A. (2024). Diseño e implementación de un sistema inteligente de riego y monitoreo para cultivos de fresas bajo invernadero en zonas altas de Abancay. *Micaela Revista de Investigación - UNAMBA*, 6(1), 43–50. <https://doi.org/10.57166/micaela.v6.n1.2025.175>

- Rosales V., M., Medina V., C., Brown, J. K., Sepúlveda Ch., G., & Sepúlveda R., P. (2020). *Mosca blanca y virus asociados al tomate* (Boletín INIA N° 224). Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/23089>
- Singh, D., Biswal, A. K., Samanta, D., Singh, V., Kadry, S., Khan, A., & Nam, Y. (2023). Smart high yield tomato cultivation: Precision irrigation system using the Internet of Things. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1239594. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1239594>
- SUBREI. (2022, marzo 3). *SUBREI lanza estudio que mide el impacto de la agroindustria exportadora en la economía chilena*. <https://www.subrei.gob.cl/sala-de-prensa/noticias/detalle-noticias/2022/03/03/subrei-lanza-estudio-que-mide-el-impacto-de-la-agroindustria-exportadora-en-la-econom%C3%ADa-chilena>
- Villagrán, E. A., Jaramillo, J. E., & León-Pacheco, R. I. (2020). Ventilación natural en invernadero con mallas anti-insecto evaluadas con un modelo computacional de fluidos. *Agronomía Mesoamericana*, 709–728. <https://doi.org/10.15517/am.v31i3.40782>
- Zubelzu, S., Bozkurt, S., Ünlükara, A., Kiziloglu, F. M., & Kirnak, H. (2024). Smart irrigation for management of processing tomato: A machine learning approach. *Irrigation Science*. <https://doi.org/10.1007/s00271-024-00993-9>

## Anexos:

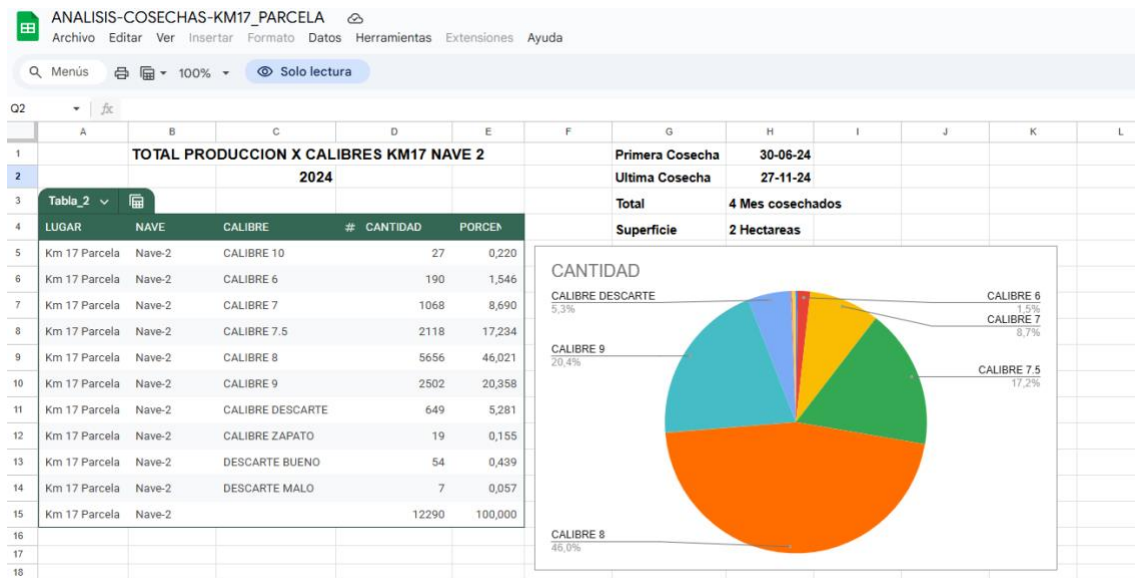
### Anexo 1: Desempeño productivo nave 1.



*Nota: Se presenta el total de los tomates procesados según su calibre respecto a la nave 1.*

*Fuente: Agrícola Aurora Ltda., archivo interno (2024).*

### Anexo 2: Desempeño productivo nave 2.



*Nota: Se presenta el total de los tomates procesados según su calibre respecto a la nave 1.*

*Fuente: Agrícola Aurora Ltda., archivo interno (2024).*

*Anexo 3: Datos sobre la superficie cultivada y plantas por nave.*

PARCELA	NAVE	G. TERRENO	G. PROCESADAS	Superficie	Plantas-comp	Plantas-Nave
Km 17 Olivo	Nave-1-2	4092	3569	3/4 Hectarea	5472	5400
Km 17 Olivo	Nave-3	8916	7607	1 Hectarea	6000	6000
Km 17 Olivo	Total-Olivo	13008	11176			
Km 17 Parcela	Nave-1	6357	5751	3/4 Hectarea	5536	5400
Km 17 Parcela	Nave-2	14461	12278	2 Hectareas	12200	12150
Km 17 Parcela	Total-Parcela	20818	18029			
Km 28 Sobraya	Nave-1	9516	8553	1 Hectarea	8500	8237
Km 28 Sobraya	Nave-3	3437	4590	1/2 Hectarea	3800	3800
Km 28 Sobraya	Total-Km28	12953	13143			
Todas-Parcelas	Todas-Naves	46779	42348			

*Nota: Se presenta los datos de las superficies y cantidad de plantas correspondiente a ambas naves ubicadas en parcela km 17. Fuente: Agrícola Aurora Ltda., archivo interno (2024).*

*Anexo 4: Datos de gamelas cosechadas en terreno y gamelas procesadas*

PARCELA	NAVE	G. TERRENO	G. PROCESADAS
Km 17 Olivo	Nave-1-2	4092	3569
Km 17 Olivo	Nave-3	8916	7607
Km 17 Olivo	Total-Olivo	13008	11176
Km 17 Parcela	Nave-1	6357	5751
Km 17 Parcela	Nave-2	14461	12278
Km 17 Parcela	Total-Parcela	20818	18029
Km 28 Sobraya	Nave-1	9516	8553
Km 28 Sobraya	Nave-3	3437	4590
Km 28 Sobraya	Total-Km28	12953	13143
Todas-Parcelas	Todas-Naves	46779	42348

*Nota: Se presentan los registros de las gamelas cosechadas en terreno v/s la cantidad de gamelas procesadas respecto a los datos de km 17 parcela. Fuente: Agrícola Aurora Ltda., archivo interno (2024).*

**Anexo 5: Desempeño económico de agrícola aurora Ltda.**

AÑO	ID	BRUTO	NETO
2020	5	\$469,115,623.00	\$376,854,945.00
2021	4	\$578,928,664.00	\$475,234,236.00
2022	3	\$446,773,747.00	\$336,632,558.00
2023	6	\$456,919,648.00	\$352,394,207.00
2024	7	\$554,936,370.00	\$463,012,661.00

*Nota:* Se presenta el desempeño de los ingresos respecto a los últimos 5 años de la empresa, en los montos se considera la producción de todos los invernaderos. **Fuente:** Agrícola Aurora Ltda., archivo interno (2024).

**Anexo 6: Desempeño productivo del año 2023 respecto a la nave 1.**

TOTAL PRODUCCION X CALIBRES KM17 NAVE 1							
2023							
LUGAR	NAVE	CALIBRE	CANTIDAD	PORCENTUAL	PRECIO	INGRESO	
Km 17 Parcela	Nave-1	CALIBRE 10	90	1,503	15.155	1.363.950	
Km 17 Parcela	Nave-1	CALIBRE 5	11	0,175	5.612	61.732	
Km 17 Parcela	Nave-1	CALIBRE 6	170	2,831	8.072	1.372.240	
Km 17 Parcela	Nave-1	CALIBRE 7	930	15,484	9.887	9.194.910	
Km 17 Parcela	Nave-1	CALIBRE 7.5	1147	19,084	12.384	14.204.448	
Km 17 Parcela	Nave-1	CALIBRE 8	2293	38,168	13.910	31.895.630	
Km 17 Parcela	Nave-1	CALIBRE 9	1287	21,426	14.346	18.463.302	
Km 17 Parcela	Nave-1	CALIBRE DESCARTE	57	0,944	11.604	661.428	
Km 17 Parcela	Nave-1	CALIBRE ZAPATO	23	0,384	13.475	309.925	
Km 17 Parcela	Nave-1		6008	100		77.527.565	


*Nota:* Se presenta la información respecto a la producción del año 2023 con sus ingreso, nave 1. **Fuente:** Agrícola Aurora Ltda., archivo interno (2024).

Anexo 7: Desempeño productivo del año 2023 respecto a la nave 2.

	A	B	C	D	E	F	G
1	<b>TOTAL PRODUCCION X CALIBRES KM17 NAVE 2</b>						
2	<b>2024</b>						
3							
4	LUGAR	NAVE	CALIBRE	CANTIDAD	PORCENTUAL	PRECIO	INGRESO
5	Km 17 Parcela	Nave-2	CALIBRE 10	28	0,22	15.155	424.340
6	Km 17 Parcela	Nave-2	CALIBRE 6	200	1,546	8.072	1.614.400
7	Km 17 Parcela	Nave-2	CALIBRE 7	1121	8,69	9.887	11.083.327
8	Km 17 Parcela	Nave-2	CALIBRE 7.5	2224	17,234	12.384	27.542.016
9	Km 17 Parcela	Nave-2	CALIBRE 8	5939	46,021	13.910	82.611.490
10	Km 17 Parcela	Nave-2	CALIBRE 9	2627	20,358	14.346	37.686.942
11	Km 17 Parcela	Nave-2	CALIBRE DESCARTE	681	5,281	11.604	7.902.324
12	Km 17 Parcela	Nave-2	CALIBRE ZAPATO	20	0,155	13.475	269.500
13	Km 17 Parcela	Nave-2	DESCARTE BUENO	57	0,439	9.000	513.000
14	Km 17 Parcela	Nave-2	DESCARTE MALO	7	0,057	6.000	42.000
15	Km 17 Parcela	Nave-2		12904	100		169.689.339

*Nota:* Se presenta la información respecto a la producción del año 2023 con su ingreso, nave 2. *Fuente:* Agrícola Aurora Ltda., archivo interno (2024).

Anexo 8: Cotización de sensor Teros 12



**MORPHO**

MORPHO LATINOAMERICA LIMITADA  
LONGITUDINAL SUR 215 BUIN STGO - Buin  
Fono: 28216095 - eMail: contacto1@morph2ola.com  
www.morph2ola.com

**RUT: 76.019.963-K**  
**COTIZACIÓN**

**N° 25.358**

Razón social	AGRICOLA AURORA SPA	RUT	76.665.320-0
Dirección	VALLE DE AZAPA KM 17	Fecha	06/06/2025
Comuna	ARICA	Fono	
Forma de pago	TRANSF. BANCARIA	Plazo entrega	
At:	MARIANA TICONA	Validez	10 días
Comentarios	PLAZO DE ENTREGA A CONVENIR		

Producto	Cantidad	Precio Unitario	Total
40416 ZSC Bluetooth Sensor Interface	1,0	\$ 154.000	\$ 154.000
40933 TEROS-12 VWC, temperature & EC w/ 3.5 mm stereo plug, 5m cable	1,0	\$ 437.052	\$ 437.052
1040 FLETE II , III , IV , V , VI , VII , VIII , IX , X REGIÓN y RM	1,0	\$ 15.000	\$ 15.000
			Neto
			606.052
			IVA
			115.150
			Total
			721.202
<b>VALOR TOTAL OFERTADO NETO</b>			606.052
			IVA
			115.150
			<b>TOTAL</b>
			721.202

Datos para transferencia o depósito:  
Morph2O LatinoAmerica Limitada  
Rut 76.019.963-K  
Banco Santander Cuenta Corriente N° 82-18823-5  
Banco de Chile Cuenta Corriente N° 851-02326-06  
Enviar comprobante a : fbahamondes@morph2ola.com  
Enviar comprobante a : gdominguez@morph2ola.com

*Fuente:* Cotización N° 25.358 emitida por Morpho Latinoamérica Ltda., dirigida a Agrícola Aurora SPA, 06 de junio de 2025.

## *Anexo 9: Precio del sensor Drill & Drope*

### Orden de Compra. N°5485-643-SE23 EQUIPOS DE MONITOREO DE HUMEDAD DE SUELO, SENSORES"

Recuerde que el responsable del pago es UNIVERSIDAD DE CHILE

- ▶ 1.- Información de la Orden de Compra
- ▶ 2.- Datos del Comprador
- ▶ 3.- Datos de Pago y Facturación
- ▶ 4.- Otras Especificaciones
- ▶ 5.- Datos del Proveedor
- ▶ 6.- Productos/Servicios
- ▶ 7.- Demandas ante el Tribunal de Contratación Pública



	observación de superficie de temperatu					1.036.620,00	0,00		14.512.680	14.512.680
41114408	Aparatos de observación de superficie de temperatu	14	Unidad	MEDIDOR VOLUMETRICO ARAD 1/2		\$ 239.220,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 3.349.080	\$ 3.349.080
70131502	Servicios de conservación o protección del suelo	14	Unidad	SUSCRIPCIÓN PLATAFORMA CERES 16 MESES		\$ 157.601,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 2.206.414	\$ 2.206.411
70131502	Servicios de conservación o protección del suelo	14	Unidad	PLAN DE DATOS MZM 16 MESES		\$ 191.376,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 2.679.264	\$ 2.679.264
70131502	Servicios de conservación o protección del suelo	14	Unidad	INSTALACIÓN TELEMETRÍA (ELEMENTOS TERRENO)		\$ 150.766,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 2.110.724	\$ 2.110.727
41114408	Aparatos de observación de superficie de temperatu	14	Unidad	DRILL & DROP PROBE, 90 CM MOISTURE, SDI12		\$ 1.087.654,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 15.227.156	\$ 15.227.150

*Fuente: Dirección de Compras y Contratación Pública (2024), a partir de Mercado Público.*

## *Anexo 10: Registro del consumo hídrico de la parcela, 2024.*

Informe Hídrico - Agrícola Aurora - FO -1501-419 OCA

Archivo Editar Ver Herramientas Ayuda

Solicitar permiso para editar Compartir Iniciar sesión

### RESULTADOS DE INFORME

Respecto a los antecedentes revisados, sobre la disponibilidad hídrica del predio de propiedad de la Señora Aurora Marca, ubicado en el Km 18 del Valle de Azapa, rol de la propiedad 3430-53, con una superficie total de 3,4 hectáreas, se realiza un análisis de la disponibilidad de agua entregando las siguientes conclusiones:

- La demanda de agua en el predio se estima en un total **35.552 metros cúbicos al año**.
- La oferta de agua desde el punto de vista de derechos asignados corresponde a **39.420 metros cúbicos al año**.
- El 90,2 % de la demanda de agua es cubierto por los derechos de agua provenientes de la extracción de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas.
- De acuerdo con el balance hídrico realizado, **la Señora Aurora Marca dispone de los recursos hídricos subterráneos suficientes para abastecer el cultivo, sin necesidad de disponer de nuevos recursos.**
- El predio de la Señora Aurora Marca, se encuentre cumpliendo con las normativas de la Buenas Prácticas Agrícolas, con lo cual cuenta con el registro de horas de riego desde el inicio del cultivo hasta el final del cultivo, lo que justificaría un balance hídrico desde el mes de abril hasta octubre de cada temporada.

*Fuente: Registro interno de Agrícola Aurora Limitada (2024).*