

Informe Avance/Final

**“Plataforma de Gestión de Biofiltros Hídricos”**

Equipo de proyecto de Capstone

**Docente**

Fabián Alcántara

**Equipo alumnos**

Alejandro Rivera

Mauricio Silva

Evelyn Soto

**Sede**

Duoc UC, San Bernardo

Santiago, 11 de Septiembre de 2025

**Índice**

[**Resumen 3**](#_heading=h.ks1cqoqu3m0b)

[**Abstract 4**](#_heading=h.jkp9wxb1acr0)

[**1. Planteamiento del Problema / Necesidad u Oportunidad detectada 5**](#_heading=h.3u7h8g65a21q)

[**2. Justificación 6**](#_heading=h.idj3fslpdudh)

[**4. Hipótesis de trabajo 9**](#_heading=h.ayzlds4apbdr)

[**5. Objetivos 10**](#_heading=h.fk0ssbw5ilx0)

[**a. Objetivo general 10**](#_heading=h.q6m4tj1y55oy)

[**b. Objetivos Específicos 10**](#_heading=h.ejemp4dyz4t9)

[**6. Metodología 11**](#_heading=h.t2kfq6uylv6v)

[**7. Resultados y productos esperados/Discusión 14**](#_heading=h.qlr10ystdcwp)

[**8. Alcance e Impacto / vinculación con entorno 16**](#_heading=h.w8dc52a6yvy7)

[**9. Mecanismos de Transferencia 18**](#_heading=h.9nkecf1tuha3)

[**10. Modelo de Negocio / Sustentabilidad del Proyecto 20**](#_heading=h.73qib1ui6ogh)

[**11. Difusión de resultados 22**](#_heading=h.qs7epqhbqpur)

[**12. Entidades Participantes 23**](#_heading=h.lss2bf4f7u2m)

[**13. Conclusiones 24**](#_heading=h.4a946z9perg1)

[**14. Bibliografía 25**](#_heading=h.8lp2tjcbekn3)

# **Resumen**

El proyecto busca solucionar la problemática de la reutilización del agua en la agricultura frutícola, específicamente en la comuna de Isla de Maipo. Esto se trabajará en el contexto qué enfrenta el país en la actualidad el cuál es la escasez hídrica, promoviendo así el uso eficiente de este recurso y el aprovechamiento de aguas grises qué tratadas se vuelven aptas para el riego de cosechas.

La propuesta consiste en evaluar la eficiencia de los biofiltros aplicados para el tratamiento de las aguas usadas para diferentes fines domiciliarios, con el objetivo de transformarlas en una alternativa viable para la agricultura así y a partir de esto plantear una solución informática qué apoye la toma de decisiones respecto a este importante recurso.

La relevancia se centrará en el desarrollo de un sistema tecnológico integrado qué combine software, gestión de datos y visualización a tiempo real. El sistema contempla módulos de análisis y monitoreo, además de diferentes alertas qué permitirá al agricultor conocer de manera intuitiva la calidad óptima del agua, con ésto se busca ofrecer una interfaz amigable qué facilite la interpretación de la información y guíe a los analistas en encontrar soluciones más eficientes para los biofiltros.

Esta solución también aplicará tecnologías actuales para asegurar una escalabilidad, adaptabilidad al mercado y el cumplimiento de estándares de calidad.

**Palabras clave:** agricultura, reutilización, biofiltros, visualización, datos.

# **Abstract**

The project seeks to solve the problem of water reuse in fruit farming, specifically in the municipality of Isla de Maipo. This will be addressed in the context of the water shortage currently facing the country, promoting the efficient use of this resource and the use of treated gray water, which becomes suitable for crop irrigation.

The proposal consists of evaluating the efficiency of biofilters applied to the treatment of water used for different domestic purposes, with the aim of transforming it into a viable alternative for agriculture and, based on this, proposing a computer solution that supports decision-making regarding this important resource.

The focus will be on the development of an integrated technological system that combines software, data management, and real-time visualization. The system includes analysis and monitoring modules, as well as different alerts that will allow farmers to intuitively know the optimal water quality. The aim is to offer a user-friendly and intuitive interface that facilitates the interpretation of information and guides analysts in finding more efficient solutions for biofilters.

This solution will also apply current technologies to ensure scalability, market adaptability, and compliance with quality standards.

**Key words:** farming, reuse , biofilters , visualization, data.

# **Planteamiento del Problema / Necesidad u Oportunidad detectada**

La agricultura chilena enfrenta actualmente una de sus mayores dificultades debido a la extrema escasez hídrica, suceso que afecta directamente a la producción frutícola. En la comuna de Isla de Maipo, la disponibilidad del agua se vio reducida durante los últimos años por la problemática actual, lo que obliga a los agricultores a buscar diferentes alternativas que permitan una mayor eficiencia para su gestión.

Una de las principales alternativas identificadas se debe a la Ley de aguas grises, la cual permite el uso de estas aguas mediante un reglamento que dicta las condiciones sanitarias y sus posibles usos mientras estas sean tratadas. Sin embargo, la falta de herramientas tecnológicas para evaluar la calidad a tiempo real de estas aguas y medir la eficiencia de los biofiltros aplicados no ha permitido que este mercado crezca y sea un aporte para la comunidad agricultora.

Teniendo en cuenta el contexto anteriormente mencionado, se logra identificar una gran oportunidad de mejora centrada en la incorporación de soluciones tecnológicas que permitan medir y optimizar el uso de estas aguas grises en la agricultura, ya que los agricultores carecen de las herramientas necesarias para una entrega de información confiable sobre la calidad del agua tratada. En el país actualmente no se encuentra un estudio extenso sobre los biofiltros y su eficiencia en el tratado de aguas grises.

En consecuencia, se hace necesario desarrollar un sistema que integre la gestión de datos, el análisis a tiempo real y la visualización de indicadores de calidad, con el fin de entregar a los agricultores herramientas confiables para la toma de decisiones; sin embargo, también esta plataforma puede ayudar a la investigación de la eficiencia de los biofiltros, así encontrando patrones de plantas que ayuden a mejorar la calidad del agua tratada de forma más eficiente.

# **Justificación**

Este aspecto debe dar respuesta a la siguiente pregunta ¿cuáles son las razones o motivos que resultan claves para realizar el proyecto? Se deben establecer criterios relevantes para justificar la investigación, por ejemplo: relevancia social, económica, implicancias prácticas (ayudará a resolver algún problema práctico), etc.

Desde una perspectiva social, el proyecto contribuye a enfrentar la escasez de agua que afecta gran parte del país, particularmente en las zonas agrícolas, permitiendo diferentes formas de hidratar los cultivos, además de fomentar el uso responsable de este valioso recurso.

En el sector económico, la implementación de sistemas de monitoreo y optimización del agua puede generar una gran baja de recursos monetarios para los agricultores; esto se traduce en mayor productividad por un menor costo de mantención, pero sin bajar la calidad de lo trabajado, ya que todo se debe regir mediante la ley establecida.

Desde un punto de vista práctico, el proyecto ofrecerá una herramienta innovadora en el área agrícola, ya que se integrará gestión de datos, análisis a tiempo real y visualización de indicadores de calidad. Este sistema no solo ofrecerá una ayuda en la toma de decisiones, sino que podrá ayudar a mejorar el uso de los biofiltros en Chile, generando evidencia importante para investigaciones futuras.

1. **Estado del Arte / Situación Actual**

En el país, el uso y aprovechamiento de aguas grises ha adquirido relevancia en los últimos años debido a la escasez hídrica, obligando al sector a buscar nuevas estrategias sostenibles en la agricultura. A nivel normativo, la Ley N.° 21.075 establece regulaciones para la recolección y reutilización de aguas grises, permitiendo su uso en la agricultura, especialmente en cultivos frutales como en el caso actual (Cámara de Diputados de Chile, 2024; Senado de Chile, 2024) . Esta ley abre oportunidades para implementar soluciones innovadoras que contribuyan a optimizar el uso de los recursos.

Diversos proyectos de investigación e innovación han investigado el tema. El Instituto de Investigaciones Agropecuarias desarrolló un sistema de 27 biofiltros domiciliarios en la región de O'Higgins, destinados a una pequeña agricultura como una estrategia a tomar ante el cambio climático (INIA 2024). Por otra parte, Yaku, una startup con base tecnológica de la Universidad Católica, diseñó biofiltros sustentables que permiten utilizar aguas grises en el riego, generando un impacto positivo en la reducción del consumo de agua potable (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2021).

Otros estudios han investigado alternativas naturales. La Universidad Austral de Chile demostró que los humedales artificiales pueden recuperar hasta el 80% del agua residual, eliminando contaminantes, provocando que el agua se vuelva apta para el uso agrícola (Biobío Chile, 2023). Sin embargo, algunas localidades han promovido biofiltros comunitarios de bajo costo en los cuales se usan grava, plantas acuáticas y diferentes microorganismos para tratar el agua (Tecnologías Locales, 2022).

Finalmente, en el área del monitoreo de datos a tiempo real en el ámbito agrícola, existe un proyecto desarrollado por INIA. Este sistema se encuentra en la región de Coquimbo, exactamente en las provincias de Elqui y Choapa; se incorporaron diferentes dispositivos para evaluar el agua en canales de riego, de esta forma entregando datos de manera inmediata a los agricultores (INIA, 2025).

Tomando en cuenta los avances anteriormente mencionados, aún existen vacíos, gracias a la gran falta de soluciones tecnológicas, provocando que solo un cierto sector limitado tenga aplicada este tipo de alternativas. El proyecto que actualmente se está desarrollando busca erradicar ese vacío y aprovechar la gran oportunidad que se nos presenta mediante un enfoque innovador.

En conclusión, a pesar de que las leyes del país logran un gran aporte y oportunidades para ayudar o investigar las diferentes formas de enfrentar la crisis de escasez, no hay suficientes proyectos dedicados a resolver la necesidad generada en este contexto.

# **Hipótesis de trabajo**

La presente hipótesis se formula en base al problema identificado en la fruticultura de Isla de Maipo, donde la escasez hídrica y el uso limitado de aguas grises tratadas representan un desafío para la sostenibilidad agrícola. A través de la implementación de biofiltros con distintas especies vegetales y el uso de un sistema de monitoreo, se busca determinar de manera objetiva la eficiencia en la mejora de la calidad del agua y su potencial de reutilización en la producción frutícola.

**Unidad de Análisis:** Biofiltros hídricos con especies vegetales (hierba del sapo, carrizo enano, papiro enano).

**Variables:**

* **Uso del sistema de monitoreo** → observable y medible (registro de parámetros de calidad de agua: pH, conductividad, turbidez, oxígeno disuelto y SST).
* **Eficiencia en la mejora del agua** → observable y medible (reducción de contaminantes y cumplimiento de normativa sanitaria).

**Correlación:**

El uso del sistema de monitoreo en los biofiltros hídricos con especies vegetales permite mejorar la calidad del agua tratada y optimizar su reutilización en la fruticultura de Isla de Maipo.

# **Objetivos**

## **Objetivo general**

Desarrollar un sistema tecnológico basado en el monitoreo de datos a tiempo real qué integre diferentes módulos de gestión y análisis de datos, con el fin de investigar la eficiencia de los biofiltros aplicados en el tratamiento de aguas grises, entregando información en diferentes paneles visuales interactivos qué ayuden a la toma de decisiones, así contribuyendo al uso de aguas renovables ante la crisis de escasez qué tiene el país actualmente.

## **Objetivos Específicos**

* Definir los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema, con el propósito de establecer un camino organizado para lograr el fin.
* Diseñar y desarrollar la arquitectura del backend y la base de datos para asegurar un procesamiento y almacenamiento óptimo para la confiabilidad de los datos
* Implementar diferentes vistas interactivas qué permitan visualizar a tiempo real los datos recibidos de los biofiltros, así poder indicar la calidad del agua y ayudar a la interpretación de los datos para la toma de decisiones
* Entrenar y evaluar diferentes modelos de clasificación, con el propósito de anticipar la calidad del agua tratada y medir la eficiencia de los biofiltros para encontrar diferentes patrones de uso
* Validar el sistema a través de pruebas de funcionamiento y documentar el desarrollo con el fin de garantizar su escalabilidad y funcionalidad.

# **Metodología**

**Enfoque Metodológico**

El desarrollo del proyecto se rige bajo la metodología ágil Scrum, seleccionada por su naturaleza iterativa e incremental, ideal para proyectos de desarrollo software donde los requisitos pueden evolucionar y se prioriza la entrega de valor funcional en ciclos cortos. Este enfoque permite una adaptación constante al feedback recibido por parte de la entidad solicitante, Proesal Isla de Maipo, y los usuarios finales (agricultores e investigadores).

El trabajo se organiza en Sprints de cuatro semanas, periodos de tiempo fijos al final de los cuales se entrega un incremento de software potencialmente entregable. El proceso se gestiona mediante la herramienta Trello, utilizada para mantener el Product Backlog y los Sprint Backlogs, facilitando la visualización del trabajo y el seguimiento del progreso.

**Técnicas y Métodos de Desarrollo e Investigación**

El proyecto emplea un enfoque mixto, combinando técnicas de investigación aplicada y métodos de desarrollo de software:

* **Investigación Aplicada (Cualitativa y Cuantitativa)**: Se trabaja con datos cuantitativos provenientes de los sensores (pH, conductividad, OD, etc.), los cuales son procesados estadísticamente para establecer correlaciones, tendencias y para entrenar modelos predictivos. Paralelamente, se recoge feedback cualitativo a través de entrevistas y pruebas de usabilidad con los agricultores, lo que permite ajustar la interfaz y la utilidad del dashboard a sus necesidades reales.
* **Muestreo**: El muestreo de datos es por conveniencia y accesibilidad, dado que el piloto se implementará en colaboración con Proesal y un grupo específico de agricultores de Isla de Maipo que ya cuentan con biofiltros. Los datos serán capturados en intervalos de tiempo configurables (ej. cada 15 minutos) para garantizar una base de datos suficientemente granular para el análisis.

**Instrumentos y Técnicas de Medición:**

* **Hardware**: Sensores de parámetros de agua calibrados, microcontroladores Arduino y módulos de comunicación WiFi.
* **Software para Análisis:** El stack de ciencia de datos de Python (Pandas, NumPy, Scikit-learn) es el instrumento principal para la limpieza, el análisis exploratorio (EDA) y el desarrollo de modelos de machine learning. Jupyter Notebook es la herramienta central para el prototipado y la experimentación.
* **Instrumentos de Validación:** La validación del sistema se realizará mediante pruebas unitarias (con pytest), pruebas de integración y una prueba piloto en terreno. La calidad del agua tratada será validada mediante análisis de laboratorio realizados por un especialista externo, contrastando los datos de los sensores con métodos tradicionales.

**Procedimiento y Planificación por Etapas**

El procedimiento se divide en tres Sprints principales, con metas y recursos específicos:

**Sprint 1: "Preparación y Fundamentos" (28 agosto - 25 septiembre)**

**Meta:** Establecer los cimientos técnicos y conceptuales del proyecto.

**Tareas Clave:**

1. Definición y priorización final de requerimientos funcionales y no funcionales.
2. Investigación y selección del stack tecnológico (FastAPI, Vue.js, MySQL).
3. Diseño de la arquitectura de software y de la base de datos.
4. Recolección y preparación de datasets de prueba para el desarrollo inicial.
5. Configuración del entorno de desarrollo y del repositorio de código (Git).

**Recursos**: Computadores de desarrollo, acceso a documentación técnica, reuniones de coordinación con el equipo de agronomía.

**Sprint 2: "Desarrollo del Núcleo" (26 septiembre - 23 octubre)**

**Meta:** Desarrollar e integrar los componentes centrales del sistema.

T**areas Clave:**

1. Desarrollo de la API REST con FastAPI (endpoints para /datos, /modelos, /reportes).
2. Desarrollo de la lógica de conexión y consumo de datos desde la API de ThingSpeak.
3. Implementación del primer modelo predictivo de eficiencia con Scikit-learn.
4. Limpieza, preprocesamiento y almacenamiento persistente de datos en MySQL.
5. Desarrollo de interfaces básicas del dashboard (Vue.js) para visualización.

**Recursos**: Servicios en la nube (ThingSpeak), librerías de Python (Pandas, Sklearn), servidor de base de datos.

**Sprint 3: "Integración Total y Despliegue" (24 octubre - 20 noviembre)**

**Meta:** Integrar todos los componentes, probar el sistema y prepararlo para su despliegue piloto.

**Tareas Clave:**

1. Unificación completa del frontend, backend y base de datos.
2. Implementación de autenticación de usuarios y roles.
3. Ciclos exhaustivos de pruebas (unitarias, de integración, de usabilidad).
4. Despliegue en un entorno de preproducción (entorno Piloto).
5. Validación externa con agricultores y con el especialista químico.
6. Documentación técnica y manual de usuario.

**Recursos**: Servidor de despliegue (VPS o cloud), acceso a los biofiltros piloto en Isla de Maipo, participación de usuarios finales para pruebas

# **Resultados y productos esperados/Discusión**

Si bien el proyecto se encuentra en su fase inicial, el proceso de diseño y planificación ha arrojado productos concretos que constituyen la base fundamental para la etapa de experimentación:

**Producto 1: “Documento de especificación de requerimientos”**

Se obtuvo un documento detallado que prioriza las funcionalidades del sistema, validado con la entidad solicitante. Esto evidencia el cumplimiento del objetivo de alineamiento con las necesidades del usuario final y los criterios de la Ley de Aguas Grises.

**Producto 2: “Arquitectura de software y datos definida”**

Se estableció el diseño completo del sistema, incluyendo los flujos de datos desde la captura por sensores hasta la visualización. Este producto evidencia el cumplimiento del objetivo de establecer una base técnica sólida, escalable y confiable.

**Producto 3: “Dataset de prueba sintético”**

Se generó un conjunto de datos simulado (datos\_sensores.csv) que replica la estructura y relaciones de las variables clave del sistema (OD, pH, conductividad, turbidez, etc.). Este dataset es una evidencia concreta que servirá para el desarrollo y prueba inicial de los algoritmos de análisis en la siguiente fase, antes de la obtención de datos reales

**Discusión de los avances en relación a la hipótesis**

La hipótesis central plantea que es posible desarrollar un sistema de monitoreo accesible y confiable que demuestre la eficiencia de biofiltros. Aunque aún no puede verificarse empíricamente —pues depende de datos del piloto en terreno—, los avances metodológicos y técnicos obtenidos en esta fase sentarán las bases necesarias para su futura validación. El diseño arquitectónico y la definición precisa de variables a medir fortalecen la confiabilidad de los datos venideros, lo que indica que el proyecto avanza de forma sólida hacia la etapa experimental.

**Hallazgos y consideraciones relevantes**

* **Hallazgo 1 – Levantamiento de requerimientos:** Se evidenció que una comprensión superficial de protocolos de calibración de los dispositivos y criterios de aceptación moldeables dado que es una iniciativa pionera. Esto subraya la necesidad de integración y comunicación continua.
* **Hallazgo 2 – Modularidad técnica:** La posibilidad de errores como deriva de sensores o fallas de comunicación exige una arquitectura modular, permitiendo reemplazos sin afectar el sistema completo. Es clave para la sustentabilidad técnica.

Aunque los resultados son preliminares, son positivos y se traducen en productos concretos que evidencian el avance hacia los objetivos. La preparación realizada maximiza las probabilidades de éxito en la validación experimental de la hipótesis en las siguientes fases.

# **Alcance e Impacto / vinculación con entorno**

El proyecto Plataforma de Monitoreo de Biofiltros Hídricos en Isla de Maipo beneficia de manera directa a los agricultores locales, quienes podrán contar con información confiable y en tiempo real sobre la eficiencia de los biofiltros en el tratamiento de aguas grises. Esto contribuye a un uso más eficiente del recurso hídrico, fortaleciendo la sustentabilidad de la fruticultura y generando prácticas productivas más responsables frente a la escasez de agua que afecta a la zona.

A nivel de entorno, la iniciativa se vincula con diversos actores:

* **Agricultores de la zona de Isla de Maipo**, como beneficiarios principales.
* **Municipalidad de Isla de Maipo**, que impulsa políticas locales de desarrollo sostenible y gestión de recursos hídricos.
* **Entidades gubernamentales** relacionadas con normativas de aguas y sanidad (ej. Dirección General de Aguas, Ministerio de Agricultura).
* **Instituciones de Educación Superior (IES)**, en particular la carrera de Ingeniería en Informática, como responsable de la investigación aplicada y el desarrollo tecnológico.
* **Potencial vinculación futura con empresas del sector agrícola y agroindustrial**, interesadas en implementar soluciones tecnológicas de gestión hídrica.

El impacto del proyecto también es relevante en el ámbito académico. Se vincula directamente con la **c**arrera de Ingeniería en Informática**,** pues permite aplicar conocimientos en desarrollo de software, gestión de datos y visualización de información a un caso real con impacto social y ambiental. A su vez, fortalece la formación profesional al integrar competencias de innovación tecnológica con un problema concreto del sector agrícola.

De manera transversal, los resultados esperados generan un efecto positivo en el área disciplinar abordada, al demostrar cómo la informática aplicada puede contribuir a la sustentabilidad hídrica y agrícola. Esto abre la posibilidad de continuar la investigación aplicada en colaboración con actores externos y extender la solución a otras zonas agrícolas que enfrentan la misma problemática de escasez hídrica.

# **Mecanismos de Transferencia**

Los resultados logrados en el proyecto *Plataforma de Monitoreo de Biofiltros Hídricos en Isla de Maipo* serán transferidos a distintos ámbitos mediante estrategias de difusión, aplicación práctica y resguardo de la innovación.

1. **Transferencia a la docencia** El desarrollo del sistema servirá como caso aplicado en la carrera de Ingeniería en Informática, integrándose en asignaturas vinculadas a bases de datos, programación, análisis de datos y sustentabilidad tecnológica. De esta forma, los estudiantes podrán aprender a partir de un proyecto real, fortaleciendo competencias en innovación y vinculación con el entorno.
2. **Transferencia a la industria y comunidad** La solución tecnológica será compartida con agricultores de Isla de Maipo como usuarios directos, a través de capacitaciones y demostraciones del sistema de monitoreo. Asimismo, el proyecto puede ser replicado en otras zonas agrícolas con problemáticas similares de escasez hídrica, extendiendo su impacto al sector agroindustrial y promoviendo prácticas sustentables.
3. **Difusión en eventos académicos y técnicos** Se proyecta la participación en congresos, seminarios, encuentros de innovación agrícola y tecnológica, y *Demo Days*, con el fin de presentar los resultados obtenidos y difundir las posibilidades de mejora en la gestión hídrica mediante biofiltros monitoreados digitalmente. Esto permitirá mostrar la solución a un público diverso, recibir retroalimentación y generar oportunidades de colaboración y escalamiento.
4. **Difusión en medios digitales y redes sociales** Se contempla la difusión del proyecto a través de plataformas digitales de alcance local y comunitario, como páginas web institucionales (por ejemplo, la municipalidad de Isla de Maipo), redes sociales y portales informativos. Esto permitirá llegar de manera directa a agricultores, estudiantes, investigadores y público general interesado en la gestión hídrica y la innovación tecnológica.
5. **Protección y resguardo de la innovación**Dado el carácter tecnológico de la solución, se evaluará el registro de derechos de autor del software desarrollado, y, de ser pertinente, el registro de marca para la plataforma, lo que permitirá proteger la propiedad intelectual del proyecto y asegurar su proyección futura.

En conjunto, estos mecanismos garantizan que el proyecto no solo tenga impacto en la comunidad agrícola de Isla de Maipo, sino que además contribuya al ámbito académico, genere conocimiento transferible a la industria y fortalezca el compromiso institucional con la innovación y la sustentabilidad.

# **Modelo de Negocio / Sustentabilidad del Proyecto**

El proyecto Prodesal Isla de Maipo constituye un sistema integral de monitoreo de biofiltros para la reutilización de aguas grises en fruticultura, que combina hardware, software y análisis de datos para optimizar el uso del recurso hídrico. A diferencia de los sistemas tradicionales de riego o tratamiento de aguas grises, este proyecto ofrece monitoreo en tiempo real, bases de datos históricas para análisis de tendencias y visualizaciones simplificadas para facilitar la toma de decisiones. De esta manera, permite a los agricultores reducir riesgos, anticipar mantenimientos y cumplir con normativas vigentes, proporcionando un nivel de control y eficiencia que no se encuentra en soluciones aisladas.

El valor generado por el proyecto se dirige a distintos actores clave. Para los agricultores, la plataforma proporciona información clara sobre la calidad del agua, optimiza la gestión de los biofiltros y facilita el acceso a fondos estatales, como los otorgados por INDAP, para proyectos de riego sustentable. Para la investigación, la iniciativa produce la primera base de datos científica de biofiltros vegetales en Chile, permitiendo la generación de conocimiento, publicaciones científicas y postulación a fondos CORFO/Innova. Finalmente, para el recurso hídrico y el medio ambiente, el proyecto promueve la reutilización eficiente del agua, contribuyendo a la sustentabilidad agrícola y a la resiliencia de la producción frutícola frente a la escasez hídrica.

En términos de captura de valor, el modelo de negocio se fundamenta en un esquema mixto: servicios de suscripción (SaaS) para acceso a la plataforma y reportes avanzados, venta de kits de sensores con instalación y consultoría especializada sobre optimización de biofiltros y gestión del riego basada en datos. Este enfoque permite que los beneficios económicos se traduzcan en ahorro de agua, reducción de costos operativos y optimización de la producción, mientras se generan ingresos recurrentes para la institución o empresa responsable del sistema.

Para garantizar la sustentabilidad del proyecto más allá del MVP, se ha diseñado un enfoque integral. La alianza con Proesal Isla de Maipo asegura un canal de adopción directo con agricultores, mientras que la arquitectura técnica escalable permite migrar desde ThingSpeak a servidores dedicados o desarrollar aplicaciones móviles según la demanda y el financiamiento. Adicionalmente, el valor científico y la base de datos generada constituyen un activo estratégico que facilita la postulación a nuevos fondos de investigación y desarrollo. Finalmente, la participación activa de la comunidad agrícola garantiza retroalimentación constante y adopción sostenida del sistema, asegurando que el proyecto se mantenga vigente, útil y económicamente viable.

En conjunto, estas estrategias permiten que el proyecto funcione como una herramienta escalable y sostenible, con un modelo de negocio claro y un impacto medible tanto en los agricultores como en la gestión de recursos hídricos y la investigación científica.

# **Difusión de resultados**

La difusión del proyecto se llevará a cabo principalmente a través de diferentes estancias académicas, con el fin de dar a conocer los diferentes avances de lo desarrollado, viendo su impacto y aporte a la gestión de aguas grises, Durante su tiempo de desarrollo, se realizarán diferentes presentaciones en clases o en diferentes momentos en horario académico, lo qué permitirá difundir los diferentes avances realizados durante este periodo.

También todo esto se complementará con reuniones con personas vinculadas directamente al área de agricultores, esto se hará en el CITT, donde expondremos los objetivos y los futuros alcances del sistema a trabajadores directos, dando así una sensación de pertenencia al proyecto, permitiendo recibir retroalimentación directa de agricultores los cuales enfrentan personalmente este problema la momento de realizar su labor diario.

# **Entidades Participantes**

En el desarrollo del proyecto participa activamente el programa llamado Proesal}, una iniciativa qué se ejecuta desde el 2023, se trata de un piloto de humedales artificiales para evaluar el tratamiento de aguas grises mediante diferentes biofiltros vegetales.

Proesal actúa directamente como socio estratégico y nos provee un contexto real, permitiendo la entrega de una infraestructura de biofiltros y datos obtenidos a través de este proceso de trabajo, añadiendo qué nos ofrece constante comunicación para resolver nuestras dudas durante el proceso.

# **Conclusiones**

Este informe de avance refleja el progreso sustancial logrado en la Fase de Preparación y Fundamentos del proyecto, cumpliendo íntegramente los objetivos planteados. Aunque el desarrollo está en una etapa temprana, los resultados permiten inferencias sólidas sobre su viabilidad y dirección.

**Resultados e Inferencias por Objetivo**

El primer objetivo fue la definición exhaustiva de requerimientos, logrando un documento técnico y funcional validado con la entidad solicitante. Esto asegura que el desarrollo futuro estará alineado con las necesidades reales del sector, minimizando desviaciones. El segundo objetivo, centrado en establecer una arquitectura escalable y robusta, proporciona un marco confiable que reduce riesgos técnicos y facilita la integración de componentes.

Respecto a la hipótesis central —desarrollar un sistema de monitoreo accesible y confiable que demuestre la eficiencia de biofiltros vegetales en el tratamiento de aguas grises en fruticultura— aún no puede comprobarse empíricamente, ya que se requieren datos del piloto en terreno. Sin embargo, la preparación metodológica y técnica, junto con el diseño arquitectónico, la selección de sensores y la planificación del procesamiento de datos, constituyen una base sólida para su validación en fases posteriores.

**Lecciones Aprendidas**

Esta fase dejó aprendizajes clave: la importancia crítica de un levantamiento de requerimientos minucioso; el valor de la integración interdisciplinaria con el equipo de agronomía, que exige comunicación fluida y lenguaje común; y la necesidad de una arquitectura modular, ante posibles cambios en sensores o plataformas externas.

**Síntesis**

El proyecto avanza con solvencia hacia sus metas. Los resultados preliminares son positivos y permiten proyectar con optimismo el próximo sprint de desarrollo, enfocado en la construcción de los componentes centrales y la obtención de los primeros datos de prueba para validar la hipótesis.

# **Bibliografía**

BNC. (2024). Proyecto que fomenta la reutilización de aguas grises en la agricultura. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1115066>

Hacienda. (2023). Ministros aprueban avanzar en una ley que permita regar cultivos agrícolas con agua reciclada. <https://www.hacienda.cl/subsecretaria/noticias/regar-cultivos-agua-reciclada>

Biobío Chile. (2023, 19 de abril). Estudio demuestra que 80% de aguas residuales en humedales depuradores pueden ser recuperadas y usadas. <https://www.biobiochile.cl/especial/aqui-tierra/noticias/2023/04/19/estudio-demuestra-que-80-de-aguas-residuales-en-humedales-depuradores-pueden-ser-recuperadas-y-usadas.shtml>

INIA. (2024, 11 de septiembre). Los biofiltros permitirán reutilizar el agua domiciliaria para la pequeña agricultura. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. <https://www.inia.cl/2024/09/11/biofiltros-permitiran-reutilizar-el-agua-domiciliaria-para-la-pequena-agricultura/>

INIA. (2025, 10 de abril). Proyecto liderado por INIA Intihuasi permite monitorear en tiempo real la calidad del agua en canales de riego de Elqui y de Choapa. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. <https://www.inia.cl/2025/04/10/proyecto-liderado-por-inia-intihuasi-permite-monitorear-en-tiempo-real-la-calidad-del-agua-en-canales-de-riego-de-elqui-y-de-choapa/>

Pontificia Universidad Católica de Chile. (2021, 17 de junio). Yaku: La tecnología con sello UC que reutiliza las aguas grises. <https://www.uc.cl/noticias/yaku-la-tecnologia-con-sello-uc-que-reutiliza-las-aguas-grises/>

Tecnologías Locales. (2022). Biofiltro para reutilización de aguas grises. <https://www.tecnologiaslocales.cl/tecnologias/sistema-de-reutilizacion-de-aguas-grises-domiciliarias>