

UNIVERSIDAD EAN

SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN – ESPECIALIZACIÓN

Estrategias teóricas para la optimización del consumo de agua en el cultivo de arándanos
en la finca Villa María, a través de tecnologías de agricultura 4.0.

AUTORES

NICOLLE DAIANA GALINDO GALINDO

LEIDY VANESSA ALARCÓN CRUZ

OSCAR EDUARDO ÁVILA BERNAL

JAIME ANDRES CARVAJAL GUTIERREZ

BOGOTÁ

Resumen

El estudio tiene como objetivo analizar diversas estrategias teóricas para optimizar el consumo de agua en el cultivo de arándanos en la finca Villa María, utilizando tecnologías de agricultura 4.0. Esta investigación surge ante la creciente reducción de la disponibilidad de agua a nivel mundial y la ineficiencia en su uso en el sector agrícola, lo que evidencia la urgente necesidad de encontrar alternativas más eficientes para los sistemas de riego. Para llevar a cabo este análisis, el documento incluye un marco teórico que explora teorías y modelos sobre la optimización del agua, así como el marco legal y conceptual relacionado con el problema. Con esta información se procede a comparar las tecnologías existentes con otros marcos teóricos con el fin de determinar las posibles mejoras que se pueden implementar para optimizar la eficiencia hídrica del sistema de riego en el cultivo de arándanos. Del análisis resultante podemos concluir y recomendar las opciones más adecuadas para el caso de estudio.

Palabras clave: *Optimización de agua, eficiencia, agricultura, cultivo, tecnología.*

Planteamiento Del Problema

Antecedentes del problema.

En Colombia, el cultivo de arándanos se ha consolidado como una actividad agrícola de gran relevancia económica, especialmente en regiones como Cundinamarca y Boyacá, donde las condiciones climáticas son favorables para su producción continua (Rodríguez et al., 2019). Ubaté, en particular, se ha destacado como un área estratégica para la producción de arándanos debido a su altitud y clima templado, que favorecen la calidad y el rendimiento del cultivo. Sin embargo, el sector enfrenta un desafío crítico en cuanto al consumo de agua, un recurso que está cada vez más limitado debido a factores como el cambio climático y la sobreexplotación (IDEAM, 2020). La escasez de agua ha llevado a una creciente presión sobre los recursos hídricos, afectando la sostenibilidad de los cultivos y, en consecuencia, la seguridad alimentaria del país (García et al., 2022).

Las prácticas de riego actuales en el cultivo de arándanos en Colombia son en gran parte tradicionales y no siempre se ajustan a las necesidades específicas de los cultivos ni a las variaciones climáticas (Salazar & Valencia, 2020). El uso ineficiente del agua es un problema significativo, con sistemas de riego que a menudo desperdician grandes cantidades del recurso debido a la falta de tecnologías avanzadas de monitoreo y control (Pérez et al., 2020). Este problema no solo incrementa los costos de producción, sino que también contribuye a la degradación de los recursos hídricos locales, exacerbando la crisis del agua (Rodríguez et al., 2019).

En respuesta a estos desafíos, la Agricultura 4.0 se ha propuesto como una solución innovadora para la gestión eficiente del agua. Esta tendencia incluye el uso de tecnologías como sensores de humedad del suelo, sistemas de riego automatizados y algoritmos de machine learning para optimizar el riego (Morales et al., 2021). Estas tecnologías permiten un monitoreo continuo y preciso de las condiciones del suelo y las necesidades hídricas de los cultivos, lo que facilita una gestión más eficiente del agua (García et al., 2022). Sin embargo, la adopción de estas tecnologías en Colombia ha sido limitada, especialmente en el contexto de los pequeños y medianos productores que podrían beneficiarse enormemente de su implementación (IDEAM, 2020).

La literatura existente sugiere que la implementación de tecnologías de Agricultura 4.0 puede resultar en una reducción significativa del consumo de agua y una mejora en la productividad agrícola. Por ejemplo, el uso de sistemas de riego inteligentes basados en datos de sensores ha demostrado ser efectivo en diversas regiones agrícolas a nivel global (Pérez et al., 2020; Salazar & Valencia, 2020). Estos sistemas ajustan el suministro de agua en función de las necesidades reales del cultivo, lo que minimiza el desperdicio y optimiza el uso del recurso.

En el contexto colombiano, varios estudios han mostrado la importancia de integrar tecnologías avanzadas en la agricultura para enfrentar los retos asociados con la escasez de agua (García et al., 2022; Morales et al., 2021). La falta de tecnologías avanzadas de monitoreo y control provoca el desperdicio de grandes cantidades del recurso hídrico en los sistemas de riego, lo cual constituye un problema importante (Pérez et al., 2020).

La necesidad de un enfoque teórico para entender y promover la optimización del uso del agua mediante Agricultura 4.0 es evidente. La investigación teórica no solo abordará las deficiencias actuales en la gestión del agua, sino que también ofrecerá recomendaciones prácticas para adoptar tecnologías avanzadas capaces de transformar la agricultura en Colombia.

Descripción del problema.

Los sectores agrícola, energía y pecuario en Colombia demandan para sus actividades el 75,59% de la totalidad del recurso hídrico, siendo la agricultura y la industria los sectores con mayor participación en el desperdicio de agua (Correa, 2022). El porcentaje de participación en las pérdidas del recurso en el sector agrícola es del 48,12% según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2018), esto puede ser debido a las prácticas tradicionales de riego, ya que son ineficientes y contribuyen al desperdicio de agua. Esta situación afecta la productividad y sostenibilidad del sector, agravada por la variabilidad climática que intensifica la necesidad de agua.

Teniendo en cuenta la información anterior, la finca Villa María, ubicada la vereda Volcán del municipio de Ubaté, Cundinamarca, se dedica al cultivo de arándanos en una extensión de 3 hectáreas en su ubicación principal, además, tienen una segunda finca llamada El Cielo, con 1.5 hectáreas adicionales generando aproximadamente 750 kilos de arándanos a la semana, lo que conlleva a un consumo de agua promedio de 8000 litros diarios. A pesar de los beneficios económicos y nutricionales que ofrece este cultivo, el uso intensivo de agua incrementa los costos operativos de la finca, lo que hace necesario buscar un mejor sistema de riego a través de Tecnologías de Agricultura 4.0.

Para responder la pregunta ¿Qué estrategias teóricas basadas en tecnologías de agricultura 4.0 pueden optimizar el consumo de agua en el cultivo de arándanos en la finca Villa María, promoviendo la sostenibilidad y la eficiencia hídrica? se realizará una comparación del sistema de riego actual en la finca frente a fuentes teóricas que tratan los sistemas de riego actuales para así poder identificar oportunidades de mejora.

Objetivos.

Objetivo general.

Comparar los sistemas de riego para optimizar el consumo de agua en el cultivo de arándanos en la finca Villa María, mediante la implementación de tecnologías de agricultura 4.0, con un enfoque en la sostenibilidad y la eficiencia hídrica.

Objetivos específicos.

1. Identificar las tecnologías de agricultura 4.0 más importantes para la optimización del consumo de agua en el cultivo de arándanos en la finca Villa María.
2. Comparar el impacto de la implementación de estas tecnologías en la sostenibilidad y eficiencia hídrica de la finca Villa María.
3. Evaluar estudios teóricos y casos de éxito internacionales relacionados con la optimización del uso del agua en la agricultura, aplicables al cultivo de arándanos en la finca Villa María.
4. Desarrollar recomendaciones específicas para la adopción de estas estrategias en la finca Villa María, teniendo en cuenta las limitaciones y oportunidades locales.

Justificación

La eficiencia en el uso del agua se ha convertido en un factor crucial en la agricultura moderna, ya que, el cambio climático está afectando la disponibilidad del recurso hídrico a nivel mundial, y el uso ineficiente del agua en el sector agrícola refleja una necesidad urgente de idear nuevas estrategias e innovaciones para mejorar los sistemas de riego. En este contexto, la investigación sobre el sistema de riego en la finca Villa María enfocada en Ciencia, tecnología e innovación, adquiere gran relevancia debido a que, un sistema de riego eficiente contribuye a la sostenibilidad al minimizar el desperdicio de agua y reducir la erosión del suelo, adicionalmente, garantiza que las plantas reciban la cantidad adecuada de agua en el momento oportuno, mejorando la productividad de los cultivos y reduciendo el uso de agua y energía, lo que se traduce en ahorros económicos.

Los resultados del estudio pueden llenar vacíos en el conocimiento sobre la eficiencia en los diferentes sistemas de riego en cultivos de arándanos y contribuir al desarrollo teórico y metodológico en la agricultura 4.0. Al reconocer los sistemas de riego más avanzados, el estudio permitirá una comprensión más profunda de cómo mejorar la eficiencia hídrica y la sostenibilidad en la agricultura moderna.

Finalmente, la identificación de sistemas de riego eficientes para los cultivos de arándanos permitirá formular recomendaciones específicas para la finca Villa María, con el objetivo de optimizar el consumo de agua sin comprometer la productividad del cultivo. Estos hallazgos podrán servir como una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones

prácticas, beneficiando a agricultores, investigadores y profesionales del sector agrícola, además, puede ser una herramienta de referencia para otras fincas interesadas en mejorar la eficiencia hídrica en sus cultivos de arándanos.

Marco Teórico

Estado del arte

La creciente necesidad de optimizar el uso del agua en la agricultura ha impulsado el desarrollo de tecnologías avanzadas que permiten una gestión más eficiente de los recursos hídricos. En particular, la Agricultura 4.0 ha introducido herramientas como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA), y el aprendizaje automático (Machine Learning) para mejorar los sistemas de riego, reducir el consumo de agua y maximizar los rendimientos de los cultivos. En este contexto, el cultivo de arándanos en la finca *Villa María* en Colombia representa un desafío significativo en términos de la optimización del agua. Este estado del arte explora los avances tecnológicos y científicos relacionados con la optimización del consumo de agua en la agricultura, específicamente en el cultivo de arándanos.

1. Optimización del Riego Mediante Sensores

Una de las tecnologías clave en la Agricultura 4.0 es el uso de sensores para el control del riego. Bellingham (2014) en su estudio sobre el riego en arándanos utilizando sensores, destaca cómo los sistemas de programación de riego basados en sensores permiten ajustar el suministro de agua de acuerdo con las necesidades específicas del cultivo, optimizando así su uso y evitando

el sobre-riego. Este enfoque no solo mejora la eficiencia del agua, sino que también contribuye a la sostenibilidad a largo plazo al reducir el estrés hídrico en las plantas.

Además, el estudio realizado por He et al. (2024) sobre la optimización del nivel de lixiviación y el inicio de la irrigación por goteo alterno subraya cómo la combinación de técnicas de riego controladas puede mejorar significativamente el ahorro de agua y la desalinización del suelo, contribuyendo a la sostenibilidad de la agricultura en regiones afectadas por la salinización y la escasez de agua.

2. Uso de Inteligencia Artificial y Machine Learning

El uso de IA y Machine Learning en la optimización del riego es otro avance destacado en el campo de la Agricultura 4.0. Barickman et al. (2024) demostraron cómo el Machine Learning puede utilizarse para estimar el contenido de nitrógeno foliar en los cultivos mediante imágenes multiespectrales e IoT, lo que permite ajustar los insumos agrícolas en función de las condiciones específicas del suelo y la planta. Aunque este estudio se centró en los cultivos de piña, los principios son aplicables al riego en arándanos, donde los algoritmos de IA pueden predecir con mayor precisión las necesidades de agua de los cultivos.

El trabajo de Digra, Rajput y Sharma (2024) sobre la integración de IoT y Machine Learning en la agricultura inteligente destaca cómo estas tecnologías permiten un uso más eficiente de los recursos hídricos al ajustar dinámicamente los sistemas de riego basados en datos en tiempo real. Este enfoque no solo optimiza el uso del agua, sino que también aumenta los rendimientos al proporcionar condiciones óptimas de crecimiento.

Además de los avances mencionados, Parra-López et al. (2024) analizaron cómo las tecnologías digitales, como el Big Data, la inteligencia artificial y el Internet de las Cosas, pueden contribuir a la adaptación y mitigación del cambio climático en la agricultura. Estas herramientas no solo ayudan a prever y ajustar las necesidades de riego, sino que también optimizan el uso de los recursos hídricos, lo que resulta en una mayor resiliencia ante el cambio climático. La integración de tecnologías digitales permite a los agricultores tomar decisiones informadas, optimizando el uso del agua y minimizando el impacto ambiental en regiones vulnerables.

3. Teledetección y Análisis de Imágenes

Las tecnologías de teledetección y análisis de imágenes también juegan un papel fundamental en la monitorización del estado de los cultivos y la optimización del riego. Kushwaha et al. (2024) utilizaron el modelo FB Prophet para analizar series temporales de datos NDVI, lo que permitió detectar cambios en la vegetación y predecir las necesidades de riego. Estas herramientas permiten a los agricultores tomar decisiones basadas en datos precisos, mejorando la gestión del agua.

En un estudio similar, Garcia et al. (2025) realizaron una revisión sistemática del uso de la teledetección en la hidrología, destacando cómo las imágenes satelitales y los sistemas de información geográfica (GIS) pueden proporcionar información detallada sobre el uso del suelo, la humedad y los patrones de riego. Estas tecnologías permiten optimizar el riego en tiempo real, ajustando los volúmenes de agua según la variabilidad de las condiciones climáticas y del suelo.

4. Modelos de Balance Hídrico y Gestión del Agua

El uso de modelos de balance hídrico combinados con datos de sensores también ha mostrado avances significativos. Sheline et al. (2024) desarrollaron un controlador de riego de precisión para sistemas de riego por goteo alimentados por energía solar, que optimiza tanto el uso de energía como de agua. Este sistema utiliza modelos predictivos para ajustar los horarios de riego y reducir los costos, lo que lo hace ideal para entornos agrícolas con recursos limitados.

Por su parte, Uztürk y Büyüközkan (2024) proponen un marco de evaluación de tecnologías de la Industria 4.0 para la agricultura, que incluye la optimización del agua mediante la integración de IoT, Blockchain y Machine Learning. Estos avances permiten a los agricultores monitorear de manera eficiente los recursos hídricos y tomar decisiones informadas para minimizar el desperdicio de agua.

Por otro lado, Zarco-Tejada et al. (2018) destacan el papel crucial de las tecnologías de agricultura de precisión en la gestión del riego mediante tecnologías de teledetección. Estas tecnologías permiten un seguimiento detallado de la humedad del suelo y las condiciones del cultivo, lo que optimiza el uso del agua y minimiza el desperdicio. Su estudio muestra cómo los avances en teledetección, combinados con sistemas de riego inteligentes, pueden mejorar significativamente la eficiencia hídrica, especialmente en cultivos que requieren un manejo preciso, como los arándanos.

5. Avances en la Agricultura de Precisión

La agricultura de precisión ha sido fundamental para optimizar el uso de recursos como el agua. Villanueva y Méndez (2024), en su estudio sobre la agricultura de precisión en el cultivo de aguacate, destacan cómo las tecnologías avanzadas permiten un monitoreo continuo y la toma de decisiones basadas en datos para mejorar la eficiencia del riego. Estos principios pueden extrapolarse a otros cultivos frutales como los arándanos.

Además, Eladl et al. (2024) propusieron un marco para la clasificación de plantas basado en imágenes de UAV y técnicas de inteligencia artificial, lo que demuestra cómo las herramientas de Agricultura 4.0 pueden mejorar la gestión del agua al proporcionar datos en tiempo real sobre la salud de los cultivos.

En conclusión, la incorporación de tecnologías avanzadas como sensores, IA, Machine Learning y teledetección en la gestión del agua ha permitido un cambio significativo en la agricultura moderna, particularmente en el cultivo de arándanos. La finca *Villa María* puede beneficiarse de estos avances para optimizar el consumo de agua, mejorar la sostenibilidad y aumentar la productividad. Las tecnologías de Agricultura 4.0 ofrecen una solución viable para los desafíos del manejo del agua en la agricultura, permitiendo una mayor eficiencia y un menor impacto ambiental. A medida que se desarrollan nuevas herramientas, la integración de estas tecnologías se vuelve esencial para enfrentar los retos que presenta el cambio climático y la creciente demanda de recursos hídricos.

Teorías y Modelo sobre la Optimización del Consumo de Agua

Existen varias teorías y enfoques científicos que abordan la optimización del consumo de agua en la agricultura, los cuales son aplicables en la finca Villa María, como lo son:

1. Teoría de la Eficiencia Hídrica

Se enfoca en maximizar la producción agrícola por unidad de agua utilizada. Busca lograr una mayor productividad con menos agua, alineándose con los principios de la sostenibilidad agrícola. En el cultivo de arándanos, la eficiencia hídrica es clave, ya que se trata de un cultivo altamente dependiente del riego controlado para asegurar la calidad del fruto (Howell, 2001). Para mejorar esta eficiencia, la adopción de tecnologías como sensores de humedad del suelo y sistemas de riego automatizados son clave, ya que permiten ajustar el riego en función de las condiciones específicas del suelo y el clima.

2. Inteligencia Artificial y Modelos Predictivos

La inteligencia artificial y los modelos predictivos han ido de manera creciente en la optimización del consumo de agua en la agricultura, ya que, utilizan datos históricos y en tiempo real para predecir las necesidades del cultivo, permitiendo un riego más preciso y eficiente. En el contexto de la finca Villa María, la IA puede integrarse con otras tecnologías de Agricultura 4.0 para predecir las demandas hídricas del cultivo de arándanos, basándose en variables como la humedad del suelo, la temperatura y las precipitaciones (Sharma et al., 2020). Este enfoque permite anticipar y ajustar el riego para maximizar la eficiencia y reducir el consumo de agua.

3. Modelos de Agricultura de Precisión

Es una teoría que combina el uso de tecnologías avanzadas con la gestión de datos para optimizar el uso del agua. Este enfoque es importante para el cultivo, ya que las condiciones climáticas y del suelo pueden variar significativamente. A través de la implementación de tecnologías de Agricultura 4.0, como drones, sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real, se pueden recolectar datos detallados sobre las necesidades hídricas del cultivo y optimizar el riego en consecuencia (Zhang et al., 2021). Esta teoría se basa en la premisa de que una mayor precisión en la aplicación del agua puede mejorar la productividad y reducir el consumo de agua.

Marco Legal y Conceptual

En Colombia, la gestión del recurso hídrico está regulada por varios marcos legales, entre ellos, la Ley 373 de 1997, que establece la necesidad de implementar programas de uso eficiente y ahorro de agua en todos los sectores productivos, incluida la agricultura. El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) también destaca la importancia de la gestión sostenible del agua en el sector agropecuario, promoviendo el uso de tecnologías y prácticas que optimicen el recurso (MinAmbiente, 2016).

En el ámbito local, las regulaciones están a cargo de entidades como la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), que supervisa el uso del agua en la región y promueve prácticas sostenibles entre los productores agrícolas, incluyendo el cumplimiento de normativas de riego eficiente y la conservación de las fuentes hídricas (CAR, 2020). Además, la adopción de tecnologías de Agricultura 4.0 está respaldada por iniciativas del Ministerio de

Agricultura, que impulsa la modernización del sector agrícola para enfrentar los desafíos de la escasez hídrica.

La integración de tecnologías de Agricultura 4.0 no solo busca mejorar la eficiencia en el uso del agua, sino que también garantiza la sostenibilidad a largo plazo de los cultivos. Esto implica una transformación hacia una gestión más inteligente y adaptable del recurso hídrico, lo que es de vital importancia para enfrentar los desafíos del cambio climático.

Marco Institucional

La finca Villa María se encuentra ubicada en la vereda Volcán, municipio de Ubaté, Cundinamarca, Colombia, y es propiedad de la sociedad LUCIAGRO SAS. Esta finca se especializa en el cultivo de arándanos, un producto agrícola de alta demanda tanto en el mercado local como en el internacional. Ubicada estratégicamente en una región con condiciones climáticas favorables para este tipo de cultivo, la finca forma parte del sector agrícola bajo el marco del Código CIIU 0125 - Cultivo de otras frutas, nueces, plantas cuyas hojas o frutas se utilizan para preparar bebidas y especias, que corresponde al cultivo de frutas como los arándanos.

Sector Económico y Nicho de Mercado

Villa María pertenece al sector agrícola, y específicamente al subgrupo de cultivos de frutas especializadas. Los arándanos, conocidos por su alto contenido de antioxidantes y beneficios para la salud, han ganado popularidad en los mercados nacionales e internacionales, lo que coloca a la finca en un nicho de mercado altamente competitivo. Los canales de venta de la

finca incluyen la comercialización directa a través de plataformas como WhatsApp y redes sociales, permitiendo una relación cercana con los clientes. Actualmente, la producción mensual de la finca se vende en su totalidad en el mercado local, con la proyección de expandir los canales de distribución para aumentar su alcance.

Principales Productos y Procesos

El principal producto de Villa María es el arándano, cultivado en tres variedades: Emerald, Legacy, y Biloxi. Estas variedades son seleccionadas por su adaptación a las condiciones climáticas de la región y por sus características que las hacen adecuadas tanto para el consumo fresco como para su procesamiento en jugos y otros productos derivados. La finca cuenta actualmente con 6,000 matas en producción, con una proyección de alcanzar 10,000 matas en el próximo año, lo que incrementa su capacidad de producción de 36,000 kilos anuales a 60,000 kilos.

El proceso de producción en Villa María sigue un sistema automatizado de riego por aspersión, que permite una distribución eficiente del agua a través de válvulas controladas electrónicamente. Este sistema está optimizado para reducir el uso excesivo de agua y maximizar la productividad de las plantas. Cada cama de cultivo cuenta con 600 plantas, y el riego es administrado a través de lancetas y coronas que aseguran que cada planta reciba la cantidad adecuada de agua. El sistema de riego es impulsado por un motor eléctrico de 2 caballos de fuerza, y el agua se almacena en tanques con una capacidad total de 300,000 litros.

Estructura Organizacional

La finca está dirigida por Federico Ricardo Gallo Gallego, quien desempeña el papel de gerente general y supervisa todas las operaciones agrícolas. Además, Olga Cardona, como gerente de marketing y ventas, se encarga de la comercialización y distribución del producto. La finca también cuenta con un equipo de 5 empleados permanentes, encargados de la recolección, mantenimiento y empaque de los arándanos. Un agrónomo visita la finca una vez al mes para brindar asesoría en cuanto a las mejores prácticas de cultivo y cuidado de las plantas.

La estructura organizacional refleja un modelo de gestión familiar y técnico, donde las decisiones clave sobre el manejo del cultivo, las mejoras tecnológicas y la comercialización son tomadas en estrecha colaboración entre el gerente general y el gerente de marketing. Este enfoque asegura una operación ágil y adaptable a los cambios en el mercado y las condiciones climáticas.

Tecnología y Prácticas Sostenibles

Villa María ha implementado tecnologías de recolección de aguas lluvias y sistemas de captación de agua de un río cercano para garantizar un suministro constante y sostenible de agua para el riego. La finca no solo se enfoca en maximizar la eficiencia hídrica, sino que también utiliza lixiviados recolectados para fertilizar otros cultivos, como el orégano, lo que refleja un compromiso con la sostenibilidad y la economía circular.

El uso de un sistema de riego automatizado, combinado con la recolección eficiente de aguas lluvias y la captación de agua del río, permite a Villa María operar hasta tres meses sin

lluvia, lo que proporciona un alto grado de independencia frente a las condiciones climáticas adversas. Esta capacidad de gestión hídrica es clave para el crecimiento sostenible y la expansión de la finca.

En conclusión, la finca Villa María es un ejemplo de cómo una finca agrícola puede combinar tecnología avanzada, prácticas sostenibles y una estructura organizacional eficiente para maximizar la producción en un sector competitivo. Con una proyección de crecimiento clara y una visión de sostenibilidad a largo plazo, la finca está bien posicionada para consolidarse como líder en el cultivo de arándanos en la región de Ubaté. La expansión futura de la capacidad productiva y la exploración de nuevos mercados marcarán el próximo capítulo en la evolución de esta finca innovadora.

Metodología

Primer nivel

Enfoque, alcance y diseño de la investigación

El presente estudio se enfoca en el análisis teórico de estrategias para la optimización del consumo de agua en el cultivo de arándanos en la finca Villa María, ubicada en Ubaté, Cundinamarca, mediante la implementación de tecnologías de Agricultura 4.0. Dado que no se realizarán experimentos en campo ni intervenciones directas, la investigación seguirá un enfoque teórico y cualitativo, basado en el análisis de información secundaria obtenida de fuentes científicas y técnicas, junto con la extrapolación de datos obtenidos a través de entrevistas y observación directa en la finca.

Enfoque

La investigación adopta un enfoque cualitativo al centrarse en la interpretación y análisis de datos recogidos mediante entrevistas y estudios previos sobre la finca, así como en la literatura existente sobre tecnologías de agricultura de precisión y optimización hídrica. Este enfoque permite explorar la aplicabilidad de dichas tecnologías en el contexto específico de la finca, proporcionando un marco para la toma de decisiones sobre la gestión del agua a nivel teórico.

Alcance

El alcance de la investigación está delimitado al estudio de tecnologías de Agricultura 4.0 aplicables al cultivo de arándanos, enfocándose en la optimización de sistemas de riego mediante el uso de sensores, inteligencia artificial, machine learning y modelos predictivos de balance hídrico. Si bien el estudio se centrará en las condiciones específicas de la finca Villa María, sus resultados pueden ser extrapolados a otras fincas con características similares. El proyecto no contempla la realización de pruebas empíricas o de campo, y se basa en la validación teórica de las tecnologías a implementar.

Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es de tipo no experimental y transversal, dado que se centra en la recolección de datos en un solo punto en el tiempo mediante fuentes documentales, entrevistas y la observación directa. Se utilizará un diseño descriptivo y correlacional, con el objetivo de describir las tecnologías disponibles para la optimización del riego y establecer la relación entre el uso de estas tecnologías y la mejora en la eficiencia del consumo de agua. Asimismo, se recurrirá a la modelación teórica para evaluar el potencial impacto de dichas tecnologías en la finca Villa María, sin intervención directa en los sistemas actuales de la finca.

Definición de Variables

En la siguiente tabla se presenta las variables definidas, proporcionando una descripción clara y detallada de cada una:

Tabla 1. Definición de Variables

Objetivos Específicos	Recolección de Datos (Si/No)	Variable por Estudiar	Definición Conceptual	Definición Operacional	Tipo de Variable
Evaluar el consumo de agua en las camas de cultivo	Sí	Cantidad de Agua Utilizada	Cantidad total de agua distribuida en las camas de cultivo en un periodo	Medida a través de medidores de flujo en las tuberías principales. Se registra el consumo de agua en litros	Cuantitativa, continua

			determinado (diario, semanal, mensual).	diarios por cama y por planta. Los datos se recopilan y se comparan entre camas para identificar patrones y diferencias en el consumo.	
Medir la frecuencia y eficiencia del riego	Sí	Frecuencia de Riego	Número de veces que se realiza el riego en un periodo determinado.	Observación y registro del número de ciclos de riego completados por cama, ajustado a las necesidades del cultivo y las condiciones climáticas. Se mide la frecuencia en términos de días por semana y se compara entre camas para determinar la efectividad del sistema de riego.	Cuantitativa, continua

Evaluar la distribución del agua entre plantas	Sí	Número de Aspersores por Mata	Número de dispositivos de riego (aspersores) que distribuyen agua a cada planta, asegurando una cobertura adecuada.	Observación directa y conteo de los aspersores por cama de cultivo. Se compara la uniformidad de distribución del agua entre plantas según la cantidad de aspersores instalados y su rendimiento.	Cuantitativa, continua
Analizar la eficiencia hídrica del sistema	Sí	Índice de Productividad de la Planta	Relación entre la cantidad de agua utilizada y la cantidad de arándanos producidos por cada planta.	Comparación entre el consumo total de agua en una cama de cultivo y la cantidad de arándanos producidos (en kilogramos) durante el mismo periodo.	Cuantitativa, continua
Determinar la	Sí	Evapotranspiración	Pérdida de agua por evaporación	Medida a través de sensores de humedad	Cuantitativa, continua

variabilidad en la humedad del suelo		del Suelo	del suelo y transpiración de las plantas.	instalados en el suelo de las camas de cultivo. Los sensores registran la cantidad de agua evaporada y transpirada entre ciclos de riego. Los datos se utilizan para ajustar la cantidad de agua aplicada y minimizar la pérdida hídrica.	
Monitorear la recuperación del agua en tanques	Sí	Velocidad de Recuperación de Tanques	Tasa a la cual los tanques de agua se llenan durante las lluvias o la captación del río.	Se mide la tasa de llenado de los tanques utilizando medidores de nivel, observando la cantidad de litros recolectados por hora o día.	Cuantitativa, continua
Optimizar los tiempos	Sí	Tiempo de Riego por	Tiempo que toma completar un ciclo	Cronometrado manualmente o	Cuantitativa, continua

de riego		Ciclo	de riego en una cama de cultivo.	automáticamente mediante el sistema de riego. Se compara el tiempo que toma regar una cama con las necesidades de agua del cultivo. Los datos se utilizan para determinar si los ciclos de riego son eficientes o si se necesita ajustar el tiempo de riego para evitar el desperdicio de agua.	
Estimar la cantidad de agua recolectada por lluvia	Sí	Agua de Lluvia Recolectada	Cantidad de agua recolectada por los sistemas de recolección de aguas lluvias de la finca.	Medida a través de registros de cantidad de agua acumulada en los tanques de recolección de lluvia durante los periodos de precipitación. Los	Cuantitativa, continua

				registros permiten medir cuánto contribuye la recolección de agua de lluvia al suministro total de agua para el riego en la finca.	
--	--	--	--	--	--

Fuente: Elaboración propia

Población y Muestra

En el marco de la teoría agrícola y la gestión de recursos hídricos, la correcta delimitación de la población y muestra es crucial para un estudio exhaustivo del uso de agua en sistemas agrícolas intensivos como la finca Villa María. La recolección de datos, su análisis y posterior comparación con modelos teóricos reconocidos, proporciona un enfoque metodológico que facilita la identificación de brechas y oportunidades para optimizar el consumo de agua. La población y muestra se define no sólo para representar las condiciones actuales de la finca, sino también para contrastar los resultados con estándares establecidos en la literatura técnica.

Definición de la Población

En un estudio enfocado en el consumo de agua, la población incluye todos los componentes relevantes que intervienen en el ciclo de riego. La población teórica incluye tanto

los elementos físicos como los biológicos que interactúan en la distribución y uso del agua, desde las plantas hasta los sistemas de almacenamiento y distribución.

Componentes Clave de la Población:

- **Camas de Cultivo:** Representan las unidades de manejo donde se distribuye el agua de riego. Desde una perspectiva teórica, cada cama debe ser evaluada por su capacidad de absorción hídrica y su impacto en la productividad de las plantas.
- **Plantas de Arándano:** Cada planta es una unidad biológica que requiere un consumo específico de agua en función de su ciclo de vida y las condiciones climáticas. La eficiencia hídrica se evalúa comparando la cantidad de agua consumida con la productividad de la planta.
- **Sistema de Riego:** Se incluye toda la infraestructura utilizada para la distribución del agua, que abarca aspersores, válvulas y tuberías. La teoría sugiere que un análisis completo de la infraestructura revela puntos críticos para la optimización del consumo de agua.
- **Tanques de Almacenamiento de Agua:** En la teoría de gestión hídrica, la capacidad de almacenamiento y la velocidad de recuperación de agua son factores cruciales para la sostenibilidad del sistema, especialmente en condiciones climáticas adversas.

Selección de la Muestra

Desde un enfoque teórico, la muestra representativa debe capturar las diferentes dimensiones del sistema de riego y las variaciones en el consumo de agua. La muestra se enfoca

en un subconjunto de los componentes de la finca, lo que permite extrapolar resultados sin analizar todos los elementos de la población.

Elementos de la Muestra:

- **Camas de Cultivo Seleccionadas:** La teoría sugiere que una selección estratégica de camas de cultivo debe incluir aquellas que presentan variaciones en el tipo de suelo, condiciones de exposición solar y niveles de productividad. Esto garantiza que las diferencias internas dentro del sistema agrícola se reflejen adecuadamente en los datos.
- **Registros Históricos de Consumo de Agua:** El análisis de los registros históricos de consumo de agua es esencial para identificar patrones de demanda y uso del recurso. Desde la perspectiva teórica, los registros de varias temporadas permiten construir modelos de predicción y evaluar cómo las prácticas de riego actuales se alinean con los requisitos teóricos de eficiencia hídrica.
- **Plantas Seleccionadas por Edad y Productividad:** El muestreo de plantas en diferentes etapas de su ciclo de vida (plantas jóvenes y maduras) proporciona una visión de cómo las necesidades de agua cambian con el tiempo. Esto es crucial para ajustar el riego en función de las etapas de crecimiento y maximizar la productividad.
- **Sistema de Riego:** Se recomienda seleccionar varios puntos del sistema de riego (aspersores) para evaluar su rendimiento. La teoría destaca la importancia de la uniformidad en la distribución de agua y el mantenimiento adecuado de los dispositivos de riego para evitar el desperdicio del recurso.

- Capacidad de Almacenamiento y Recuperación de Agua: Los tanques de almacenamiento son monitoreados en función de su capacidad para recolectar y suministrar agua durante los periodos de escasez. En teoría, la velocidad de recuperación de los tanques es un indicador clave de la sostenibilidad del sistema hídrico.
- Observación de la Frecuencia de Riego y el Tiempo de Riego por Ciclo: La frecuencia y el tiempo de riego deben ser ajustados para alinearse con las recomendaciones teóricas sobre la demanda hídrica de los cultivos. La observación directa de los ciclos de riego permite comparar la práctica actual con las sugerencias teóricas sobre la eficiencia hídrica.
- Entrevistas a Personal Clave: Las entrevistas con el personal operativo que gestiona el sistema de riego son fundamentales para entender los desafíos prácticos que enfrenta la finca. La teoría sugiere que la toma de decisiones humana influye significativamente en la eficiencia del riego, por lo que debe analizarse junto con los datos cuantitativos.

Proceso de recolección de datos

El proceso de recolección de datos se centrará en la revisión de los documentos pertinentes, entrevistas y observación directa. Se utilizarán las siguientes técnicas de recopilación:

- **Revisión documental:** Es una técnica en donde se recolecta información escrita sobre un determinado tema, teniendo como fin proporcionar variables que se relacionan indirecta o directamente con el tema establecido. Esto incluye libros, artículos de revistas académicas, informes gubernamentales, tesis y disertaciones.

- **Entrevistas:** Son una técnica utilizada en investigaciones cualitativas para obtener información detallada y profunda sobre las percepciones, experiencias y opiniones de los participantes.
- **Observación directa:** Es una técnica en donde se observa y registra el comportamiento y las interacciones de los sujetos en su entorno natural, sin intervenir en el desarrollo de las actividades. Según Angrosino (2012), la observación directa implica una inmersión del investigador en el contexto del estudio, donde se recopila información mediante la observación no participante o participante, dependiendo del nivel de implicación del investigador con el grupo observado.
- **Análisis descriptivo:** Es una técnica en donde el enfoque es resumir y presentar las características principales de los datos, proporcionando medidas como medias, medianas, frecuencias y desviaciones estándar
- **Análisis correlacional:** Es una técnica en donde el enfoque es examinar la relación entre dos o más variables, sin establecer causalidad. Según Dancey y Reidy (2017) el análisis correlacional se utiliza para evaluar la fuerza y dirección de la relación entre variables.

Selección de Métodos o Instrumentos para Recolección de Información

Esta selección de métodos teóricos está basada en prácticas optimizadas para la gestión de recursos hídricos en la agricultura moderna. La implementación de estas herramientas asegura una recolección de datos robusta y fundamentada, que permite analizar de manera integral el uso del agua y la productividad agrícola. Teniendo en cuenta lo mencionado, se realizarán dos métodos para la recolección de información:

1. Entrevistas con Personal Clave

El enfoque teórico para la recolección de datos cualitativos en un sistema agrícola intensivo sugiere la realización de entrevistas semiestructuradas con el personal operativo clave, especialmente aquellos responsables del sistema de riego. Esta entrevista proporciona información que complementa los datos cuantitativos obtenidos de los medidores de flujo y los sensores de humedad. En teoría, los datos cualitativos son cruciales para comprender cómo se toman las decisiones operativas y cómo se puede mejorar el sistema. Este enfoque permite identificar problemas operativos, desafíos en la gestión del agua, y posibles mejoras tecnológicas en el sistema de riego. A continuación, la encuesta creada para la finca de estudio:

Tabla 2. Preguntas de la encuesta

Variable	Pregunta	Definición operacional
Área del cultivo	¿Cuál es el tamaño y la distribución de la tierra?	Pregunta abierta
Tipo de cultivo	¿Qué tipo de cultivo de arándano siembran?	Pregunta abierta
Consumo de agua	¿Cuánta cantidad de agua consume el cultivo?	Pregunta abierta
Tipo de sistema de riego	¿Qué sistema de riego utilizan en el	Pregunta abierta

	cultivo de arándanos?	
Tecnología	¿Qué tecnología y equipos tienen para el sistema de riego?	Pregunta abierta
Condiciones climáticas	¿Qué temperatura promedio tiene la región?	Pregunta abierta
Sistema de almacenamiento	¿Qué sistema de almacenamiento de agua tiene la finca?	Preguntas abierta

Fuente: Elaboración propia

Luego de obtener los datos para la línea base de comparación con fuentes teóricas, se investigarán en la base de datos de la universidad, estudios relacionados con cultivos de arándanos para así poder identificar las tecnologías de mayor eficiencia para la finca de estudio, las variables a tener en cuenta son:

2. Medición Directa del Consumo de Agua

El control riguroso del consumo de agua en un sistema agrícola intensivo es fundamental para garantizar la eficiencia hídrica. En el marco teórico de la gestión sostenible del riego, se establece que los medidores de flujo de agua deben estar presentes en las tuberías principales de distribución para permitir el monitoreo continuo y preciso de los volúmenes de agua utilizados en cada parcela de cultivo. Estos medidores proporcionan datos en tiempo real, lo cual facilita la identificación de patrones de uso, posibles fugas, y sobreconsumo. La teoría también subraya la

importancia de la integración de estos dispositivos con sistemas automatizados que permiten ajustar los flujos de agua según las necesidades hídricas de las plantas y las condiciones climáticas del momento.

3. Sensores de Humedad en el Suelo

Los sensores de humedad del suelo son fundamentales en los sistemas de riego de precisión. La teoría de gestión de riego establece que los sensores deben colocarse a diferentes profundidades para obtener una lectura precisa de la humedad disponible en el perfil del suelo. Estos sensores ayudan a determinar el momento óptimo para el riego, evitando tanto el déficit como el exceso de agua. Los sistemas avanzados integran estos sensores con plataformas que permiten un monitoreo continuo y remoto, proporcionando datos que pueden ser utilizados para optimizar los programas de riego y reducir el consumo de agua. El uso adecuado de estos dispositivos puede contribuir a una reducción significativa del uso de agua, mejorando al mismo tiempo la salud y productividad de las plantas.

4. Medición de la Velocidad de Recuperación de los Tanques de Agua

El diseño teórico para la recolección y almacenamiento de agua sugiere que se deben instalar medidores de nivel en los tanques de almacenamiento, los cuales permiten el monitoreo de la velocidad de llenado durante las lluvias y la tasa de vaciado durante el riego. La velocidad de recuperación de los tanques es un indicador clave de la eficiencia del sistema de recolección de agua de lluvia. La capacidad teórica de estos sistemas se basa en cálculos que aseguran que los tanques puedan abastecer el riego durante un periodo seco de al menos tres meses. Además,

los modelos más avanzados incluyen la capacidad de anticipar las necesidades de riego en función de las predicciones meteorológicas y ajustar la cantidad de agua recolectada en función de los patrones climáticos.

5. Análisis de Registros Históricos

El análisis de datos históricos sobre el consumo de agua y la productividad agrícola es una práctica recomendada en la teoría de la gestión de recursos hídricos. Los registros de consumo de agua permiten realizar un análisis longitudinal que identifica tendencias, periodos de alta demanda, y oportunidades de optimización. En la teoría, estos registros se utilizan para desarrollar modelos predictivos que estiman las necesidades futuras de agua basadas en factores como el crecimiento de la población de plantas, las condiciones climáticas y las variaciones estacionales. La práctica recomendada incluye la correlación de estos datos con indicadores de productividad de las plantas, lo que permite evaluar la eficiencia del uso del agua en términos de producción agrícola.

Técnicas de análisis de datos

La recopilación de la información se realizará de dos maneras, la primera será por medio de una encuesta para entrevistar al administrador de la finca de estudio para poder obtener los datos de consumo y tipo del cultivo de la finca, es decir, los datos cuantitativos para tener la línea base como referencia frente a las fuentes teóricas que se encuentren en la investigación. Luego, se interpretará y extraerá la información relevante de los documentos y textos relacionados con el uso del agua en la agricultura de arándanos bajo los siguientes criterios:

Tabla 3. Técnicas de análisis

Técnicas de análisis	
Variables	Definición operacional
Título del informe	Nombre del documento a comparar
Tipo de riego utilizado	Método de riego utilizados en el documento
Tecnología utilizada	Tecnologías de agricultura 4.0 implementadas
Eficiencia hídrica	Estrategias para mejorar la eficiencia del uso del agua
Prácticas sostenibles	Prácticas sostenibles mencionadas en el documento
Frecuencia de riego	Tiempo entre cada riego

Fuente: Elaboración propia

Las variables se recopilaron en una tabla comparativa con el fin de poder identificar la tecnología más adecuada para el cultivo de estudio y así poder realizar las recomendaciones correspondientes para tener un sistema de riego más eficiente.

Análisis y discusión de los resultados

A continuación, se realiza la recopilación de la información recogida en la finca de estudio, y los análisis mediante fuentes teóricas para encontrar un sistema de riego más eficiente que se acople a la finca Villa Maria.

Tabla 4. Respuestas de la encuesta para la finca Villamaria

Variable	Pregunta	Respuesta
Área del cultivo	¿Cuál es el tamaño y la distribución de la tierra?	4,5 hectáreas para cultivo de arándanos en Villa María
Tipo de cultivo	¿Qué tipo de cultivo de arándano siembran?	Tres variedades de arándano: Emerald, Legacy, y Biloxi.
Consumo de agua	¿Cuánta cantidad de agua consume el cultivo?	Consumo aproximado de 8,000 litros diarios en el sistema de riego.
Tipo de sistema de riego	¿Qué sistema de riego utilizan en el cultivo de arándanos?	Sistema automatizado de aspersores (Rain Bird, Hunter, Toro) y lancetas individuales.
Tecnología	¿Qué tecnología y equipos tienen para el sistema de riego?	stema con motor de 2 HP (Franklin Electric), controlador de riego (Hunter, Toro), válvulas automáticas (Hunter, Toro) y tuberías de PVC (Aquaplas)
Condiciones climáticas	¿Qué temperatura promedio tiene la región?	Durante el último año, Ubaté, Cundinamarca, Colombia, ha experimentado temperaturas promedio que oscilan entre 7 °C y 19 °C, con mínimas raramente por debajo de 2 °C y máximas

		que rara vez superan los 21 °C
Sistema de almacenamiento	de ¿Qué sistema de almacenamiento de agua tiene la finca?	Tanques de almacenamiento (Rotoplas, Aguamarket) con capacidad de 300,000 litros, con captación de agua de lluvia y quebrada.

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se realizó una visita a todo el sistema de riego para registrar la metodología implementada en el cultivo de arándanos e identificar las tecnologías implementadas en la finca Villa María.

Diagrama de la distribución actual de como esta el sistema de riego en la finca Villa Maria

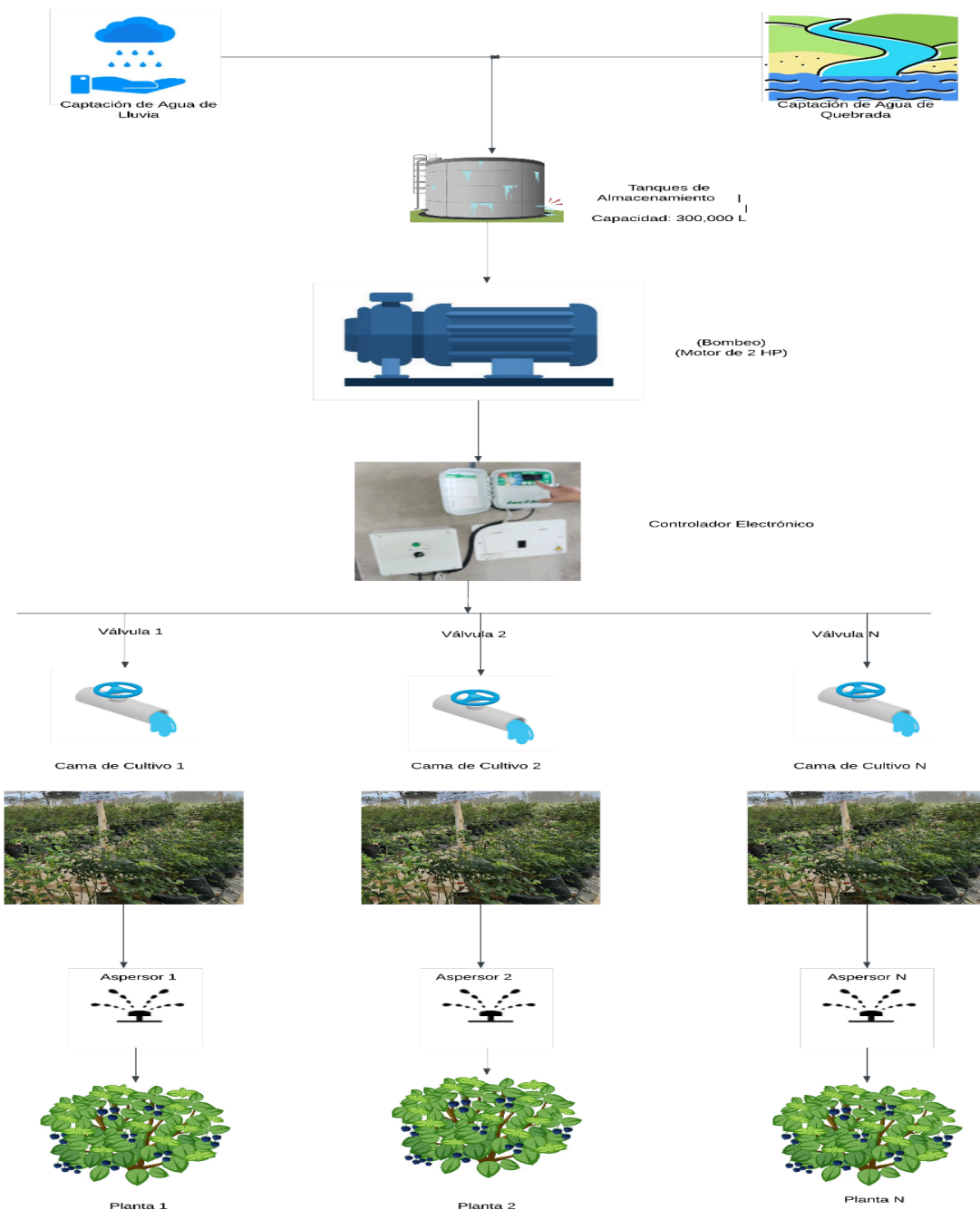


Ilustración 1. Sistema de riego finca Villa María.

Recolección de datos cualitativos finca Villa María

La finca Villa María cuenta con un sistema de riego y almacenamiento de agua avanzado, diseñado para cubrir las necesidades hídricas de sus plantas de arándano en condiciones óptimas. Este sistema combina diversas fuentes y métodos de captación de agua, junto con un sistema de distribución que permite un riego preciso y controlado para cada planta. La tecnología implementada en la finca permite una gestión eficiente del recurso hídrico, aprovechando al máximo tanto el agua de lluvia como la captación de agua de una quebrada cercana.

Uno de los elementos fundamentales del sistema hídrico en la finca es el sistema de recolección de aguas lluvias, implementado en cada invernadero. Este sistema consta de canales que captan el agua de lluvia y la dirigen hacia los tanques de almacenamiento. Los invernaderos están diseñados de manera que las cubiertas canalicen la mayor cantidad posible de agua hacia estas estructuras de recolección, lo que maximiza el aprovechamiento de las precipitaciones estacionales.



Ilustración 2. Sistema de recolección de aguas lluvia en finca Villa María.

Además del sistema de captación de lluvias, la finca también utiliza una quebrada cercana como fuente secundaria de agua. En épocas de sequía o cuando las lluvias son insuficientes, el agua de la quebrada se emplea para llenar los tanques de almacenamiento. Esta combinación de fuentes permite que la finca mantenga un suministro constante de agua, garantizando la sostenibilidad del riego incluso en condiciones climáticas adversas.



Ilustración 3. Fuente secundaria de agua en finca Villa María.

El agua recolectada se almacena en tanques de gran capacidad, que en conjunto pueden acumular hasta 300,000 litros. Estos tanques son cruciales para asegurar la disponibilidad de agua en todo momento, permitiendo que la finca pueda operar hasta tres meses sin lluvias si es necesario. La alta capacidad de almacenamiento proporciona una seguridad adicional, asegurando que el riego pueda continuar de forma ininterrumpida durante los periodos secos.



Ilustración 4. Tanques de almacenamiento de la finca Villa María.

Una vez que el agua es captada y almacenada, entra en el sistema de distribución de riego, que incluye tuberías de PVC, válvulas automáticas y un motor de 2 caballos de fuerza. Este motor es el encargado de impulsar el agua desde los tanques hasta las áreas de cultivo, asegurando que llegue con la presión adecuada a cada una de las camas de cultivo. Las tuberías de PVC son un material duradero y resistente, ideal para soportar la presión del agua y las condiciones del ambiente agrícola.



Ilustración 5. Sistema de distribución de riego en finca Villa María.

El sistema de distribución está equipado con válvulas automáticas que controlan el flujo de agua a cada cama de cultivo. Estas válvulas están programadas para abrirse y cerrarse en horarios específicos, optimizando el uso de agua y ajustando la frecuencia de riego según las necesidades del cultivo. Esto permite un riego automatizado que reduce la necesidad de intervención manual y asegura que cada planta reciba la cantidad justa de agua.

El agua llega finalmente a cada planta a través de un sistema de aspersores y lanzetas colocados directamente en las macetas de arándano. Este sistema permite un riego focalizado, evitando el desperdicio de agua y asegurando que esta se concentre en las raíces, donde es más necesaria. Las lanzetas están conectadas a la red de distribución mediante tubos flexibles, lo que facilita el flujo del agua de manera uniforme.



Ilustración 6. Sistema de sistema de aspersores y lancetas de la finca Villa María.

El sistema de riego es supervisado y controlado mediante un controlador electrónico, que permite ajustar los tiempos de riego y programar ciclos en función de las condiciones climáticas y la temporada de cultivo. Este controlador es fundamental para la automatización del sistema, ya que permite realizar ajustes sin necesidad de supervisión constante, asegurando que el riego se lleve a cabo en los momentos más adecuados del día, minimizando la evaporación y maximizando la absorción de agua por las plantas.



Ilustración 7. Controlador del sistema de riego de la finca Villa María.

El diseño de los invernaderos y de la disposición de las camas de cultivo también facilita la gestión del agua. Las camas están cubiertas por una lona que ayuda a retener la humedad en el suelo, lo que reduce la evaporación y mantiene el nivel de humedad necesario para el crecimiento de las plantas. Además, las macetas están dispuestas de manera que cada planta pueda recibir suficiente luz solar y ventilación, factores que también contribuyen a la eficiencia del sistema de riego.

Recolección de datos cuantitativos finca Villa María

Como se muestra en la tabla 5, los datos obtenidos permiten identificar promedios de consumo de agua, eficiencia hídrica y producción diaria de arándanos para un periodo comprendido entre mediados de septiembre y octubre.

Estos valores reflejan las condiciones actuales de operación, donde el consumo de agua se encuentra en un rango moderado, y la eficiencia hídrica y la productividad muestran incrementos graduales debido a los ajustes manuales realizados en el periodo de análisis. Esta información servirá como base para evaluar el impacto potencial de la implementación de tecnologías de Agricultura 4.0, que buscan optimizar estos indicadores y promover una mayor sostenibilidad en el manejo hídrico de la finca.

Tabla 5. Datos de la finca.

Fecha	Consumo de Agua (m ³)	Eficiencia Hídrica (%)	Productividad (kg/m ³)	Producción (kg)
15 de Septiembre	290	60	1	290
18 de Septiembre	285	61	1.1	314
21 de Septiembre	280	62	1.2	336
24 de Septiembre	295	62	1.2	354
27 de Septiembre	300	63	1.3	390
30 de Septiembre	300	63	1.3	390
3 de Octubre	280	64	1.4	392
6 de Octubre	275	64	1.4	385
9 de Octubre	270	65	1.5	405
12 de Octubre	285	65	1.5	428
15 de Octubre	290	66	1.6	464

Fuente: Elaboración propia

Análisis de referencias teóricas

Con este análisis se busca identificar cómo el uso de sensores de humedad del suelo, sistemas de riego automatizado e inteligencia artificial entre otras tecnológicas ha permitido mejorar la gestión del agua en estos ejemplos. Al analizar los resultados obtenidos en ambos casos, se busca destacar el potencial de aplicar enfoques similares en la Finca Villa María, resaltando los posibles beneficios en términos de ahorro de agua y sostenibilidad.

Artículo 1

El artículo "*Análisis ex post basado en satélites de la gestión del agua en un huerto de arándanos*" describe el uso de líneas de goteo con dos emisores por planta y tecnología de estimaciones espacio-temporales para mejorar la gestión del agua en una finca de Chile. Esta tecnología permitió identificar áreas homogéneas y aplicar agua de manera más eficiente, lo cual tuvo un impacto significativo en la producción de los cultivos.

Tabla 6. Análisis Artículo 1

Variables	Información recopilada
Título del informe	Análisis ex post basado en satélites de la gestión del agua en un huerto de arándanos. <i>(A satellite-based ex post analysis of water management in a blueberry orchard)</i>
Tipo de riego utilizado	Líneas de goteo con dos emisores por planta

Tecnología utilizada	Las estimaciones espacio-temporales del uso del agua permiten identificar áreas homogéneas para programas de riego específicos del sitio, lo que permite mejorar la gestión del agua en las próximas explotaciones agrícolas.
Eficiencia hídrica	La tecnología pudo mejorar el nivel de agua aplicada y la gestión del agua, esto tuvo efectos importantes en la producción de los cultivos al utilizar el agua de manera más efectiva
Prácticas sostenibles	Se utilizaron patrones anuales con diferentes etapas de crecimiento y desarrollo en diferentes estaciones del año
Frecuencia de riego	Varios pulsos por día para satisfacer los requisitos del cultivo

Fuente: Elaboración propia

Artículo 2

El artículo *"Tecnologías emergentes para el agro y su aplicación en Colombia"* aborda innovaciones tecnológicas que están transformando la agricultura en Colombia. Se centra en cómo las tecnologías emergentes como la agricultura de precisión, el uso de drones, la inteligencia artificial (IA), el Internet de las cosas (IoT) y los sistemas de riego automatizados, están optimizando el rendimiento de los cultivos y promoviendo la sostenibilidad en el sector agropecuario colombiano.

Tabla 7. Análisis Artículo 2

Variables	Información recopilada
Título del informe	Tecnologías emergentes para el agro y su aplicación en Colombia
Tipo de riego utilizado	Aeroponía
Tecnología utilizada	Internet de las Cosas (IoT)
Eficiencia hídrica	Logra reducir hasta en un 95% el consumo de agua en comparación con la agricultura convencional en suelo. Permite la auditoría y captura de los datos generados a través de la evaluación de variables como humedad relativa, temperatura, y pH, garantizando de esta manera un riego óptimo para el cultivo, y el uso eficiente del agua y los nutrientes.
Prácticas sostenibles	Optimización de la toma de decisiones en relación con el suministro de nutrientes, control de riego, entre otros aspectos a partir de los datos registrados. Ya que se ahorra agua, se reduce el uso del suelo y se acelera el tiempo del cultivo.
Frecuencia de riego	Varía dependiendo de los resultados registrados.

Fuente: Elaboración propia

Artículo 3

El artículo "*The Riego Berry mobile application*" (2024) presenta una innovadora solución en la gestión del riego para cultivos de frambuesa, desarrollada con el objetivo de mejorar la eficiencia hídrica a través del uso de tecnologías de agricultura 4.0. Este estudio explora cómo la aplicación móvil Riego Berry permite a los agricultores programar y monitorear el riego en tiempo real, utilizando datos proporcionados por sensores de humedad para ajustar manualmente el suministro de agua de acuerdo con las necesidades específicas del cultivo. La siguiente tabla resume los aspectos clave de esta tecnología tal como se describen en el artículo.

Tabla 8. Análisis Artículo 3

Variables	Información recopilada
Título del informe	La aplicación móvil Riego Berry: una potente herramienta para mejorar el rendimiento del riego en finca en cultivos de frutos rojos <i>(The Riego Berry mobile application: A powerful tool to improve on-farm irrigation performance in berry crops)</i>
Tipo de riego utilizado	Programación manual mediante aplicación móvil basada en sensores de humedad

Tecnología utilizada	Aplicación móvil Riego Berry para monitoreo y ajuste manual del riego en tiempo real basado en datos de sensores.
Eficiencia hídrica	Mejora en la eficiencia hídrica mediante reducción del sobre riego, permitiendo un ajuste más preciso en función de las necesidades de las plantas y la duración de la temporada de cultivo.
Prácticas sostenibles	Monitoreo constante y ajuste manual de los niveles de riego para evitar desperdicio de agua y optimizar el uso de recursos hídricos.
Frecuencia de riego	Ajuste manual, con posibilidad de varios pulsos diarios según la necesidad de la planta y el tipo de cultivo.

Fuente: Elaboración propia

Artículo 4

El artículo "*An IoT-Based Prototype for Optimizing Agricultural Irrigation: A Case Study in the Biobío Region of Chile*" (2024) presenta un sistema de riego automatizado diseñado para optimizar el consumo de agua en entornos agrícolas. Este prototipo utiliza sensores de humedad del suelo, conectados a través de una red IoT, para monitorear en tiempo real las necesidades hídricas de los cultivos. El sistema controla de manera automática una bomba de agua que ajusta el riego de acuerdo con los datos recibidos, maximizando la eficiencia en el uso de los recursos hídricos y minimizando el desperdicio.

Tabla 9. Análisis Artículo 4

Variables	Información recopilada
Título del informe	<p>Un prototipo basado en IoT para optimizar el riego agrícola: un estudio de caso en la región del Biobío de Chile</p> <p><i>(An IoT-Based Prototype for Optimizing Agricultural Irrigation: A Case Study in the Biobío Region of Chile)</i></p>
Tipo de riego utilizado	<p>Riego automatizado con sensores de humedad del suelo, conectado a una plataforma en la nube mediante dispositivos IoT.</p>
Tecnología utilizada	<p>Sistema de sensores de humedad del suelo y controlador remoto de riego basado en IoT, con visualización y monitoreo en tiempo real a través de una plataforma en la nube.</p>
Eficiencia hídrica	<p>Ahorro de agua significativo mediante ajustes automáticos en los niveles de riego, optimizando el uso del agua según las condiciones de humedad y clima.</p>
Prácticas sostenibles	<p>Riego automatizado que reduce el desperdicio de agua y permite una administración más precisa y controlada de los recursos hídricos, minimizando el impacto ambiental.</p>

<p>Frecuencia de riego</p>	<p>Frecuencia determinada automáticamente por el sistema, que ajusta el riego según los datos de humedad del suelo y las condiciones climáticas, sin intervención manual.</p>
----------------------------	---

Fuente: Elaboración propia

En la **Ilustración 8** se presenta el diseño general del sistema IoT utilizado en el prototipo chileno, que integra sensores de humedad del suelo, una bomba eléctrica y dispositivos de monitoreo en la nube. Este esquema permite un control preciso y automatizado del riego, ajustando la cantidad de agua según las necesidades en tiempo real. Al implementar una tecnología similar, la finca Villa María podría mejorar significativamente su eficiencia hídrica, reduciendo el uso excesivo de agua y adaptándose a las condiciones específicas del suelo.

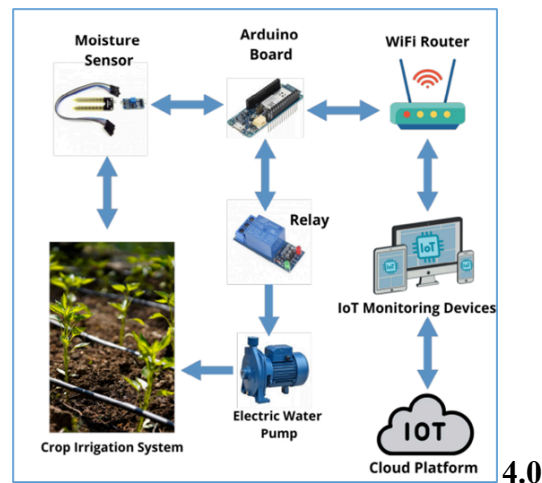


Ilustración 8. Diseño general del sistema IoT utilizado en el prototipo chileno. Figura tomado de: "*An IoT-Based Prototype for Optimizing Agricultural Irrigation: A Case Study in the Biobío Region of Chile.*"

Artículo 5

El artículo "Agricultura 4.0: uso de tecnologías de precisión y aplicación para pequeños productores" analiza cómo las tecnologías emergentes pueden transformar la agricultura a pequeña escala mediante el uso de herramientas de la Industria 4.0. Uno de los enfoques principales es el uso de riego por goteo controlado mediante sensores, ajustando la cantidad y frecuencia de agua en función de las necesidades exactas del cultivo y las condiciones climáticas.

Tabla 10. Análisis Artículo 5

Variables	Información recopilada
Título del informe	Agricultura 4.0: uso de tecnologías de precisión y aplicación para pequeños productores.
Tipo de riego utilizado	Sistema de riego por goteo.
Tecnología utilizada	Internet de las cosas (IoT).
Eficiencia hídrica	La implementación de sensores IoT y sistemas de análisis de datos mejora la eficiencia en el uso del agua hasta en un 30%, ya que permite ajustar la cantidad y frecuencia del riego en función de las necesidades exactas del cultivo. Esto no solo reduce el consumo de agua, sino que también

	optimiza el crecimiento de las plantas al evitar tanto el riego insuficiente como el exceso.
Prácticas sostenibles	Reducción del impacto ambiental al minimizar el desperdicio de recursos y fomentar una producción más limpia y controlada.
Frecuencia de riego	Se ajusta de acuerdo a la función de datos ambientales y de humedad del suelo obtenidos en tiempo real.

Fuente: Elaboración propia.

Artículo 6

El artículo “*Diseño de sistema inteligente de toma de decisiones de riego para huertos de arándanos en zonas montañosas*” describe el diseño de un sistema inteligente de toma de decisiones de riego para huertos de arándanos en zonas montañosas en China, utilizando tecnología de Internet de las Cosas (IoT). Este sistema incluye módulos para la recopilación de información ambiental y de humedad del suelo, comunicación inalámbrica, toma de decisiones inteligentes y ejecución de riego. Basado en datos en tiempo real y algoritmos como la fórmula de Penman y el balance hídrico del suelo, el sistema optimiza el riego remoto y preciso, mejorando la eficiencia hídrica y reduciendo el desperdicio de agua.

Tabla 11. Análisis Artículo 6

Variables	Información recopilada
Título del informe	Diseño de sistema inteligente de toma de decisiones de riego para huertos de arándanos en zonas montañosas.
Tipo de riego utilizado	Riego remoto y preciso controlado por un sistema inteligente.
Tecnología utilizada	Internet de las cosas, automatización remota, monitoreo de información de demanda de agua, algoritmos de toma de decisiones basados en la fórmula de Penman y la fórmula de balance hídrico del suelo y proceso de riego Control inteligente remoto.
Eficiencia hídrica	El sistema mejora la tasa de utilización del agua de riego al permitir un riego preciso basado en la demanda real de los cultivos, reduciendo el desperdicio de agua.
Prácticas sostenibles	Recopilación de información de valores de humedad en información del suelo en tiempo real.
Frecuencia de riego	El sistema determina la frecuencia de riego en tiempo real basándose en la información recopilada por los sensores y las condiciones ambientales, ajustando el riego según las necesidades específicas de los cultivos en diferentes etapas de crecimiento.

Fuente: Elaboración propia

Evaluación Teórica de Tecnologías para la Optimización del Riego

Se realizó una comparación de los artículos evaluados considerando dos criterios clave: el impacto presupuestario (costo) y la capacidad de implementación (flexibilidad). Estos criterios permitieron identificar las soluciones más viables y adaptables para la finca Villa María en función de sus necesidades actuales y futuras. Finalmente, se seleccionó la opción The Riego Berry mobile application como la alternativa más adecuada, debido a su equilibrio entre bajo costo relativo y alta flexibilidad para adaptarse a las condiciones específicas del cultivo. Esta solución destaca por su potencial para optimizar el uso del agua y mejorar la eficiencia hídrica mediante herramientas tecnológicas avanzadas.



Criterios de decisión	Capacidad de Implementación (Flexibilidad) 	
Impacto Presupuestario (Costo) 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño de sistema inteligente de toma de decisiones de riego para huertos de arándanos en zonas montañosas 	<ul style="list-style-type: none"> • The Riego Berry mobile application
	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis ex post basado en satélites de la gestión del agua en un huerto de arándanos 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologías emergentes para el agro y su aplicación en Colombia • An IoT-Based Prototype for Optimizing Agricultural Irrigation • Agricultura 4.0: uso de tecnologías de precisión y aplicación para pequeños productores

Ilustración 9. Comparación de alternativas tecnológicas según impacto presupuestario y capacidad de implementación. Fuente: Elaboración propia

Análisis de datos

Teniendo en cuenta el resultado de la matriz de decisión, se realiza una comparación de la finca Villa María y el **artículo 3**. El caso *Riego Berry* muestra una mejora significativa en la eficiencia del riego, logrando mantener niveles de eficiencia hídrica estables incluso durante temporadas prolongadas en comparación con métodos de riego tradicionales. Esta estabilidad sugiere que herramientas como la *Riego Berry App* pueden optimizar el uso del agua, reduciendo el sobre-riego y maximizando la eficiencia en el consumo. Para la finca Villa María, la implementación de una aplicación similar podría traducirse en un manejo de riego más efectivo, promoviendo prácticas sostenibles y contribuyendo a la conservación de los recursos hídricos.

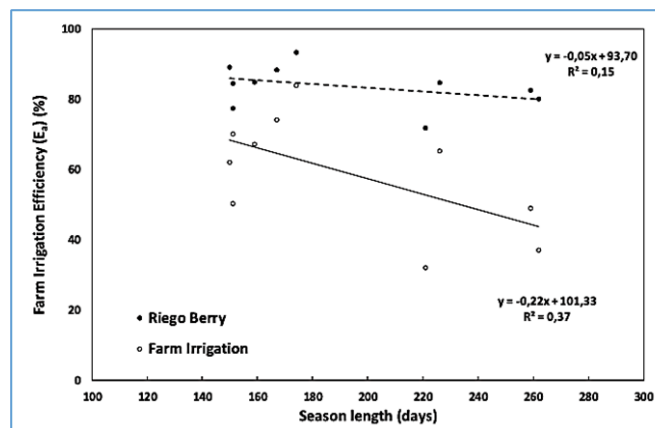


Ilustración 10. Relación entre la eficiencia de riego en la finca y la duración de la temporada en 10 ensayos de riego de frambuesa programados con la *Riego Berry App* y regados por agricultores. *Figura tomada de: " The Riego Berry mobile application "*

Datos Relevantes del Informe de Riego Berry

A continuación, se presentan los datos clave obtenidos del informe "Riego Berry", los cuales servirán como base para las proyecciones a realizar en la finca Villa María. Estos datos incluyen información sobre la eficiencia hídrica, el consumo de agua, la productividad del agua y la producción total en cultivos similares. La presentación de estos datos permite establecer una referencia inicial para evaluar el impacto potencial de implementar tecnologías avanzadas de riego.

1. Datos de Eficiencia Hídrica y Producción

Tabla 12: Comparación de la eficiencia hídrica y la productividad en 10 ensayos de riego programados con la aplicación Riego Berry frente a métodos tradicionales de agricultores.

Trial	Cultivar	Season Length (days)	IWA (m ³ /ha)	ETc (m ³ /ha)	Ea (%)	IWP (kg/m ³)	Production (t/ha)
1	Versailles	151	1390	1075	77	6.4	8.8
2	San Rafael	167	1958	1729	88	11.3	22.2
3	San Rafael	174	1985	1852	93	13	25.8
4	Majestic	150	2461	2193	89	2.5	6.2
5	Diamond Jub	151	2208	1866	85	7.4	16.3
Promedio		162	2000	1803	86.4	8.6	15.9

Tomada de: " The Riego Berry mobile application "

3. Productividad Económica y del Agua

Tabla 13: Comparación de la productividad del agua y la eficiencia económica en cultivos bajo tratamientos de Riego Berry y métodos tradicionales.

Variable	Riego Berry	Métodos Tradicionales
Eficiencia hídrica (Ea)	0.84	0.59
Productividad del agua (IWP)	5.6 kg/m ³	3.0 kg/m ³
Producción promedio (t/ha)	14.1	6.6
Relación EWP (€/m ³)	1.42	0.74

Tomada de: " The Riego Berry mobile application "

Estos datos muestran una mejora significativa en la eficiencia hídrica y en la productividad del agua gracias al uso de la aplicación Riego Berry, destacando su capacidad para reducir el consumo de agua al tiempo que maximiza la producción. Con base en esta información, procederemos a extrapolar los resultados a las condiciones actuales de la finca Villa María para analizar su posible impacto.

Análisis Comparativo y Proyección para la Finca Villa María

La implementación de tecnologías avanzadas de riego, como las utilizadas en la aplicación Riego Berry, ha demostrado mejorar significativamente la eficiencia hídrica y la productividad en cultivos similares. Esta sección presenta un análisis comparativo entre los datos iniciales de la Finca Villa María y los resultados observados en el informe de Riego Berry. Con

este análisis, se proyectan los beneficios potenciales de adoptar tecnologías similares en Villa María.

Para realizar esta comparación, se tomó como base el consumo anual estimado de **3,000 m³/ha** en la finca Villa María. Este valor se calcula considerando la información proporcionada por la finca, que cuenta con **6,000 matas de arándanos en producción**, distribuidas en **10 camas de cultivo**, cada una con aproximadamente **600 plantas**. Este consumo refleja las necesidades de agua de las plantas y las características del sistema de riego tradicional por aspersión utilizado en la finca, el cual se considera menos eficiente en comparación con sistemas automatizados avanzados.

Este cálculo inicial es fundamental para establecer un punto de partida y permitir las comparaciones necesarias con los datos obtenidos en el informe de Riego Berry. Al utilizar estas métricas como referencia, se proyectan los incrementos potenciales en la eficiencia hídrica y la reducción en el consumo de agua que podrían lograrse mediante la adopción de tecnologías similares. En la siguiente tabla se presentan las principales métricas comparadas entre el estado actual de la finca y las proyecciones basadas en la adopción de las tecnologías de Riego Berry:

Tabla 14. Proyección finca Villa María.

Variable	Villa María Actual	Villa María Proyectada con Riego Berry
Eficiencia hídrica (%)	70.0%	84.0%
Consumo de agua (m ³ /ha)	3000	2250
Productividad (kg/m ³)	1.2	2.8

Producción total anual (kg)	36000	60480
-----------------------------	-------	-------

Fuente: Elaboración propia

La siguiente figura muestra la proyección de mejora en la eficiencia hídrica y la reducción del consumo de agua para la finca Villa María, basada en un análisis comparativo con los resultados del informe de Riego Berry. El modelo plantea un incremento progresivo en la eficiencia hídrica, alcanzando un 84% al final de un periodo de ocho semanas, acompañado de una disminución en el consumo de agua desde 3,000 m³/ha a 2,250 m³/ha.

Este análisis considera la implementación gradual de tecnologías avanzadas como sensores de humedad y sistemas de riego automatizado, los cuales optimizan la gestión del agua ajustándose a las condiciones específicas del suelo y el cultivo. En estudios previos, como el de Riego Berry, se evidenció un incremento significativo en la eficiencia hídrica, pasando del 59% al 84% tras la adopción de estas tecnologías, siguiendo un patrón de mejora escalonada consistente con la calibración inicial del sistema. Por lo tanto, estos datos proyectados representan una estimación fundamentada y realista que respalda el potencial de estas tecnologías para transformar la gestión hídrica en Villa María, mejorando la sostenibilidad y la productividad del cultivo.

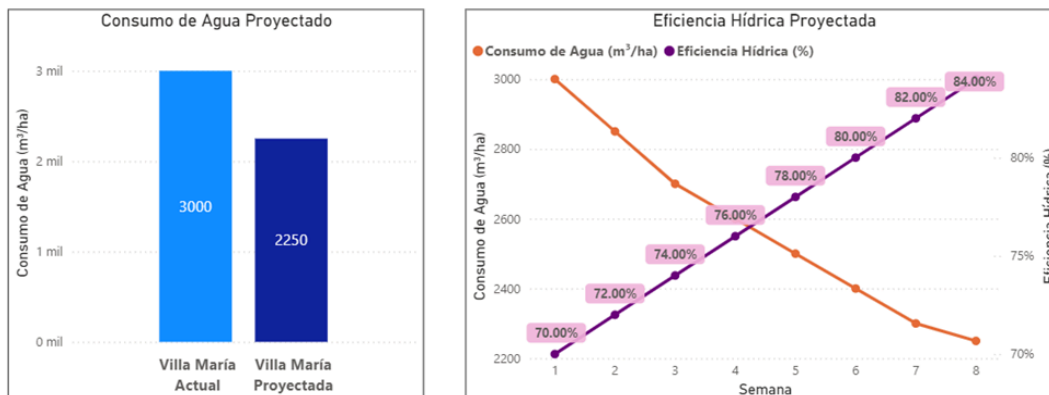


Ilustración 11. Proyección de consumo y eficiencia hídrica en la finca Villa María.

Fuente: elaboración propia.

Tal y como se contempla en el artículo de Riego Berry, estas tecnologías impactarían directamente en la producción agrícola al optimizar el uso del agua y mejorar la eficiencia hídrica. Se proyecta un aumento en la producción total anual de 36,000 kg a 60,480 kg, acompañado de una mejora en la productividad del agua de 1 kg/m³ a 2.8 kg/m³ tras ocho semanas de ajuste tecnológico. Estas mejoras, ilustradas en la siguiente figura, refuerzan el potencial de estas tecnologías para maximizar el rendimiento agrícola y promover prácticas sostenibles.

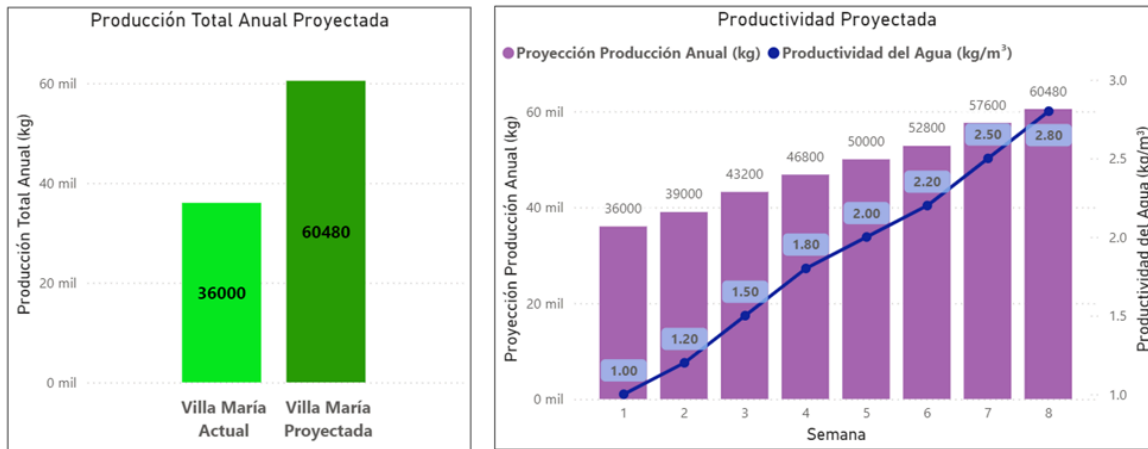


Ilustración 12. Proyección de producción y productividad en la finca Villa María.

Fuente: elaboración propia.

Análisis de Impacto

El impacto de estas proyecciones puede resumirse en los siguientes puntos:

- **Sostenibilidad Hídrica:** La reducción del consumo de agua en aproximadamente un 25% posiciona a la finca como un modelo de gestión hídrica sostenible.
- **Incremento en Productividad:** Con una productividad proyectada de 2.8 kg/m³, Villa María podría optimizar su rendimiento sin necesidad de aumentar recursos.
- **Costos Operativos:** La eficiencia en el uso del agua también podría reducir los costos asociados al riego, haciendo que la inversión inicial en tecnología sea rápidamente recuperable.

Con la implementación de tecnologías de Agricultura 4.0 similares a Riego Berry, la Finca Villa María podría transformarse en un ejemplo de innovación sostenible en el cultivo de arándanos. Las mejoras en eficiencia hídrica y productividad no solo contribuirían al éxito

económico de la finca, sino que también promoverán prácticas más responsables con el medio ambiente.

Recomendaciones

1. Estado actual finca Villa María

La finca Villa María cuenta actualmente con un sistema de riego adecuado, acorde a sus necesidades y tamaño, lo cual es fundamental para mantener el rendimiento de los cultivos de arándanos. El sistema actual permite una distribución eficiente del agua, optimizando el recurso hídrico y garantizando que las plantas reciban la cantidad de agua necesaria para su crecimiento.

En el futuro, sería recomendable considerar la implementación de tecnologías de agricultura 4.0, como sensores de humedad, sistemas de monitoreo en tiempo real, y riego automatizado. Estas herramientas permitirían un control más preciso de los niveles de agua, ayudando a mejorar aún más la eficiencia hídrica y a reducir costos a largo plazo. Sin embargo, debido a los costos asociados con estas tecnologías avanzadas, se sugiere que su adquisición sea en el mediano o largo plazo, conforme la finca aumente su capacidad de inversión o cuando los precios de estas tecnologías se tornen más accesibles.

2. Desarrollo de una Aplicación Móvil de Monitoreo y Control de Riego

Dado el éxito de aplicaciones como Riego Berry en la mejora de la eficiencia hídrica, se recomienda el desarrollo de una aplicación móvil personalizada para la finca Villa María. Esta aplicación podría integrarse con los sensores de humedad y el sistema de riego automatizado,

permitiendo monitorear el estado del suelo en tiempo real y programar el riego de manera remota. Además, incluir funciones de alerta y reportes de consumo de agua facilitaría la toma de decisiones informadas y ayudaría a prevenir el sobre-riego. Una aplicación de este tipo no solo aumentaría la eficiencia hídrica, sino que también mejoraría el control y la accesibilidad del sistema, optimizando el uso de recursos en la finca.

3. Implementación de Algoritmos de Machine Learning para Predicción de Necesidades Hídricas

Se recomienda implementar algoritmos de Machine Learning, como regresión lineal y K-Nearest Neighbors (KNN), para predecir las necesidades de riego en la finca Villa María. Estos modelos permitirían analizar patrones históricos de humedad del suelo y temperatura para anticipar la demanda hídrica de los cultivos, optimizando la frecuencia y cantidad de riego de manera automática. La aplicación de estos algoritmos ayudaría a reducir el consumo de agua, minimizar el estrés hídrico en las plantas y aumentar la eficiencia operativa al automatizar la toma de decisiones. La implementación de Machine Learning en el riego automatizado podría contribuir a una gestión de recursos más sostenible y ajustada a las condiciones climáticas variables.

4. Proyección a largo plazo

Implementar un sistema inteligente de riego basado en la tecnología de Internet de las Cosas (IoT) en la finca Villa María puede ser una opción para un futuro de expansión del cultivo, debido a que este sistema debe incluir sensores de humedad del suelo y estaciones

meteorológicas para recopilar datos en tiempo real, módulos de comunicación inalámbrica para transmitir esta información a un servidor central, y algoritmos avanzados para calcular las necesidades de riego. Aunque la inversión inicial en estos equipos y tecnologías puede ser significativa, los beneficios a largo plazo incluyen una mayor eficiencia en el uso del agua, reducción de costos operativos y mano de obra, y la posibilidad de aumentar la productividad de los cultivos.

Conclusiones

1. Las tecnologías más importantes encontradas en la investigación fueron sensores de humedad, uso de estaciones meteorológicas, algoritmos de toma de decisiones basados en la fórmula de Penman y la fórmula de balance hídrico del suelo, plataformas de software como Visual Studio para el control y monitoreo, automatización en los sistemas de riego y plataformas en la nube mediante dispositivos IoT para poder realizar seguimientos en los cultivos de arándanos y mejorar la eficiencia en el sistema de riego de los diferentes estudios.
2. El uso de tecnologías 4.0 como sensores de humedad y sistemas de riego inteligente en los cultivos de arándanos permite optimizar la aplicación de agua. Al detectar la humedad del suelo y ajustar la frecuencia de riego, se evita el desperdicio y se asegura que las plantas reciban la cantidad exacta que necesitan. Esto es especialmente relevante en zonas de sequía, donde esta tecnología ha reducido el uso de agua hasta en un 30% sin comprometer el rendimiento del cultivo.

3. Las tecnologías de precisión, como el Internet de las Cosas (IoT) y el uso de drones, permiten controlar factores ambientales y ajustar los insumos necesarios para optimizar la producción de arándanos. Este aumento en la calidad y cantidad del cultivo produce mayores ingresos para los productores.
4. El análisis comparativo con casos internacionales muestra que la implementación de tecnologías avanzadas, como sensores de humedad, sistemas de teledetección y aplicaciones móviles de monitoreo, ha permitido a otras fincas optimizar el uso del agua en sus cultivos. Estas estrategias han demostrado ser eficaces para ajustar el suministro hídrico en tiempo real, reducir el desperdicio y aumentar la eficiencia operativa. Adaptar estas prácticas en la finca Villa María podría no solo mejorar la sostenibilidad del cultivo de arándanos, sino también contribuir a una gestión hídrica más responsable y eficiente, alineada con los retos ambientales actuales.

Referencias

- García, L., Rodríguez, M., & López, A. (2022). Agricultura de Precisión y el Futuro de la Sostenibilidad en Cultivos. *Journal of Agricultural Technologies*, 15(2), 123-135.
- Holzapfel, E., Lillo-Saavedra, M., Rivera, D., Gavilán, V., García-Pedrero, A., & Gonzalo-Martín, C. (2020). A satellite-based ex post analysis of water management in a blueberry orchard. *Computers and Electronics in Agriculture*, 176(105635), 105635. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105635>
- IDEAM. (2020). Informe sobre el Estado de los Recursos Hídricos en Colombia. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Uso del Agua en la Agricultura Colombiana: Retos y Oportunidades. Bogotá: Gobierno de Colombia.
- Morales, F., Pabón, J., & Ríos, C. (2021). Cambio Climático y su Impacto en la Agricultura Colombiana. *Revista Climatológica*, 14(1), 45-60.
- Pérez, R., Ramírez, C., & Salazar, D. (2020). Tecnologías Emergentes en la Agricultura 4.0 en Colombia. *Revista Innovación Tecnológica*, 9(3), 99-110.
- Ramírez, C., Salazar, D., & Valencia, P. (2020). Gestión Sostenible del Agua en Cultivos de Fresas: Un Estudio en Zonas Rurales de Cundinamarca. *Revista Colombiana de Ingeniería Agrícola*, 12(4), 202-215.
- Rodríguez, J., Pérez, R., & Morales, F. (2019). Impacto del Riego en el Cultivo de Fresas en Zonas de Alta Montaña. *Revista Colombiana de Agricultura*, 18(3), 205-220.
- Salazar, D., & Valencia, P. (2020). Innovaciones en Riego para la Sostenibilidad en la Agricultura Colombiana. *Journal of Sustainable Agriculture*, 10(1), 101-115.

- Correa Assmus, G. (2022). Disponibilidad, acceso y calidad del agua: una reflexión socioambiental para Colombia. *Revista de la Universidad de La Salle*, (87), 151-166.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2018). Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua ENA 2018. <https://bit.ly/316Q7B4>
- Grattan, S. R., et al. (2017). Water management in agriculture: optimizing irrigation in blueberry production. *Journal of Irrigation Science*, 35(2), 101-112.
- O'Connell, M., & Goodwin, N. (2020). Precision agriculture technologies and decision support tools: Improving water use efficiency in agriculture. *Agricultural Water Management*, 241, 106389.
- Sharma, A., et al. (2020). Application of artificial intelligence in agricultural water management for sustainable crop production: A review. *Water Resources Management*, 34(11), 3443-3463.
- Zhang, Y., et al. (2021). Utilizing sensor technology for precision irrigation management in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106296.
- CAR. (2020). *Política de Gestión del Recurso Hídrico en la Región de Cundinamarca*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- MinAmbiente. (2016). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia.
- Zhang, Y., Zhao, X., Liu, X., & Wang, J. (2021). Precision agriculture technologies for water use efficiency in crop production: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106296.

- Sharma, A., Irmak, S., & Djaman, K. (2020). Artificial intelligence techniques in agricultural water management: A comprehensive review. *Water Resources Management*, 34(11), 3443-3465.
- Bellingham, B. K. (2014). Sensor based irrigation scheduling in blueberries. In M. R. Goyal (Ed.), *Sustainable Micro Irrigation Management for Trees and Vines* (pp. 354). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/b17302>
- He, Z., Cao, H., Xing, X., Hu, Q., & Li, Z. (2024). Optimization of leaching level and alternating drip irrigation start time improved water saving, yield enhancement, and salt leaching. *Industrial Crops and Products*, 119537. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119537>
- Barickman, T. C., Young, B. G., Ling, P. P., & Leskovar, D. I. (2024). Machine Learning for the estimation of foliar nitrogen content in pineapple crops using multispectral images and IoT platforms. *Journal of Agricultural Informatics*.
- Digra, M., Rajput, P., & Sharma, P. (2024). Advances in smart farming for precision agriculture: Green-IoT and machine learning as a solution. In *Next Generation Computing and Information Systems* (1st ed.). CRC Press.
- Parra-López, C., Abdallah, S. B., Garcia-Garcia, G., Hassoun, A., Sánchez-Zamora, P., Trollman, H., Jagtap, S., & Carmona-Torres, C. (2024). Integrating digital technologies in agriculture for climate change adaptation and mitigation: State of the art and future

perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 109412.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109412>

- Kushwaha, P., Nazir, A., Bansal, R., & Lone, F. R. (2024). Time series analysis of vegetation change using remote sensing, GIS and FB Prophet. In *Next Generation Computing and Information Systems* (1st ed.). CRC Press.
- Garcia, A., Ahmed, M., Liu, M., & Ahmed, W. (2025). Remote sensing in hydrology: A systematic review of its applications in the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Hydrological Research*, 31(2), 191-204.
- Sheline, C., Grant, F., Gelmini, S., Pratt, S., & Winter, A. G. (2024). Designing a predictive optimal water and energy irrigation (POWEIr) controller for solar-powered drip irrigation systems in resource-constrained contexts. *Applied Energy*, 124107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124107>
- SHEN Jianwei, LI Lin, WEI Xinhua. Diseño de un sistema de decisión de riego inteligente para huertos de arándanos en áreas montañosas. *Journal of Agriculture Machinery*, 2018, 49(s1): 379-386.
- Uztürk, D., & Büyüközkan, G. (2024). Industry 4.0 technologies in Smart Agriculture: A review and a Technology Assessment Model proposition. *Technological Forecasting and Social Change*, 123640. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123640>

- Villanueva, M. I., & Méndez, P. (2024). Precision agriculture in avocado production: Mapping the landscape of scientific and technological developments. *Agricultural Systems*, 180, 102797.
- Eladl, S. G., Haikal, A. Y., Saafan, M. M., & ZainEldin, H. Y. (2024). A proposed plant classification framework for smart agricultural applications using UAV images and artificial intelligence techniques. *Alexandria Engineering Journal*, 109, 466–481. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.08.076>
- Zarco-Tejada, P. J., Hubbard, N., & Loudjani, P. (2018). Precision agriculture technologies for irrigation water management. *Remote Sensing*, 10(11), 1774. <https://doi.org/10.3390/rs10111774>
- Bardin, L. (2002). *Análisis de contenido*. Akal.
- Angrosino, M. (2012). *Observación y etnografía*. McGraw-Hill.
- Dancey, C. P., & Reidy, J. (2017). *Statistics without maths for psychology* (7th ed.). Pearson.
- Agrosavia. (2023). *Tecnologías emergentes para el agro y su aplicación en Colombia*.
- Tovar-Quiroz, A. D. (2023). *Agricultura 4.0: Uso de tecnologías de precisión y aplicación para pequeños productores*.