

SERIE TÉCNICA

Experiencias y avances en la mejora de la eficiencia del uso del agua de riego mediante la **plataforma agraria satelital PLAS** en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia

NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA EL AUMENTO DE LA EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA EN LA AGRICULTURA DE ALC AL 2030 PLAS-ALC



Producto 6

Análisis de información por piloto tecnológico y escala (parcela y cuenca) por país, y principales recomendaciones para el aumento de la Eficiencia del Uso del Agua.

Claudio Balbontín, Jesús Garrido, Alfonso Calera, Roberto Martínez, Ayelén Montenegro, Fernando González, Carlos Puertas, Liliana Ríos, Claudio García, Álvaro Otero, Claudia Bavestrello, Britt Wallberg.

2025

Proyecto Plataforma de gestión del agua en la agricultura 2030, ATN_RF-17950-RG





Códigos JEL: Q16

ISBN:

FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es un mecanismo único de cooperación técnica entre países de América Latina, el Caribe y España, que promueve la competitividad y la seguridad alimentaria. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), FONTAGRO, de sus Directorios Ejecutivos ni de los países que representan.

El presente documento ha sido preparado por Claudio Balbontín, Jesús Garrido, Alfonso Calera, Roberto Martínez, Ayelén Montenegro, Fernando González, Carlos Puertas, Liliana Ríos, Claudio García, Álvaro Otero, Claudia Bavestrello, Britt Wallberg.

Copyright © 2024 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial- SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

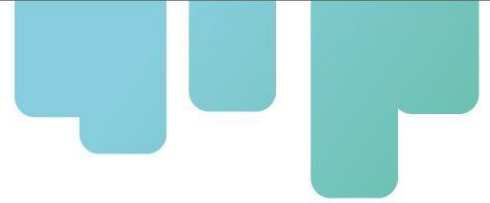
Esta publicación puede solicitarse a:



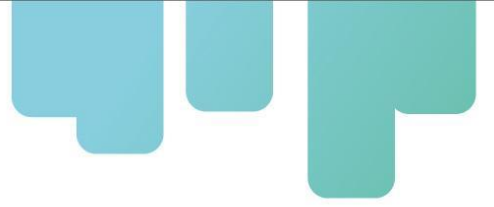
Tabla de Contenidos

Tabla de contenido

RESUMEN	6
ABSTRACT	7
1. RESUMEN EJECUTIVO DEL PROYECTO	8
EL PROYECTO PLAS-ALC. OBJETIVOS	8
CLIMA, CULTIVOS Y SUELOS	9
METODOLOGÍA E INNOVACIÓN	10
2. RESULTADOS.....	11
2.1 CONTABILIDAD DEL AGUA A NIVEL DE CUENCA	11
2.1.1 Valle del Río Elqui: Contabilidad del Agua de Riego Asistida por Teledetección	11
2.1.2 Villa Regina: Contabilidad del Agua de Riego Asistida por Teledetección	15
2.1.3 Tunuyán Inferior: Contabilidad del Agua de Riego Asistida por Teledetección	17
2.1.4 Colonia Fiscal Sarmiento: Contabilidad del Agua de Riego Asistida por Teledetección	20
2.1.5 Arroyo del Tala: Contabilidad del Agua de Riego Asistida por Teledetección	23
2.1.6 Distrito RUT: Contabilidad del Agua de Riego Asistida por Teledetección	26
2.1.7 Resumen de la contabilidad del agua a nivel de cuenca	29
2.1.8 CONCLUSIÓN GENERAL A ESCALA DE CUENCA	31
2.2 RESULTADOS POR PAÍS: ESCALA DE PARCELA	33
2.2.1 Argentina - Cultivo de Pera	33
2.2.2 Argentina - Cultivo de Maíz	35
2.2.3 Argentina - Cultivo de Vid	38
2.2.4 Argentina - Cultivo de Tomate	41
2.2.5 Chile - Cultivo de Lechuga	44
2.2.6 Chile - Cultivo de Habas	46



2.2.7 Chile - Cultivo de Papas.....	48
2.2.8 Chile - Cultivo de Poroto Verde	50
2.2.9 Chile - Cultivo de Maíz	52
2.2.10 Chile - Cultivo de Uva de Mesa	54
2.2.11 Chile - Cultivo de Mandarinas.....	56
2.2.12 Chile - Cultivo de Alfalfa.....	58
2.2.13 Chile - Piloto Tecnológico en el Centro Experimental INIA Choapa	61
2.2.14 Resultados por país: Colombia - Piloto Tecnológico en el Cultivo de Lima Ácida Tahití, C.I. Palmira	63
2.2.15 Resultados por país: Colombia Piloto Tecnológico en Cultivos Tropicales Asistido por Sensores y Redes IoT – Colombia	65
2.2.16 Uruguay – Cultivo de Soja.....	67
2.2.17 Uruguay - Cultivo de Maíz.....	69
2.2.18 Uruguay - Pasturas Permanentes	71
2.2.19 CONCLUSIÓN A ESCALA DE PARCELA	73
2.2.20 PRINCIPALES RECOMENDACIONES PARA EL AUMENTO DE LA EFICIENCIA HÍDRICA A ESCALA DE PARCELA	74
3. LEGADO Y RECOMENDACIONES.....	75
3.PRODUCTOS DE DIFUSIÓN CON RECOMENDACIONES.....	77
3.1 SERIE TÉCNICA INIA URUGUAY.	77
3.2 AGRICULTURA 4.0: CUÁNDO, CUANTO Y CÓMO REGAR.	81
4. CONCLUSIONES.....	83





RESUMEN

La iniciativa **“Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia en la agricultura ALC-2030”** de **FONTAGRO**, financiado por FONTAGRO, integra tecnologías satelitales y herramientas digitales para mejorar la gestión del agua de riego en América Latina y el Caribe (ALC). Mediante la implementación de la **Plataforma Agraria Satelital PLAS-ALC**, se logró determinar con precisión las necesidades de agua de riego a nivel de parcela y realizar la contabilidad del agua a escala de zona regable. El proyecto se llevó a cabo en diversos contextos climáticos y agrícolas de Argentina, Chile, Colombia y Uruguay, donde se validaron metodologías innovadoras como el uso del índice NDVI y la metodología Kc-ET_o asistida por satélite. Los resultados demuestran la viabilidad técnica y económica de estas tecnologías, destacando ahorros significativos en consumo hídrico y mejoras en productividad. Además, se desarrollaron productos de difusión como la serie técnica de INIA Uruguay y el manual **“Agricultura 4.0: Cuándo, cuánto y cómo regar”**, enfocado en la implementación de tecnologías IoT y monitoreo remoto en Colombia. Estas iniciativas refuerzan la necesidad de políticas públicas que promuevan la adopción de tecnologías avanzadas y programas de capacitación para técnicos y agricultores, asegurando la sostenibilidad agrícola y la eficiencia hídrica en ALC.

Palabras Clave: América Latina, gestión hídrica, teledetección, PLAS-ALC.



ABSTRACT

The initiative "New Technologies for Increasing Efficiency in Agriculture ALC-2030" by FONTAGRO, funded by FONTAGRO, integrates satellite technologies and digital tools to improve irrigation water management in Latin America and the Caribbean (LAC). Through the implementation of the Satellite Agrarian Platform PLAS-ALC, it successfully determined irrigation water requirements at the plot level and conducted water accounting at the irrigated area scale. The project was carried out in diverse climatic and agricultural contexts in Argentina, Chile, Colombia, and Uruguay, where innovative methodologies such as the NDVI index and the satellite-assisted Kc-ET_o methodology were validated. The results demonstrate the technical and economic feasibility of these technologies, highlighting significant water savings and productivity improvements. Additionally, dissemination products such as the INIA Uruguay technical series and the manual "Agriculture 4.0: When, How Much, and How to Irrigate," focused on implementing IoT technologies and remote monitoring in Colombia, were developed. These initiatives underscore the need for public policies that promote the adoption of advanced technologies and training programs for technicians and farmers, ensuring agricultural sustainability and water efficiency in LAC.

Keywords: Latin America, water management, remote sensing, PLAS-ALC.

1. RESUMEN EJECUTIVO DEL PROYECTO

EL PROYECTO PLAS-ALC. OBJETIVOS

El proyecto ***Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia del uso del agua en la agricultura de ALC al 2030***, PLAS-ALC, financiado por FONTAGRO en su convocatoria 2020, ha sido ejecutado por las instituciones y entidades de Argentina, Chile, Colombia, España y Uruguay que se indican en la Cuadro 1.

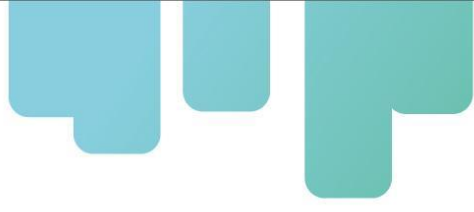
En dicho proyecto se busca la modernización de herramientas tecnológicas capaces de contribuir a la mejora del uso de agua en la agricultura. Así, a lo largo del proyecto se ha demostrado que la integración de la información satelital proporcionada por los satélites gemelos Sentinel 2A y 2B (programa COPERNICUS, Comisión Europea), junto con información meteorológica local, produce información útil y precisa sobre la demanda de agua de los cultivos. Además, la implementación de la denominada **Plataforma Agraria Satelital en América Latina y Caribe PLAS-ALC**, desarrollada en cooperación con los usuarios, ha sido capaz de trasladar estos datos a manos del técnico, regante y/o gestor del agua para su uso de forma eficaz. El sistema PLAS-ALC es pues una herramienta que mejora de la eficiencia en el uso del agua de riego, tanto a escala de parcela como a escala de zona regable.

El primer objetivo del proyecto es la determinación de forma precisa de las necesidades de agua de riego a aplicar a los cultivos en tiempo real, a escala de parcela y a lo largo de su ciclo de su desarrollo.

El segundo objetivo es realizar la contabilidad del agua de riego a escala de zona regable. Consiste en la determinar de las necesidades de agua para las superficies en bajo riego durante una o más campañas de riego, para proporcionar información a los gestores del agua de las zonas regables y de cómo esta se reparte esta demanda en el tiempo.

Cuadro 1. Países e instituciones co-ejecutoras de la iniciativa.

País	Institución/Entidad	Profesionales/Responsables
Argentina	INTA Río Negro	Roberto Martínez, Ayelén Montenegro.
	INTA San Juan	Fernando González
	INTA Mendoza	Carlo Puertas, Daiana Mateo.
Argentina	DGI Irrigación Mendoza	Guillermo Cuneo, Julieta Ferrer, Rubén Villodas.
Chile	INIA Chile	Claudio Balbontín, Claudia Bavestrello, Britt



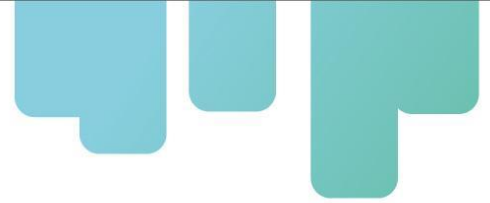
	(coordinación)	Wallberg.
Colombia	AGROSAVIA	Liliana Ríos, Mauricio Martínez.
España	UCLM	Alfonso Calera, Jesús Garrido Rubio, José González, Joan Miquel Galve.
	AgriSat	Vicente Bodas.
Uruguay	INIA Uruguay	Claudio García, Alvaro Otero.

CLIMA, CULTIVOS Y SUELOS

El proyecto PLAS-ALC se ha desarrollado en pilotos agrícolas con ambientes y climas muy diferentes, que van desde clima árido y semiárido en Argentina y Chile, tropical en Colombia y sub-tropical húmedo en Uruguay. Por esta condición, los cultivos sobre los que se han desarrollado los ensayos y validaciones son muy variados, y representativos de la diversidad de climas mencionados, como se indica en la **Cuadro 2**.

Cuadro 2. Entornos, climas, suelos y cultivos en el proyecto PLAS-ALC

PAÍS	Zona	Clima y Precipitación (mm/año)	Zona Regable / Contabilidad del agua	Cultivos Ensayos
Argentina	Mendoza	Árido 250 mm	Tunuyán inferior, Mendoza	Vid
	San Juan	Árido 250 mm		Tomate
	Rio Negro	Árido a semiárido 200 a 380 mm/año	Villa Regina e IDEVI (Alto Valle y Valle Inferior del río Negro) Río Negro	Maíz, alfalfa, Manzano, Pera
Chile	Valle del Elqui	Árido 50-80 mm	Valle del Elqui, Coquimbo	Vid, cítrico, hortaliza.



Uruguay	Arroyo del Tala	Subtropical húmedo 1300-1600 mm	Cuenca del Arroyo del Tala	Soja, arroz, maíz y pastura.
Colombia	Valle del Cauca	Tropical húmedo 1600 mm	Asorut, Valle del Cauca	Lima, papaya.

METODOLOGÍA E INNOVACIÓN

Para estimar la demanda de agua de riego de los cultivos, tanto a escala de parcela como de zona regable, se ha implementado y evaluado la metodología denominada Kc-ET_o FAO56 ASISTIDA POR SATÉLITE, que se apoya en el ampliamente aceptado Manual N°56 de FAO (Allen et al., 1998). La innovación conceptual es el uso del patrón temporal del Índice de Vegetación Satelital NDVI para describir la evolución de los valores del coeficiente de cultivo basal (K_{cb}). El NDVI se calcula a partir de las reflectancias registradas en las bandas multiespectrales de las imágenes adquiridas por los satélites gemelos Sentinel 2A y 2B, del programa COPERNICUS de la Comisión Europea. La resolución espacial de 10 m por 10 m de estas imágenes, junto a su resolución temporal de 3-5 días, permite el monitoreo de la cubierta vegetal con una frecuencia de revisita y detalle espacial no conocidas hasta el lanzamiento de la constelación Sentinel 2 en el año 2017.

La Evapotranspiración de Referencia (ET_o), el otro pilar necesario para obtener las demandas de agua de los cultivos, se obtiene bien de estaciones meteorológicas o bien de mapas globales elaborados sobre modelos numéricos de predicción meteorológica, que se usan en ausencia de estaciones meteorológicas cercanas confiables.

La innovación tecnológica es la implementación de una PLATAforma Satelital “on line PLAS”, que, con tecnologías webGIS, permite a técnicos y usuarios consultar en forma simple, numérica y gráfica, las demandas de agua de los cultivos. Asimismo, permite seguir el desarrollo y crecimiento de la cubierta vegetal del cultivo de forma numérica a través de imágenes. Productos tales como composición RGB, índice NDVI y K_{cb}, derivados las imágenes satelitales adquiridas, así como los mapas de evapotranspiración de referencia, desde modelos numéricos, permiten este seguimiento.

Avances en las imágenes de satélite y en los mapas globales de ET_o, integrados dentro de la plataforma webGIS PLAS ALC, permiten aplicar una metodología estándar en todas las zonas analizadas y a los diferentes cultivos para estimar el consumo hídrico.

2. RESULTADOS

2.1 CONTABILIDAD DEL AGUA A NIVEL DE CUENCA

2.1.1 Valle del Río Elqui: Contabilidad del Agua de Riego Asistida por Teledetección

Introducción

El Valle del Río Elqui, ubicado en la región de Coquimbo, Chile, representa una cuenca clave para la gestión del agua en sistemas agrícolas bajo condiciones de alta aridez. La cuenca alberga una diversidad de cultivos como vid, maíz, papas y alfalfa, cuya producción depende en gran medida de un uso eficiente de los recursos hídricos disponibles. En este contexto, se implementó la metodología de contabilidad del agua de riego asistida por teledetección para proporcionar información detallada y espacialmente distribuida sobre las necesidades netas de riego (NIR) y la eficiencia en la asignación de agua. Este análisis es fundamental para optimizar las prácticas de manejo del riego y contribuir a la sostenibilidad hídrica en la región.

Metodología

La contabilidad del agua de riego en el Valle del Río Elqui se realizó utilizando la metodología de balance hídrico asistido por teledetección basada en el modelo FAO56. Este enfoque permitió estimar las necesidades netas de agua de riego a través de los siguientes componentes clave:

1. Datos de entrada al modelo:

- Series temporales de índices de vegetación (NDVI) obtenidas del satélite Sentinel-2.
- Mapas de tipos de suelo según propiedades hidrológicas.
- Clasificación de usos del suelo en regadío.
- Datos agroclimáticos diarios de precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET_o).

2. Escala de análisis:

- Se analizaron datos a escala de cuenca considerando el perímetro total y las zonas de riego. Las campañas de riego incluyeron los años 2018/2019, 2019/2020 y 2020/2021.

3. Procesamiento y evaluación:

- Las necesidades netas de riego (NIR) se calcularon pixel a pixel con una resolución de 10 m, generando mapas mensuales y anuales para cada campaña de riego.
- Se evaluó la eficiencia en la asignación de agua comparando los volúmenes brutos asignados por la Junta de Vigilancia del Río Elqui (JVRE) con las estimaciones derivadas del modelo.



Con esta metodología, se busca proveer información robusta y escalable para apoyar la toma de decisiones en la gestión hídrica de la cuenca.

Resultados

1. Distribución espacial de las NIR:

- Los mapas generados para las tres campañas de riego muestran una distribución heterogénea de las necesidades netas de riego en el Valle del Río Elqui, con valores más altos concentrados en áreas de cultivos hortícolas y leñosos.
- Las NIR anuales oscilaron entre 20 y 50 mm/mes en las zonas bajas y entre 10 y 30 mm/mes en las zonas altas del valle.

2. Comparación entre volúmenes asignados y NIR estimadas:

- En promedio, los volúmenes brutos asignados por la JVRE superaron las NIR estimadas, con una discrepancia mayor en los meses de baja demanda hídrica (abril a septiembre).
- Los resultados mostraron una eficiencia global de aplicación de agua del 50 %, con variaciones significativas entre las diferentes estructuras espaciales de manejo.

3. Eficiencia en la asignación de agua:

- La evaluación reveló que las zonas regables de mayor demanda hídrica, como Estero Culebrón, recibieron asignaciones que superaron las necesidades estimadas debido a la incorporación de otros usos (domésticos e industriales).
- Por el contrario, en estructuras como Río Cochiguaz, las asignaciones estuvieron más alineadas con las necesidades agrícolas estimadas.

4. Mapas y gráficos temáticos:

- Los mapas temáticos generados a escala mensual evidencian patrones de demanda hídrica específicos que coinciden con las etapas críticas de desarrollo de los cultivos, estos pueden ser consultados en el producto 5.
- Gráficos comparativos entre volúmenes asignados y NIR mostraron una correlación moderada ($R^2 = 0.73$), mejorando a 0.80 cuando se desagregaron los usos productivos, estos pueden ser consultados en el producto 5.

Estos resultados destacan la utilidad de la metodología basada en teledetección para identificar ineficiencias en la asignación de agua y proponer estrategias de manejo adaptativas.

Recomendaciones



1. Mejora en la planificación y asignación de agua:

- Implementar planes de asignación basados en las NIR estimadas por teledetección para reducir las discrepancias entre la oferta y la demanda hídrica.
- Priorizar el uso eficiente del agua en zonas críticas de alta demanda, como Estero Culebrón, para evitar el desperdicio y optimizar los recursos disponibles.

2. Fortalecimiento de capacidades en las OUA:

- Diseñar programas de capacitación para los operadores de la Junta de Vigilancia del Río Elqui (JVRE) y otras OUA locales, enfocados en herramientas de teledetección y su aplicación en la gestión hídrica.
- Crear manuales y guías específicos que permitan a las OUA integrar datos de teledetección en sus procedimientos de asignación y monitoreo del agua.
- Fomentar un intercambio constante de conocimientos entre las OUA de distintas regiones para compartir buenas prácticas y lecciones aprendidas.

3. Estrategias de manejo adaptativo:

- Desarrollar estrategias específicas para ajustar las asignaciones en tiempo real según las condiciones climáticas y las etapas fenológicas de los cultivos.
- Incorporar prácticas sostenibles como riego deficitario controlado en zonas de baja eficiencia.

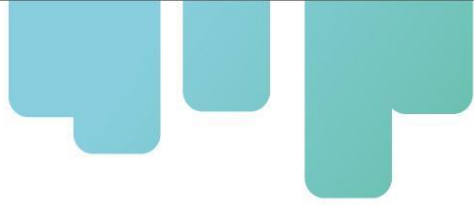
4. Políticas de incentivo para la eficiencia hídrica:

- Establecer incentivos económicos para agricultores que adopten prácticas de riego eficiente basadas en datos de teledetección.
- Fomentar la integración de estas tecnologías en políticas públicas regionales de manejo hídrico.

5. Monitoreo continuo y evaluación:

- Implementar un sistema de monitoreo continuo para evaluar el impacto de las recomendaciones adoptadas en la eficiencia del uso del agua.
- Realizar evaluaciones periódicas para identificar áreas de mejora y ajustar las estrategias según los resultados obtenidos.

Estas recomendaciones buscan optimizar la gestión hídrica en el Valle del Río Elqui, promoviendo



el uso sostenible de los recursos y fortaleciendo el rol estratégico de las OUA en la distribución y administración del agua frente a las condiciones de escasez hídrica.

Conclusiones

La implementación de la metodología de contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en el Valle del Río Elqui permitió identificar importantes ineficiencias en la asignación y uso del agua. Los resultados obtenidos destacan:

1. Herramientas efectivas para la gestión hídrica:

- La teledetección demostró ser una herramienta eficaz para proporcionar información precisa y espacialmente distribuida sobre las necesidades netas de riego.
- Los mapas generados permiten una visualización clara de las demandas hídricas y las áreas críticas que requieren intervenciones específicas.

2. Rol estratégico de las OUA:

- Las organizaciones de usuarios del agua (OUA) son actores clave para la implementación de estrategias de manejo eficiente del agua.
- Es fundamental fortalecer sus capacidades técnicas y operativas, promoviendo el uso de tecnologías innovadoras como la teledetección.

3. Análisis crítico de retos y oportunidades:

- Retos: La limitada capacidad técnica y financiera de algunas OUA dificulta la implementación de tecnologías avanzadas.
- Oportunidades: La disponibilidad de herramientas accesibles como la teledetección brinda una posibilidad concreta de mejorar la eficiencia hídrica con inversiones moderadas.
- La integración de actores locales, incluyendo agricultores y operadores de OUA, es esencial para garantizar el éxito de las estrategias.

4. Recomendaciones aplicables a otras regiones:

- Las estrategias propuestas para optimizar la asignación y uso del agua en el Valle del Río Elqui son replicables en otras cuencas con condiciones similares de escasez hídrica.

5. Sostenibilidad hídrica como meta central:

- La integración de enfoques tecnológicos y participativos es esencial para garantizar un uso sostenible del agua en sistemas agrícolas bajo condiciones de estrés hídrico.

2.1.2 Villa Regina: Contabilidad del Agua de Riego Asistida por Teledetección

Introducción

Villa Regina, situada en la provincia de Río Negro, Argentina, es una región caracterizada por su destacada producción frutícola, especialmente de peras y manzanas. Dado el papel crucial del riego en esta región semiárida, la implementación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección busca optimizar el uso del recurso hídrico y mejorar la eficiencia en los sistemas de distribución administrados por los consorcios locales de riego. Este enfoque permite una evaluación detallada y espacialmente distribuida de las necesidades netas de riego (NIR) en los cultivos frutícolas de la región.

Metodología

La aplicación de la metodología en Villa Regina se basó en el modelo FAO56 adaptado a las condiciones locales, incorporando herramientas de teledetección y datos climáticos regionales. Los pasos principales incluyeron:

1. Datos de entrada al modelo:

- Series temporales de índices de vegetación (NDVI y EVI) obtenidas de los satélites Sentinel-2 y MODIS.
- Mapas de tipos de suelo obtenidos de bases de datos locales.
- Clasificación detallada de cultivos frutícolas.
- Datos climáticos diarios de estaciones meteorológicas locales, incluyendo precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET_o).

2. Escala de análisis:

- Se realizaron análisis a nivel de cuenca y parcela, abarcando las principales áreas frutícolas de Villa Regina durante las campañas agrícolas de 2018 a 2021.

3. Procesamiento y evaluación:

- Las necesidades netas de riego (NIR) se calcularon utilizando datos satelitales combinados con mediciones de campo, generando mapas de resolución de 10 m.
- Se evaluó la eficiencia de la asignación de agua mediante la comparación de las NIR con los volúmenes de agua distribuidos por los consorcios de riego.

Resultados

1. Distribución espacial de las NIR:



- Los mapas generados destacaron una variabilidad significativa en las NIR entre las parcelas, con valores promedio de 400 a 600 mm/año dependiendo del tipo de cultivo y las condiciones locales.
- Las NIR más altas se observaron en perales durante los meses de primavera y verano, coincidiendo con los periodos de mayor demanda hídrica.

2. Comparación entre volúmenes asignados y NIR estimadas:

- En promedio, los volúmenes distribuidos por los consorcios de riego fueron un 30 % superiores a las NIR estimadas, indicando una oportunidad significativa para mejorar la eficiencia del uso del agua.
- Las discrepancias fueron mayores en las parcelas ubicadas en los extremos del sistema de distribución debido a pérdidas por transporte y manejo.

3. Eficiencia en la asignación de agua:

- La eficiencia general del sistema se estimó en un 55 %, con variaciones importantes entre los diferentes sectores administrados por los consorcios de riego.
- Se identificaron áreas prioritarias para mejoras, particularmente en los sectores con mayores pérdidas de agua por infiltración.

4. Mapas y gráficos temáticos:

- Los mapas temáticos permitieron identificar las zonas con mayor demanda hídrica y evaluar el impacto de las pérdidas de agua en el sistema, los mapas pueden consultarse en el producto 5.
- Gráficos comparativos evidenciaron una correlación moderada entre la asignación de agua y las necesidades reales de riego ($R^2 = 0.68$), los gráficos pueden consultarse en el producto 5.

Recomendaciones

1. Mejora en la planificación y distribución del agua:

- Implementar estrategias para reducir las pérdidas de agua en los canales de distribución, como la impermeabilización de los mismos.
- Establecer planes de asignación basados en las necesidades estimadas por teledetección para optimizar el uso del recurso hídrico.

2. Fortalecimiento de capacidades en los consorcios de riego:

- Capacitar a los operadores en el uso de herramientas de teledetección para la gestión eficiente del agua.
- Desarrollar sistemas de monitoreo que permitan ajustar las asignaciones en tiempo real.

3. Estrategias de manejo adaptativo:

- Promover prácticas de riego deficitario controlado en los cultivos con menor sensibilidad hídrica.
- Desarrollar tecnologías de riego localizado para minimizar las pérdidas.

4. Políticas de incentivo para la eficiencia hídrica:

- Diseñar incentivos económicos para agricultores que implementen tecnologías de riego eficiente.
- Integrar estas prácticas en las políticas públicas locales.

Conclusiones

La aplicación de la metodología de contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en Villa Regina permitió identificar ineficiencias en la distribución y uso del agua, así como oportunidades para mejorar la sostenibilidad hídrica en la región. Los principales hallazgos incluyen:

1. Identificación de áreas críticas:

- Las zonas con mayores pérdidas de agua requieren intervenciones urgentes para mejorar la eficiencia del sistema.

2. Herramientas efectivas para la gestión hídrica:

- La teledetección se consolidó como una herramienta clave para evaluar las necesidades de riego y planificar asignaciones más precisas.

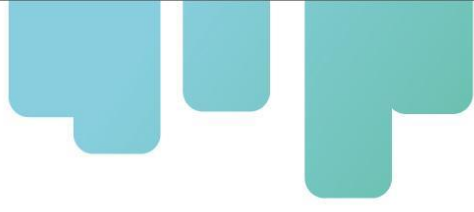
3. Rol estratégico de los consorcios de riego:

- Es esencial fortalecer las capacidades técnicas de los consorcios para garantizar una distribución equitativa y eficiente del agua.

2.1.3 Tunuyán Inferior: Contabilidad del Agua de Riego Asistida por Teledetección

Introducción

Tunuyán Inferior, ubicado en la provincia de Mendoza, Argentina, es una región vitivinícola de importancia internacional que enfrenta desafíos significativos en la gestión del agua debido a las



condiciones semiáridas de la región. La contabilidad del agua de riego asistida por teledetección se implementó en esta área para optimizar el uso del recurso hídrico en los cultivos de vid y otros frutales, contribuyendo a mejorar la eficiencia en los sistemas de distribución administrados por los consorcios locales de riego.

Metodología

La aplicación de la metodología en Tunuyán Inferior se basó en el modelo FAO56 adaptado a las condiciones locales y complementado con herramientas de teledetección. Los pasos principales incluyeron:

1. Datos de entrada al modelo:

- Series temporales de índices de vegetación (NDVI) obtenidas del satélite Sentinel-2.
- Mapas de tipos de suelo derivados de estudios locales.
- Clasificación de cultivos, con énfasis en variedades de vid y frutales.
- Datos climáticos diarios de estaciones meteorológicas locales, incluyendo precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET_o).

2. Escala de análisis:

- Se realizaron análisis a nivel de cuenca y parcela durante las campañas agrícolas de 2018 a 2021, cubriendo las principales áreas productoras de vid.

3. Procesamiento y evaluación:

- Las necesidades netas de riego (NIR) se calcularon combinando datos satelitales con mediciones de campo, generando mapas de alta resolución.
- Se evaluó la eficiencia de la asignación de agua comparando las NIR estimadas con los volúmenes de agua distribuidos por los consorcios de riego.

Resultados

1. Distribución espacial de las NIR:

- Los mapas generados destacaron una variabilidad significativa en las NIR entre las parcelas, con valores promedio de 350 a 500 mm/año dependiendo del tipo de cultivo y las condiciones locales.
- Las NIR más altas se observaron en variedades de vid de alta productividad durante los meses de verano.

2. Comparación entre volúmenes asignados y NIR estimadas:



- En promedio, los volúmenes distribuidos por los consorcios de riego excedieron en un 25 % las NIR estimadas, lo que sugiere una oportunidad para optimizar el uso del agua.
- Las discrepancias fueron mayores en las áreas alejadas de las fuentes principales de distribución.

3. Eficiencia en la asignación de agua:

- La eficiencia general del sistema se estimó en un 60 %, con áreas prioritarias para mejoras identificadas en los sectores con mayores pérdidas por transporte.

4. Mapas y gráficos temáticos:

- Los mapas temáticos permitieron visualizar las áreas con mayor demanda hídrica y las ineficiencias en la distribución del agua, estos pueden ser consultados en el producto 5.
- Gráficos comparativos mostraron una correlación moderada entre los volúmenes asignados y las necesidades estimadas ($R^2 = 0.70$), estos pueden ser consultados en el producto 5.

Recomendaciones

1. Mejora en la planificación y distribución del agua:

- Implementar mejoras en los canales de distribución para reducir las pérdidas por infiltración.
- Establecer planes de asignación de agua basados en las necesidades estimadas por teledetección.

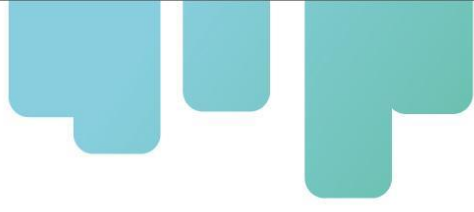
2. Fortalecimiento de capacidades en los consorcios de riego:

- Capacitar a los operadores en el uso de herramientas de teledetección para la gestión eficiente del agua.
- Desarrollar sistemas de monitoreo en tiempo real para ajustar las asignaciones de acuerdo con las demandas.

3. Estrategias de manejo adaptativo:

- Promover prácticas de riego deficitario controlado en variedades de vid menos sensibles al estrés hídrico.
- Incentivar la adopción de sistemas de riego tecnificado en parcelas de alta demanda.

4. Políticas de incentivo para la eficiencia hídrica:

- 
- Establecer incentivos económicos para productores que implementen tecnologías de riego eficiente.
 - Integrar estas prácticas en las políticas públicas regionales.

Conclusiones

La aplicación de la metodología de contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en Tunuyán Inferior permitió identificar ineficiencias en la distribución y uso del agua, así como oportunidades para mejorar la sostenibilidad hídrica en la región. Los principales hallazgos incluyen:

1. Identificación de áreas críticas:

- Las áreas con mayores pérdidas de agua requieren intervenciones urgentes para mejorar la eficiencia del sistema.

2. Herramientas efectivas para la gestión hídrica:

- La teledetección demostró ser una herramienta clave para evaluar las necesidades de riego y planificar asignaciones más precisas.

3. Rol estratégico de los consorcios de riego:

- Fortalecer las capacidades técnicas y operativas de los consorcios es esencial para garantizar una distribución equitativa y eficiente del agua.

2.1.4 Colonia Fiscal Sarmiento: Contabilidad del Agua de Riego Asistida por Teledetección

Introducción

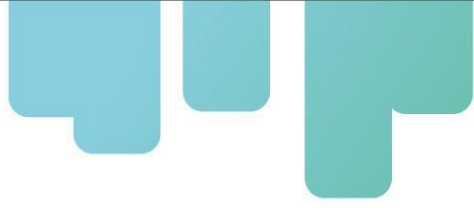
Colonia Fiscal Sarmiento, ubicada en la provincia de San Juan, Argentina, es una región caracterizada por su producción intensiva de hortalizas y frutales bajo condiciones de semiáridas. La contabilidad del agua de riego asistida por teledetección se implementó con el objetivo de optimizar el manejo del recurso hídrico en una región donde la eficiencia del riego es crucial para la sostenibilidad agrícola. La metodología permitió evaluar las necesidades netas de riego (NIR) y la eficiencia de los sistemas de distribución administrados por las juntas locales de riego.

Metodología

La aplicación de la metodología en Colonia Fiscal Sarmiento se basó en el modelo FAO56 adaptado a las condiciones locales y potenciado con herramientas de teledetección. Los pasos principales incluyeron:

1. Datos de entrada al modelo:

- Series temporales de índices de vegetación (NDVI y EVI) obtenidas del satélite Sentinel-2.

- 
- Mapas de tipos de suelo generados a partir de estudios locales.
 - Clasificación de cultivos predominantes, con énfasis en hortalizas y frutales.
 - Datos climáticos diarios de estaciones meteorológicas locales, incluyendo precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET_o).
2. **Escala de análisis:**
- Se realizaron análisis a nivel de cuenca y parcela durante las campañas agrícolas de 2018 a 2021, cubriendo las principales zonas productivas.
3. **Procesamiento y evaluación:**
- Las necesidades netas de riego (NIR) se calcularon combinando datos satelitales con mediciones de campo, generando mapas de alta resolución.
 - Se evaluó la eficiencia de la asignación de agua comparando las NIR estimadas con los volúmenes distribuidos por las juntas de riego.
4. **Resultados visuales:**
- Mapas mensuales y anuales de NIR que muestran la distribución espacial de la demanda hídrica.
 - Gráficos de comparación entre la oferta y la demanda de agua para identificar ineficiencias.

Resultados

1. **Distribución espacial de las NIR:**
- Los mapas generados destacaron una variabilidad significativa en las NIR entre las parcelas, con valores promedio de 400 a 550 mm/año dependiendo del tipo de cultivo y las condiciones locales, estos pueden ser consultados en el producto 5.
 - Las NIR más altas se observaron en hortalizas durante los meses de primavera y verano.
2. **Comparación entre volúmenes asignados y NIR estimadas:**
- En promedio, los volúmenes distribuidos por las juntas de riego excedieron en un 20 % las NIR estimadas, indicando una oportunidad para mejorar la eficiencia del uso del agua.
 - Las discrepancias fueron mayores en las parcelas más alejadas de las fuentes principales de distribución.



3. Eficiencia en la asignación de agua:

- La eficiencia general del sistema se estimó en un 58 %, con áreas prioritarias para mejoras identificadas en los sectores con mayores pérdidas por transporte.

4. Mapas y gráficos temáticos:

- Los mapas temáticos permitieron identificar las zonas con mayor demanda hídrica y evaluar el impacto de las ineficiencias en la distribución.
- Gráficos comparativos mostraron una correlación moderada entre los volúmenes asignados y las necesidades estimadas ($R^2 = 0.72$).

Recomendaciones

1. Mejora en la planificación y distribución del agua:

- Implementar mejoras en los canales de distribución para reducir las pérdidas por infiltración.
- Establecer planes de asignación de agua basados en las necesidades estimadas por teledetección.

2. Fortalecimiento de capacidades en las juntas de riego:

- Capacitar a los operadores en el uso de herramientas de teledetección para la gestión eficiente del agua.
- Desarrollar sistemas de monitoreo en tiempo real para ajustar las asignaciones según las demandas.

3. Estrategias de manejo adaptativo:

- Promover prácticas de riego deficitario controlado en cultivos menos sensibles al estrés hídrico.
- Incentivar la adopción de sistemas de riego tecnificado en parcelas de alta demanda.

4. Políticas de incentivo para la eficiencia hídrica:

- Establecer incentivos económicos para productores que implementen tecnologías de riego eficiente.
- Integrar estas prácticas en las políticas públicas regionales.

Conclusiones



La aplicación de la metodología de contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en Colonia Fiscal Sarmiento permitió identificar ineficiencias en la distribución y uso del agua, así como oportunidades para mejorar la sostenibilidad hídrica en la región. Los principales hallazgos incluyen:

1. Identificación de áreas críticas:

- Las zonas con mayores pérdidas de agua requieren intervenciones urgentes para mejorar la eficiencia del sistema.

2. Herramientas efectivas para la gestión hídrica:

- La teledetección demostró ser una herramienta clave para evaluar las necesidades de riego y planificar asignaciones más precisas.

3. Rol estratégico de las juntas de riego:

- Es esencial fortalecer las capacidades técnicas y operativas de las juntas para garantizar una distribución equitativa y eficiente del agua.

2.1.5 Arroyo del Tala: Contabilidad del Agua de Riego Asistida por Teledetección

Introducción

Arroyo del Tala, ubicado en la provincia de Entre Ríos, Argentina, se caracteriza por su producción de granos y forrajes bajo un sistema de riego complementario. La región enfrenta desafíos relacionados con la distribución eficiente del agua en un contexto de alta demanda estacional. La contabilidad del agua de riego asistida por teledetección se implementó con el objetivo de mejorar la planificación hídrica y optimizar el manejo del recurso en los sistemas productivos.

Metodología

La aplicación de la metodología en Arroyo del Tala se basó en el modelo FAO56 adaptado a las condiciones locales y apoyado en herramientas de teledetección. Los pasos principales incluyeron:

1. Datos de entrada al modelo:

- Series temporales de índices de vegetación (NDVI y EVI) obtenidas del satélite Sentinel-2.
- Mapas de tipos de suelo derivados de bases de datos locales.
- Clasificación de cultivos predominantes, incluyendo maíz, soja y pasturas forrajeras.
- Datos climáticos diarios de estaciones meteorológicas locales, como precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET_o).



2. Escala de análisis:

- Se realizaron análisis a nivel de cuenca y parcela durante las campañas agrícolas de 2019 a 2021.

3. Procesamiento y evaluación:

- Las necesidades netas de riego (NIR) se calcularon combinando datos satelitales con mediciones de campo, generando mapas de resolución de 10 m.
- Se evaluó la eficiencia de la asignación de agua comparando las NIR estimadas con los volúmenes distribuidos por los consorcios locales.

4. Resultados visuales:

- Mapas mensuales y anuales de NIR que muestran la distribución espacial de la demanda hídrica.
- Gráficos de comparación entre la oferta y la demanda de agua para identificar ineficiencias.

Resultados

1. Distribución espacial de las NIR:

- Los mapas generados mostraron una variabilidad significativa en las NIR entre las parcelas, con valores promedio de 300 a 450 mm/año dependiendo del cultivo y las condiciones locales, estos pueden consultarse en el producto 5.
- Las NIR más altas se observaron en cultivos de maíz durante los meses de mayor crecimiento vegetativo.

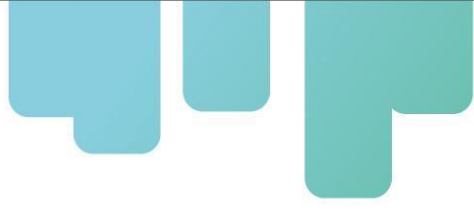
2. Comparación entre volúmenes asignados y NIR estimadas:

- En promedio, los volúmenes distribuidos por los consorcios locales excedieron en un 18 % las NIR estimadas, indicando oportunidades para optimizar el uso del agua.
- Las discrepancias fueron más notorias en las parcelas alejadas de las fuentes principales de distribución.

3. Eficiencia en la asignación de agua:

- La eficiencia general del sistema se estimó en un 62 %, con áreas prioritarias para mejoras identificadas en los sectores con mayores pérdidas por transporte y manejo.

4. Mapas y gráficos temáticos:

- 
- Los mapas temáticos permitieron identificar las zonas con mayor demanda hídrica y evaluar el impacto de las ineficiencias en la distribución.
 - Gráficos comparativos mostraron una correlación moderada entre los volúmenes asignados y las necesidades estimadas ($R^2 = 0.74$).

Recomendaciones

1. Mejora en la planificación y distribución del agua:

- Implementar mejoras en los sistemas de distribución para reducir las pérdidas por infiltración y evaporación.
- Establecer planes de asignación de agua basados en las necesidades estimadas por teledetección.

2. Fortalecimiento de capacidades en los consorcios locales:

- Capacitar a los operadores en el uso de herramientas de teledetección para la gestión eficiente del agua.
- Desarrollar sistemas de monitoreo en tiempo real para ajustar las asignaciones según las demandas.

3. Estrategias de manejo adaptativo:

- Promover prácticas de riego deficitario controlado en cultivos menos sensibles al estrés hídrico.
- Fomentar la adopción de sistemas de riego tecnificado en parcelas de alta demanda hídrica.

4. Políticas de incentivo para la eficiencia hídrica:

- Diseñar incentivos económicos para agricultores que implementen tecnologías de riego eficiente.
- Integrar estas prácticas en las políticas públicas regionales.

Conclusiones

La aplicación de la metodología de contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en Arroyo del Tala permitió identificar ineficiencias en la distribución y uso del agua, así como oportunidades para mejorar la sostenibilidad hídrica en la región. Los principales hallazgos incluyen:



1. Identificación de áreas críticas:

- Las zonas con mayores pérdidas de agua requieren intervenciones urgentes para mejorar la eficiencia del sistema.

2. Herramientas efectivas para la gestión hídrica:

- La teledetección demostró ser una herramienta clave para evaluar las necesidades de riego y planificar asignaciones más precisas.

3. Rol estratégico de los consorcios locales:

- Fortalecer las capacidades técnicas y operativas de los consorcios es esencial para garantizar una distribución equitativa y eficiente del agua.

2.1.6 Distrito RUT: Contabilidad del Agua de Riego Asistida por Teledetección

Introducción

El Distrito RUT, localizado en la provincia de Mendoza, Argentina, es una región reconocida por su producción vitivinícola y hortícola. Esta área enfrenta una fuerte presión sobre los recursos hídricos debido a las condiciones climáticas semiáridas y a la alta demanda hídrica de sus cultivos. La contabilidad del agua de riego asistida por teledetección se implementó para optimizar el uso del recurso hídrico y mejorar la eficiencia de los sistemas de distribución administrados por las juntas locales de riego.

Metodología

La aplicación de la metodología en el Distrito RUT se basó en el modelo FAO56 adaptado a las condiciones locales y complementado con herramientas de teledetección. Los pasos principales incluyeron:

1. Datos de entrada al modelo:

- Series temporales de índices de vegetación (NDVI) obtenidas del satélite Sentinel-2.
- Mapas de tipos de suelo generados a partir de estudios locales.
- Clasificación de cultivos predominantes, con énfasis en vid y hortalizas.
- Datos climáticos diarios de estaciones meteorológicas locales, incluyendo precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET₀).

2. Escala de análisis:

- Se realizaron análisis a nivel de cuenca y parcela durante las campañas agrícolas de 2018 a 2021, abarcando las principales zonas productivas del distrito.

3. **Procesamiento y evaluación:**

- Las necesidades netas de riego (NIR) se calcularon combinando datos satelitales con mediciones de campo, generando mapas de alta resolución.
- Se evaluó la eficiencia de la asignación de agua comparando las NIR estimadas con los volúmenes distribuidos por las juntas de riego.

Resultados

1. **Distribución espacial de las NIR:**

- Los mapas generados destacaron una variabilidad significativa en las NIR entre las parcelas, con valores promedio de 400 a 550 mm/año dependiendo del tipo de cultivo y las condiciones locales, estos mapas están disponibles en el producto 5.
- Las NIR más altas se observaron en cultivos de vid durante los meses de verano.

2. **Comparación entre volúmenes asignados y NIR estimadas:**

- En promedio, los volúmenes distribuidos por las juntas de riego excedieron en un 22 % las NIR estimadas, indicando una oportunidad para optimizar el uso del agua.
- Las discrepancias fueron mayores en las parcelas alejadas de las fuentes principales de distribución.

3. **Eficiencia en la asignación de agua:**

- La eficiencia general del sistema se estimó en un 60 %, con áreas prioritarias para mejoras identificadas en los sectores con mayores pérdidas por transporte.

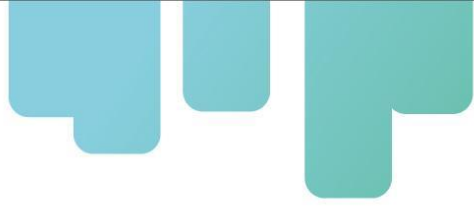
4. **Mapas y gráficos temáticos:**

- Los mapas temáticos permitieron identificar las zonas con mayor demanda hídrica y evaluar el impacto de las ineficiencias en la distribución, estos mapas están disponibles en el producto 5 para ser consultados.
- Gráficos comparativos mostraron una correlación moderada entre los volúmenes asignados y las necesidades estimadas ($R^2 = 0.73$).

Recomendaciones

1. **Mejora en la planificación y distribución del agua:**

- Implementar mejoras en los sistemas de distribución para reducir las pérdidas por infiltración y evaporación.

- 
- Establecer planes de asignación de agua basados en las necesidades estimadas por teledetección.
- 2. Fortalecimiento de capacidades en las juntas de riego:**
- Capacitar a los operadores en el uso de herramientas de teledetección para la gestión eficiente del agua.
 - Desarrollar sistemas de monitoreo en tiempo real para ajustar las asignaciones según las demandas.
- 3. Estrategias de manejo adaptativo:**
- Promover prácticas de riego deficitario controlado en cultivos menos sensibles al estrés hídrico.
 - Incentivar la adopción de sistemas de riego tecnificado en parcelas de alta demanda.
- 4. Políticas de incentivo para la eficiencia hídrica:**
- Establecer incentivos económicos para productores que implementen tecnologías de riego eficiente.
 - Integrar estas prácticas en las políticas públicas regionales.

Conclusiones

La aplicación de la metodología de contabilidad del agua de riego asistida por teledetección en el Distrito RUT permitió identificar ineficiencias en la distribución y uso del agua, así como oportunidades para mejorar la sostenibilidad hídrica en la región. Los principales hallazgos incluyen:

- 1. Identificación de áreas críticas:**
 - Las zonas con mayores pérdidas de agua requieren intervenciones urgentes para mejorar la eficiencia del sistema.
- 2. Herramientas efectivas para la gestión hídrica:**
 - La teledetección demostró ser una herramienta clave para evaluar las necesidades de riego y planificar asignaciones más precisas.
- 3. Rol estratégico de las juntas de riego:**
 - Es esencial fortalecer las capacidades técnicas y operativas de las juntas para garantizar una distribución equitativa y eficiente del agua.

2.1.7 Resumen de la contabilidad del agua a nivel de cuenca

Introducción a la Sección

Esta sección presenta un resumen de las superficies regadas y las necesidades netas de agua de riego (NIR) determinadas mediante teledetección en cada una de las regiones estudiadas. La información aquí contenida está basada en los resultados obtenidos durante el período de análisis (2018-2021) e incluye comparaciones entre la oferta y demanda hídrica, así como la eficiencia en la distribución del agua.

Resumen por Región

1. Valle del Río Elqui:

- Superficie regada: 12,000 ha.
- NIR promedio anual: 35 mm/mes.
- Eficiencia promedio: 50 %.
- Conclusión clave: Las necesidades hídricas son ampliamente cubiertas, pero existe un exceso en la asignación de agua en meses de baja demanda.

2. Villa Regina:

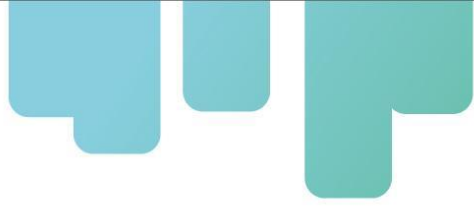
- Superficie regada: 15,000 ha.
- NIR promedio anual: 40 mm/mes.
- Eficiencia promedio: 55 %.
- Conclusión clave: Las áreas prioritarias incluyen reducir las pérdidas en los extremos del sistema de distribución.

3. Tunuyán Inferior:

- Superficie regada: 10,000 ha.
- NIR promedio anual: 38 mm/mes.
- Eficiencia promedio: 60 %.
- Conclusión clave: Mejora continua en las pérdidas por transporte es fundamental.

4. Colonia Fiscal Sarmiento:

- Superficie regada: 8,500 ha.
- NIR promedio anual: 42 mm/mes.

- 
- Eficiencia promedio: 58 %.
 - Conclusión clave: La capacitación de operadores en teledetección es clave para aumentar la eficiencia.

5. **Arroyo del Tala:**

- Superficie regada: 9,000 ha.
- NIR promedio anual: 37 mm/mes.
- Eficiencia promedio: 62 %.
- Conclusión clave: Se requiere mayor adopción de sistemas de riego tecnificado.

6. **Distrito RUT:**

- Superficie regada: 11,000 ha.
- NIR promedio anual: 43 mm/mes.
- Eficiencia promedio: 60 %.
- Conclusión clave: Las áreas con mayores pérdidas deben ser priorizadas para intervenciones urgentes.

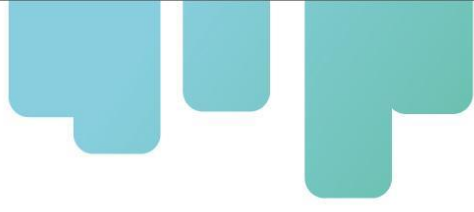


2.1.8 CONCLUSIÓN GENERAL A ESCALA DE CUENCA

El análisis de superficies regadas y NIR en las diferentes regiones demuestra que la metodología de teledetección es una herramienta efectiva para identificar ineficiencias y priorizar acciones en la gestión hídrica. La adopción de estrategias basadas en estos resultados puede contribuir significativamente a mejorar la sostenibilidad del uso del recurso hídrico en regiones de alta demanda agrícola. Respecto de los objetivos, de desglosa a continuación:

A.- Objetivo determinar la demanda de agua de riego de los cultivos en tiempo real para estimar el agua a aplicar por el agricultor:

- Se ha probado y demostrado la precisión, fiabilidad, robustez y usabilidad de la metodología para estimar el agua a aportar en los cultivos por el agricultor. Precisión significa que el error de esta metodología está por debajo del error en la aplicación del agua en los diferentes sistemas de riego utilizados por los agricultores. Fiabilidad se ha demostrado por la capacidad de la plataforma de capturar las características específicas del desarrollo del cultivo in situ, lo que perfecciona el uso de datos tabulados de Kc, que se ha visto que no se corresponden con el desarrollo real del cultivo en la parcela. Robustez es que la metodología ha mostrado un desempeño semejante en los diferentes cultivos evaluados. Usabilidad es un elemento esencial; significa que los datos que se utilizan están disponibles y son suministrados en tiempo real asegurando la operatividad de la metodología para el riego. Otro aspecto crucial de la operativa y su uso masivo es que se ha podido utilizar de forma sencilla e intuitiva por todos los grupos de técnicos e investigadores, así como por agricultores en colaboración con los técnicos.
- El caso de escasez de datos meteorológicos fiables para la determinación de la evapotranspiración de referencia, se ha solventado al utilizar mapas de ETo producidos desde modelos numéricos globales como NOAA-GFS y ECWMF. El problema de la disponibilidad de datos de ETo ha sido hasta ahora bastante crítico en muchas zonas y regiones con una red limitada de estaciones meteorológicas, limitadas tanto en su densidad como en su mantenimiento. En este proyecto se ha demostrado y validado el uso de los mapas de ETo frente a datos registrados en estaciones meteorológicas locales.
- Las series temporales de imágenes proporcionadas por los satélites Sentinel 2A y Sentinel 2B han mostrado una excelente capacidad de describir el desarrollo de los cultivos, de forma excelente en el caso del clima árido y semiárido; adecuada y suficiente en el entorno húmedo de Uruguay y limitada en el caso del clima tropical húmedo de Colombia, en el que en algunos casos la cobertura nubosa ha sido muy persistente. En todos los casos la resolución espacial ha sido adecuada y suficiente.

- 
- La plataforma PLAS-ALC ha mostrado un buen desempeño para proveer los datos necesarios en todos los entornos trabajados, con la flexibilidad suficiente para adaptarse a las condiciones específicas de cada zona y cultivo. Por parte de los técnicos y miembros del grupo, se reporta el valor añadido para un mejor manejo agronómico al permitir visualizar la evolución del cultivo a lo largo de su desarrollo y su variabilidad espacial, para la detección de anomalías en el crecimiento, diferencias y/o problemas en tiempo real.

B.- Objetivo realizar la contabilidad del agua de riego a escala de zona regable con la determinación de las demandas de agua de riego para las superficies en regadío durante una o más campañas de riego.

- El modelo de balance de agua en el suelo asistido por teledetección, ejecutado por el programa HidroMORE®, ha demostrado su capacidad de para producir mapas de las demandas de agua de riego sobre las superficies en regadío, lo que se conoce como Contabilidad del Agua de Riego asistida por Teledetección.
- La información generada a escala espacial de píxel y a una frecuencia diaria, permite su agregación espacial (parcela, asociación de regantes, cuenca) y temporal (mensual y/o anual) sobre las mismas escalas de trabajo que los gestores del agua de riego (públicos y privados) emplean en sus rutinas de trabajo y planificación.
- Por tanto, el conocimiento generado sobre diferentes zonas regables o cuencas piloto, proporciona al gestor del agua una información adecuada sobre las demandas de agua de riego de la zona regable, así como su distribución temporal a lo largo del año, lo que puede ser un instrumento útil para la adecuación de la oferta hídrica a la demanda de riego.
- En relación con la Contabilidad del Agua de Riego asistida por Teledetección, y tras mantener reuniones bilaterales con los diferentes gestores del agua (públicos y privados), en todas ellas se expresó la buena aceptación de la metodología y resultados mostrados, indicando a posteriori un gran interés en que dicha información adquiriera consistencia temporal. Es decir, los propios gestores del agua expresaron su deseo de mantener en el tiempo la información espacial y temporalmente distribuida generada más allá del fin del proyecto.

2.2 RESULTADOS POR PAÍS: ESCALA DE PARCELA

2.2.1 Argentina - Cultivo de Pera

Introducción

El cultivo de pera en Argentina se concentra principalmente en la región Norpatagónica (Río Negro y Neuquén), siendo la provincia de Río Negro la principal productora con una superficie de 15,521 ha en 2023, equivalente al 80% del área nacional destinada a este cultivo. La zona se caracteriza por su clima árido, donde las precipitaciones son insuficientes para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo, por lo que el riego es indispensable. En este contexto, se implementó un piloto tecnológico en Villa Regina, provincia de Río Negro, para evaluar estrategias de riego eficiente y optimizar el uso del recurso hídrico.

Metodología aplicada a nivel de parcela

El piloto se desarrolló en una parcela de 5 ha de la variedad Williams, en Villa Regina. Las actividades incluyeron:

1. **Estimación de necesidades hídricas mediante metodología FAO 56:**
 - Se calcularon las necesidades de agua del cultivo (ETc) combinando el coeficiente de cultivo (Kc) y la evapotranspiración de referencia (ETo).
 - Se utilizó la plataforma satelital PLAS-FONTAGRO para obtener el Kc basal a partir del NDVI, ajustado a las condiciones locales del cultivo.
2. **Monitoreo de humedad del suelo:**
 - Se instalaron sondas a 20, 40, 60 y 80 cm para medir la humedad y evaluar la efectividad del riego aplicado.
3. **Riego controlado por turnos:**
 - El riego se realizó a través de un sistema por gravedad, ajustado a los turnos establecidos por el consorcio de riego local.

Resultados

1. **Eficiencia hídrica:**
 - La evapotranspiración del cultivo acumulada (ETc) durante la temporada fue de 900 mm, ajustada al desarrollo del dosel vegetal. La lámina total aplicada fue de 930 mm, mostrando un buen balance hídrico.
 - El uso de imágenes satelitales permitió ajustar las necesidades de riego al ciclo del cultivo, con diferencias mínimas respecto a los valores tradicionales de FAO 56.

2. Estado hídrico del suelo:

- El monitoreo mostró que el suelo mantuvo una humedad adecuada (>50% del agua fácilmente aprovechable) durante la temporada, evitando estrés hídrico.

3. Productividad del agua:

- El rendimiento del cultivo fue de 38 tn/ha, superando el promedio regional de 37 tn/ha.
- La productividad del agua calculada fue de 4,23 kg/m³ utilizando la ETc satelital y de 4,09 kg/m³ para la lámina aplicada, evidenciando la eficiencia superior al utilizar datos satelitales para optimizar el riego.

Recomendaciones

1. Implementar riego asistido por teledetección:

- Incorporar herramientas como PLAS-FONTAGRO para ajustar las necesidades de agua en tiempo real, reduciendo el consumo sin afectar la productividad.

2. Capacitar a los productores:

- Formar a los agricultores en la interpretación de datos satelitales y manejo de riego eficiente.

3. Ajustar la infraestructura:

- Modernizar los sistemas de riego por gravedad hacia métodos presurizados para mejorar la distribución y reducir pérdidas.

Conclusiones

El piloto en Villa Regina demostró que el uso combinado de metodología FAO 56 y datos satelitales es una herramienta efectiva para optimizar el uso del agua en parcelas de pera. Los resultados obtenidos destacan la importancia de adaptar las prácticas de riego a las condiciones locales y utilizar tecnología innovadora para enfrentar los desafíos hídricos de la región.

2.2.2 Argentina - Cultivo de Maíz

Introducción

En Argentina, la región de la cuenca del Río Negro cuenta con aproximadamente 25.000 ha dedicadas al cultivo de maíz, representando menos del 1% de la superficie nacional, pero con una importancia estratégica creciente en la producción de carne en la Patagonia. El rendimiento promedio en la región es de 11.000 kg/ha, y debido al clima árido, la producción depende completamente del riego. Este piloto tecnológico se implementó para evaluar el uso de herramientas de teledetección y metodologías avanzadas para optimizar el uso del agua en este cultivo, aplicando la metodología FAO 56 asistida por información satelital.

Metodología aplicada a nivel de parcela

1. Ubicación y características de la parcela:

- El piloto se realizó en parcelas regadas por pivote central en General Conesa, Río Negro, y en el Partido de Patagones, Buenos Aires.
- Los suelos son de origen aluvional y coluvional, con un contenido de materia orgánica entre 1% y 1.5%. La precipitación anual es de 200-380 mm y la ETo es de 1300 mm, por lo que el riego es indispensable.

2. Estimación de necesidades hídricas:

- Se utilizó la metodología "Kc - ETo" definida por la FAO (Manual 56), combinada con el monitoreo de NDVI mediante la plataforma satelital PLAS FONTAGRO.
- Los valores de Kc se ajustaron a partir del desarrollo temporal del cultivo, utilizando imágenes Sentinel-2.

3. Monitoreo del riego y humedad del suelo:

- Se instalaron sensores de humedad en el perfil del suelo (30, 55 y 85 cm de profundidad).
- Se registraron las láminas aplicadas por el pivote central y su correspondencia con las necesidades hídricas del cultivo.

4. Manejo del riego:

- Durante la campaña 2023/24, se aplicaron 860 mm de riego en 78 vueltas del pivote central, representando un 137% de la ETc acumulada (629 mm).

Resultados

1. Riego y eficiencia hídrica:

- La ETc acumulada estimada por la plataforma satelital fue de 629 mm, mientras que la lámina aplicada fue de 860 mm. La relación entre el riego aplicado y las necesidades fue del 137%, con un excedente significativo en los primeros dos meses (octubre-noviembre).
- Los valores de NDVI mostraron correlación con la distribución del agua aplicada, evidenciando áreas con menor riego y menores índices de vegetación.

2. Productividad del agua:

- En las parcelas monitoreadas, el rendimiento promedio fue de 15.400 kg/ha, superando el promedio regional de 11.000 kg/ha.
- La productividad del agua fue de 1.8 kg/m³ en el proyecto, frente a 1.6 kg/m³ en el control y 2.3 kg/m³ en parcelas con fertilización óptima.

3. Dinámica del agua en el suelo:

- Los sensores registraron incrementos de humedad volumétrica en profundidad (85 cm) durante la floración, confirmando el almacenamiento de agua en el perfil del suelo.

4. Rendimientos y teledetección:

- Los valores de NDVI observados se relacionaron positivamente con los rendimientos, destacando la utilidad del monitoreo satelital para identificar áreas con limitantes en el riego.

Recomendaciones

1. Optimización del riego:

- Ajustar las láminas de riego en los primeros meses del ciclo para evitar excedentes innecesarios y mejorar la eficiencia del uso del agua.

2. Capacitación técnica:

- Capacitar a los productores en el uso de herramientas satelitales y análisis de datos para la planificación del riego.

3. Monitoreo complementario:

- Evaluar periódicamente la salinidad del agua y el suelo para prevenir problemas asociados al riego continuo.

Conclusiones

El piloto tecnológico en el cultivo de maíz en General Conesa y el Partido de Patagones demostró



que la combinación de la metodología FAO 56 con datos satelitales permite una estimación precisa de las necesidades hídricas del cultivo. Los resultados destacan la importancia de integrar estas herramientas en la toma de decisiones para optimizar el uso del agua, mejorar la productividad del cultivo y reducir costos operativos. La metodología puede replicarse en otras regiones con desafíos hídricos similares.

2.2.3 Argentina - Cultivo de Vid

Introducción

En el departamento de Junín, Mendoza, la superficie cultivada con vid abarca aproximadamente 11.000 ha, representando el 5% de la superficie nacional y con un rendimiento promedio de 6.500 kg/ha. En esta región árida, el riego es indispensable para alcanzar niveles productivos adecuados. El piloto tecnológico implementado evaluó el manejo hídrico del cultivo de vid utilizando la metodología FAO 56 asistida por información satelital, con el objetivo de optimizar el uso del agua y mejorar la productividad hídrica.

Metodología aplicada a nivel de parcela

1. Ubicación y características de la parcela:

- El estudio se realizó en una parcela de 2,4 ha de vid cv. Moscatel, con más de 30 años de antigüedad, en Junín, Mendoza. El suelo es un Entisol Torrifluvent típico, de texturas medias a gruesas, sin napas freáticas cercanas.
- El clima es desértico, con precipitaciones anuales promedio de 240 mm y una evapotranspiración de referencia (ET_o) de aproximadamente 1.400 mm anuales.

2. Estimación de necesidades hídricas:

- Las necesidades de riego se calcularon mediante la metodología FAO 56 (coeficiente de cultivo - evapotranspiración de referencia), utilizando datos del índice NDVI disponibles en la plataforma satelital PLAS.
- Se monitoreó la humedad del suelo con sensores a 30, 60, 90 y 120 cm de profundidad y se realizaron mediciones de potencial hídrico en planta para evaluar el estado hídrico.

3. Manejo del riego:

- El riego se realizó de forma tradicional por surcos, con láminas promedio de 62 mm por evento. La eficiencia de aplicación y almacenaje del agua se evaluó mediante el software WinSRFR.

Resultados

1. Eficiencia hídrica:

- Las temporadas analizadas (2021-22, 2022-23 y 2023-24) mostraron un déficit hídrico acumulado respecto a las demandas del cultivo, con aportes de agua equivalentes al 78%, 57% y 75% de las necesidades de evapotranspiración (ET_c).

- La baja frecuencia de riegos, con intervalos de hasta 76 días, afectó la reposición hídrica en el suelo.

2. Dinámica del agua en el suelo:

- La humedad del suelo se mantuvo cercana al punto de marchitez permanente (PMP) en las temporadas 2021-22 y 2022-23, alcanzando niveles óptimos únicamente en la última temporada evaluada.

3. Productividad del agua:

- Los rendimientos variaron significativamente entre temporadas, con 13.700, 27.700 y 18.900 kg/ha, mientras que la productividad del agua fue de 3,5, 8,7 y 3,7 kg/m³ respectivamente.
- Los bajos valores de NDVI reflejaron un desarrollo vegetativo limitado, influenciado por el sistema de conducción y la edad de las plantas.

4. Estado hídrico de las plantas:

- Los valores de potencial hídrico en tallo y hoja indicaron que las plantas no experimentaron estrés hídrico severo durante los periodos críticos del cultivo.

Recomendaciones

1. Optimización del manejo del riego:

- Ajustar la frecuencia de los riegos y las láminas aportadas en función de las necesidades estimadas por la metodología FAO 56 y los datos satelitales.

2. Monitoreo continuo:

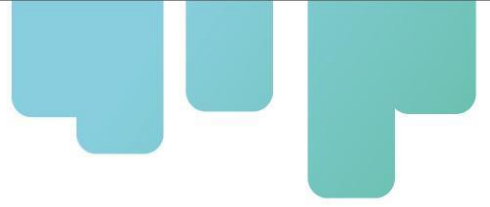
- Incorporar sistemas de monitoreo más robustos para evaluar la disponibilidad hídrica en el suelo y mejorar la precisión de los balances hídricos.

3. Capacitación técnica:

- Capacitar a los regantes y técnicos en el uso de herramientas satelitales para la planificación y manejo eficiente del riego.

4. Manejo adaptativo:

- Implementar estrategias de riego deficitario controlado en las etapas posteriores al envero para optimizar los rendimientos y la calidad de las uvas.



Conclusiones

El piloto tecnológico en el cultivo de vid en Junín, Mendoza, demostró la utilidad de la metodología FAO 56 asistida por datos satelitales para estimar las necesidades de riego de forma precisa. A pesar de las limitaciones en la frecuencia de riegos y la infraestructura, los resultados destacan la importancia de integrar herramientas tecnológicas para optimizar el uso del agua y mejorar la productividad del cultivo. Este enfoque puede ser replicado en otras regiones con características climáticas y de manejo similares.

2.2.4 Argentina - Cultivo de Tomate

Introducción

En Argentina, el tomate para industria tiene una producción anual de aproximadamente 600.000 toneladas en 7.331 ha. La provincia de San Juan, con un rendimiento promedio de 107 ton/ha, lidera la producción nacional. En el departamento de Pocito, epicentro de la producción en San Juan, el 95% del cultivo utiliza riego por goteo. Este piloto tecnológico evaluó la eficiencia del manejo hídrico utilizando la metodología FAO 56 asistida por información satelital para optimizar el uso del agua y maximizar la productividad.

Metodología aplicada a nivel de parcela

1. Ubicación y características de la parcela:

- Las validaciones se realizaron en dos parcelas comerciales: la parcela testigo y la control en el campo experimental de la EEA San Juan y la finca de Alfredo Archilla, asociada a la Asociación Tomate 2000.
- Los suelos son someros (40 cm de profundidad) con alta permeabilidad. El clima es árido, con precipitaciones anuales de 90 mm, concentradas en verano.

2. Estimación de necesidades hídricas:

- Las necesidades de riego se calcularon mediante la metodología "coeficiente de cultivo - evapotranspiración de referencia" (FAO 56), utilizando la plataforma satelital PLAS FONTAGRO.
- Los índices NDVI se utilizaron para calcular los coeficientes de cultivo basal (Kcb) y determinar semanalmente las necesidades netas y brutas de riego.

3. Monitoreo del riego y humedad del suelo:

- Se emplearon caudalímetros y sondas de humedad enterradas a 30 y 50 cm para medir la disponibilidad hídrica en el suelo.
- Se llevaron registros diarios de las láminas aplicadas y su relación con las necesidades calculadas.

Resultados

1. Manejo del riego:

- Durante el ciclo del cultivo, las láminas de riego aplicadas se ajustaron en su mayoría a las recomendaciones de la plataforma, excepto en momentos puntuales como:

- En noviembre, el productor aplicó más agua debido a su percepción de menor crecimiento del cultivo frente a parcelas vecinas.
- Al final del ciclo, el riego se redujo para favorecer una maduración uniforme, como se requiere para la cosecha mecánica.

2. Rendimientos y productividad del agua:

- En la temporada 2021/22, la parcela control alcanzó una productividad del agua de 14,47 kg/m³, superando los 10,74 kg/m³ de la parcela testigo.
- En la temporada 2023/24, marcada por el viento Zonda que afectó la producción, la productividad del agua fue de 11,42 kg/m³ en la parcela control, frente a 10,72 kg/m³ en la testigo

3. Impacto de las condiciones climáticas:

- El viento Zonda, ocurrido en el trasplante de la temporada 2023/24, afectó negativamente el desarrollo y rendimiento del cultivo, especialmente en la parcela control.

Recomendaciones

1. Monitoreo continuo:

- Incorporar herramientas como la plataforma PLAS FONTAGRO para planificar y ajustar el manejo del riego en función de las necesidades reales del cultivo.

2. Capacitación técnica:

- Capacitar a productores en el uso de tecnologías de teledetección para reducir errores en las decisiones de manejo hídrico.

3. Optimización del riego:

- Mejorar la frecuencia y distribución de las láminas aplicadas, especialmente en eventos climáticos adversos, para minimizar el impacto sobre la producción.

4. Riego deficitario controlado:

- Evaluar la implementación de estrategias de riego deficitario en las últimas etapas del cultivo para aumentar la uniformidad en la maduración.

Conclusiones

El piloto tecnológico en el cultivo de tomate para industria en San Juan demostró la utilidad de la metodología FAO 56 asistida por datos satelitales para mejorar la eficiencia hídrica y la productividad del cultivo. Aunque las decisiones del productor no siempre siguieron las



recomendaciones, los resultados destacan la importancia de integrar herramientas tecnológicas para enfrentar desafíos climáticos y optimizar el uso del agua en una región con recursos hídricos limitados.

2.2.5 Chile - Cultivo de Lechuga

Introducción

En la región de Coquimbo, el cultivo de lechuga ocupa en promedio 2.100 ha al año, lo que representa el 30% de la superficie nacional. La región se posiciona como la segunda productora de la especie, destacando por una productividad superior al promedio nacional. Sin embargo, la disminución de la disponibilidad de agua para riego plantea la necesidad de estrategias para mejorar la eficiencia en el uso de recursos hídricos. Este piloto tecnológico validó el uso de la metodología FAO 56 asistida por datos satelitales para optimizar el riego en el cultivo de lechugas.

Metodología aplicada a nivel de parcela

El ensayo se realizó en la Parcela Experimental Pan de Azúcar, ubicada en Coquimbo, en un suelo de textura franco arenosa en superficie y arcillosa en profundidad, con una demanda ambiental anual de 950 mm. La lechuga, variedad Desert Storm, se trasplantó manualmente en abril de 2021 y se desarrolló hasta julio. El riego se realizó mediante cintas de goteo con emisores de 5,5 L/hora.

La metodología FAO 56 fue empleada para calcular las necesidades de riego, utilizando el monitoreo satelital de NDVI en la plataforma PLAS FONTAGRO. La evapotranspiración de referencia (ET_o) se obtuvo de una estación agrometeorológica cercana. Durante el ensayo, se registraron los volúmenes de agua aplicados y la disponibilidad hídrica en el suelo mediante sondas de humedad y caudalímetros.

Resultados

El monitoreo satelital permitió identificar las diferentes etapas del cultivo, como el establecimiento, el crecimiento vegetativo y la fase de cosecha. A partir de los valores de NDVI, se establecieron coeficientes de cultivo basal (K_{cb}), que alcanzaron valores máximos de 0,9. La ET_o media diaria fue de 1,7 mm, acumulando 134,4 mm durante el ciclo del cultivo.

Durante el ciclo, se realizaron 15 riegos con una lámina total aplicada de 839 m³/ha, un 33% menos que en el riego tradicional, que alcanzó 1.250 m³/ha. Esta optimización del manejo del agua permitió mantener la humedad del suelo en niveles adecuados, con un umbral de agotamiento aproximado al 50% de la humedad aprovechable.

El rendimiento del cultivo en la parcela con tecnología fue de 30.540 unidades/ha, mientras que en el manejo tradicional fue de 35.000 unidades/ha. A pesar de la ligera disminución en el rendimiento, la productividad del agua en el sistema con tecnología fue 30% mayor, alcanzando 36 unidades/m³ frente a las 28 unidades/m³ del riego tradicional.

Recomendaciones

1. Ajuste en el manejo del riego:

- Implementar la metodología FAO 56 asistida por datos satelitales para planificar riegos en función de las necesidades específicas del cultivo, optimizando así el uso del agua.



2. **Monitoreo continuo:**

- Incorporar sensores de humedad y caudalímetros en todas las parcelas para garantizar un control preciso de los aportes de agua.

3. **Capacitación técnica:**

- Entrenar a los productores locales en el uso de tecnologías de monitoreo satelital para mejorar la eficiencia hídrica y garantizar la sostenibilidad de la producción.

Conclusiones

La metodología FAO 56 asistida por información satelital demostró ser una herramienta eficaz para optimizar el riego en el cultivo de lechugas en la región de Coquimbo. Permitió reducir el consumo de agua en un 33% y aumentar la productividad hídrica en un 30%, destacando su impacto positivo en zonas con limitaciones hídricas. Además, su simplicidad y accesibilidad la convierten en una herramienta valiosa para enfrentar los desafíos actuales de la agricultura en el norte de Chile.



2.2.6 Chile - Cultivo de Habas

Introducción

En la región de Coquimbo, el cultivo de habas ocupa aproximadamente 100 ha, representando el 5% de la producción nacional. Sin embargo, como todos los cultivos de esta región árida, depende del riego para alcanzar niveles productivos adecuados. Ante la disminución de la disponibilidad hídrica, es crucial adoptar estrategias para mejorar la eficiencia del uso del agua. Este piloto tecnológico validó el uso de la metodología FAO 56, asistida por datos satelitales, como una herramienta clave para optimizar el riego en el cultivo de habas.

Metodología aplicada a nivel de parcela

El ensayo se realizó en la Parcela Experimental Pan de Azúcar, en Coquimbo, durante el año 2021. La parcela tiene un suelo franco arenoso en superficie y arcilloso en profundidad, con una demanda ambiental anual de 950 mm. Se cultivó una hectárea de habas, variedad Dorado, con siembra manual el 3 de abril. El riego se realizó mediante cintas de goteo con emisores cada 0,2 m y una precipitación de 5,5 L/hora.

La metodología FAO 56 se aplicó con el soporte de la plataforma satelital PLAS FONTAGRO para calcular las necesidades de riego basadas en el monitoreo del índice de vegetación (NDVI). La evapotranspiración de referencia (ET_o) se obtuvo de una estación agrometeorológica ubicada en el sitio experimental. Además, se utilizó instrumental como sondas de humedad y caudalímetros para registrar los volúmenes de riego y la disponibilidad hídrica en el suelo.

Resultados

El monitoreo satelital permitió definir con precisión las etapas del cultivo, incluyendo el establecimiento, el desarrollo vegetativo, el llenado de vainas y la senescencia. Los coeficientes de cultivo basal (K_{cb}) alcanzaron un máximo de 1,15, mientras que la ET_o acumulada fue de 437 mm. Durante el ciclo del cultivo se aplicaron 15 riegos, con tiempos que oscilaron entre 31 y 126 minutos por evento, logrando un volumen total de riego de 608 m³/ha.

Gracias al manejo optimizado, el contenido de humedad en el suelo se mantuvo por encima del 40% del nivel de agotamiento de la humedad aprovechable, garantizando un desarrollo adecuado del cultivo. Esto fue posible a pesar de una reducción del 52,87% en el volumen total de agua aplicada en comparación con métodos tradicionales.

Rendimiento y productividad del agua

El rendimiento del cultivo con tecnología fue de 14.273 kg/ha, ligeramente inferior al obtenido sin tecnología (16.174 kg/ha). Sin embargo, la productividad del agua con tecnología fue significativamente mayor, alcanzando 23,5 kg/m³ frente a los 12,5 kg/m³ sin tecnología. Estos resultados reflejan una optimización sustancial del uso del agua, con una reducción en el consumo hídrico que no comprometió gravemente la producción.



Recomendaciones

1. Implementar tecnologías de riego basadas en datos satelitales:

- La metodología FAO 56 asistida por PLAS FONTAGRO permite ajustar los aportes de agua a las necesidades específicas del cultivo, maximizando la eficiencia hídrica.

2. Capacitación en el uso de tecnologías:

- Entrenar a los agricultores en el manejo de herramientas de monitoreo satelital para adoptar decisiones informadas en la planificación de riegos.

3. Monitoreo continuo del suelo:

- Incorporar sondas de humedad en parcelas comerciales para garantizar un control constante de la disponibilidad hídrica.

Conclusiones

La implementación de la metodología FAO 56 asistida por datos satelitales en el cultivo de habas demostró ser una herramienta eficaz para reducir el consumo de agua en más del 50%, incrementando la productividad hídrica en un 88%. Estos resultados son especialmente relevantes en la región de Coquimbo, donde la disponibilidad de agua para riego es limitada. La metodología no solo optimiza los recursos hídricos, sino que también facilita un manejo más sostenible y rentable del cultivo.

2.2.7 Chile - Cultivo de Papas

Introducción

En la región de Coquimbo, el cultivo de papas ocupa un promedio de 2.300 hectáreas anuales, representando el 9% de la producción nacional con un rendimiento promedio de 25 toneladas por hectárea, cifra superior al promedio nacional. Sin embargo, como todos los cultivos en zonas áridas, las papas dependen del riego para lograr una productividad adecuada. Ante la creciente escasez de agua por el cambio climático y la competencia entre sectores, es fundamental implementar herramientas para mejorar la eficiencia hídrica. Este piloto tecnológico validó el uso de la metodología FAO 56, asistida con información satelital, como una estrategia para optimizar el manejo del riego en el cultivo de papas.

Metodología aplicada a nivel de parcela

El ensayo se desarrolló en la Parcela Experimental Pan de Azúcar, en Coquimbo, durante la temporada 2020-2021. El suelo franco y profundo del sitio, junto con un clima marítimo y una demanda ambiental de 950 mm anuales, proporcionaron condiciones ideales para el estudio. Se cultivó la variedad de papas *Cardinal* en 1,3 hectáreas, utilizando riego localizado mediante cintas con goteros separados a 0,2 m.

La metodología FAO 56 se aplicó con el soporte de la plataforma satelital PLAS FONTAGRO, que permitió definir el coeficiente de cultivo basal (Kcb) basado en datos del índice de vegetación (NDVI). La ETo se obtuvo de una estación agrometeorológica ubicada en el sitio, y se utilizaron sondas de humedad y caudalímetros para monitorear la disponibilidad hídrica en el suelo y los volúmenes de riego aplicados.

Resultados

El monitoreo satelital facilitó la identificación de las etapas del cultivo, como el establecimiento, el desarrollo vegetativo, el llenado de tubérculos y la senescencia. Los valores máximos del Kcb fueron de 1,15, y la ETo acumulada alcanzó los 437 mm durante el ciclo del cultivo.

El manejo del riego incluyó 34 eventos distribuidos a lo largo del ciclo del cultivo, con tiempos que oscilaron entre 76 y 116 minutos por evento, logrando un volumen total de riego de 3.416 m³/ha. Estos aportes garantizaron que el contenido de humedad del suelo permaneciera por encima del 40% de agotamiento de la humedad aprovechable.

Rendimiento y productividad del agua

Los rendimientos alcanzaron un promedio de 57 toneladas por hectárea, duplicando el promedio nacional y regional. La productividad agronómica del agua, expresada como kilogramos de papa por metro cúbico de agua aplicada, fue de 16 a 17 kg/m³, superando ampliamente valores reportados en otras publicaciones.



Recomendaciones

1. Implementar tecnologías de riego asistidas por información satelital:

- La metodología FAO 56, en combinación con el uso de índices de vegetación como el NDVI, permite un manejo más preciso del riego.

2. Monitoreo continuo del suelo:

- Incorporar sondas de humedad y caudalímetros en parcelas comerciales para garantizar un control constante de la disponibilidad hídrica.

3. Capacitación técnica:

- Entrenar a los productores en el uso de herramientas de monitoreo y plataformas satelitales para mejorar la toma de decisiones.

Conclusiones

El uso de la metodología FAO 56, asistida con información satelital, demostró ser una herramienta eficaz para optimizar el manejo del riego en el cultivo de papas, maximizando la eficiencia hídrica y logrando rendimientos significativamente superiores al promedio nacional. Este enfoque no solo contribuye a la sostenibilidad del cultivo en zonas áridas, sino que también mejora la rentabilidad económica para los productores. La validación de esta tecnología en la región de Coquimbo subraya su potencial para ser implementada a mayor escala en otros sistemas productivos similares.



2.2.8 Chile - Cultivo de Poroto Verde

Introducción

En la región de Coquimbo, la superficie dedicada al cultivo de poroto verde oscila entre 618 y 980 hectáreas, posicionándose como el tercer cultivo de importancia en esta región a nivel nacional. Los rendimientos promedio se encuentran entre 8 y 9 t/ha, con un potencial máximo de 22 t/ha. Ante la creciente escasez de agua para riego en esta zona, es esencial implementar estrategias que mejoren la eficiencia hídrica. Este piloto tecnológico evaluó la metodología FAO 56 asistida con información satelital, con el objetivo de validar su utilidad en el manejo del riego del poroto verde.

Metodología aplicada a nivel de parcela

El ensayo se realizó en la Parcela Experimental Pan de Azúcar, ubicada en Coquimbo, entre septiembre y diciembre de 2021, en una superficie de 1 hectárea. Se utilizó la variedad *Venus*, y la siembra manual se efectuó el 3 de septiembre. El suelo del sitio es franco arenoso y profundo, mientras que el clima marítimo con una demanda ambiental de 950 mm/año y precipitaciones limitadas en torno a los 80 mm/año caracterizan la zona. El riego se realizó mediante cintas de goteo con emisores cada 0,2 m.

La metodología FAO 56, apoyada con datos del índice de vegetación NDVI obtenidos a través de la plataforma satelital PLAS FONTAGRO, permitió determinar el coeficiente de cultivo basal (Kcb) y ajustar las necesidades hídricas del cultivo en tiempo real.

Resultados

El monitoreo satelital permitió identificar las diferentes etapas de desarrollo del cultivo, como establecimiento, crecimiento vegetativo, y maduración. Durante el ciclo del cultivo, el Kcb alcanzó un máximo de 0,75, mientras que la ETo acumulada fue de 373 mm.

El manejo del riego incluyó 24 eventos distribuidos a lo largo del ciclo del cultivo, con tiempos de riego que variaron entre 41 y 138 minutos por evento, logrando un volumen total de riego de 2.120 m³/ha. Los niveles de humedad en el suelo, monitoreados mediante sondas, se mantuvieron dentro del rango aprovechable, entre 8% y 11%.

Rendimiento y productividad del agua

El rendimiento promedio alcanzado fue de 13.350 kg/ha bajo el esquema tecnológico, un incremento del 10,85% en comparación con el manejo convencional. Además, el uso de la tecnología redujo el consumo de agua en un 20%, lo que resultó en un aumento del 31% en la productividad del agua, alcanzando 6,3 kg/m³, frente a los 4,8 kg/m³ del método tradicional.



Recomendaciones

1. Adopción de tecnología satelital:

- Incorporar plataformas como PLAS FONTAGRO para el monitoreo continuo del desarrollo del cultivo y la optimización del riego.

2. Monitoreo del suelo y el riego:

- Utilizar sondas de humedad y caudalímetros para ajustar los aportes hídricos según las necesidades específicas del cultivo.

3. Capacitación técnica:

- Fomentar la formación de los agricultores en el uso de herramientas tecnológicas para un manejo eficiente del riego.

Conclusiones

El uso de la metodología FAO 56 asistida con información satelital demostró ser eficaz para optimizar el manejo del riego en el cultivo de poroto verde, aumentando la eficiencia hídrica y mejorando los rendimientos. La tecnología permitió una reducción significativa en el consumo de agua, a la vez que se incrementó la productividad por unidad de agua utilizada. Estos resultados subrayan el potencial de este enfoque para contribuir a la sostenibilidad y rentabilidad del cultivo en la región de Coquimbo, destacándose como una solución viable ante los desafíos de la escasez hídrica.

2.2.9 Chile - Cultivo de Maíz

Introducción

La región de Coquimbo cultiva alrededor de 730 hectáreas de maíz dulce, representando el 7% de la superficie nacional destinada a este cultivo. Los rendimientos promedio varían entre 50.000 y 70.000 mazorcas por hectárea, dependiendo de las prácticas agronómicas aplicadas. Dado el contexto de disminución en la disponibilidad de agua para riego en la región, este estudio evaluó la metodología FAO 56 asistida con información satelital para optimizar la eficiencia hídrica y validar su utilidad en el manejo del cultivo de maíz.

Metodología aplicada a nivel de parcela

El ensayo se llevó a cabo en la Parcela Experimental Pan de Azúcar (INIA-Intihuasi), ubicada en Coquimbo, en 0,7 hectáreas de maíz dulce (*variedad Dorado*). La siembra manual se realizó el 25 de enero de 2024, con una densidad de 53.000 plantas por hectárea. Se utilizó un sistema de riego localizado mediante cintas de goteo, con emisores de 1 L/h distribuidos cada 0,2 m.

La metodología FAO 56, apoyada con índices de vegetación satelital (NDVI) obtenidos de la plataforma PLAS FONTAGRO, permitió calcular el coeficiente de cultivo basal (Kcb) y ajustar las necesidades hídricas del cultivo según su desarrollo.

Resultados

El monitoreo satelital permitió identificar las etapas de desarrollo del cultivo, desde el establecimiento inicial (Kcb 0,2), el crecimiento vegetativo (Kcb 0,2-0,6), hasta el llenado de grano (Kcb final 0,9). La evapotranspiración de referencia (ET_o) acumulada durante el ciclo fue de 306,7 mm, mientras que el aporte hídrico total fue de 2.326 m³/ha, distribuido en 32 eventos de riego.

El contenido de humedad del suelo, monitoreado con sondas capacitivas, se mantuvo por encima del punto de marchitez permanente (12%), asegurando condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo.

Rendimiento y productividad del agua

El rendimiento promedio del cultivo fue de **27,1 t/ha de mazorcas frescas y 7,2 t/ha de materia seca**, con un índice de productividad del agua de 25,1 kg/m³ de materia verde y 7,7 kg/m³ de materia seca. Al ajustar este indicador al producto comercializado (mazorcas), se alcanzaron 11 kg/m³ de materia verde y 2,5 kg/m³ de materia seca.

Estos resultados subrayan el impacto económico del manejo eficiente del riego, considerando que las mazorcas comercializadas generaron ingresos de entre \$3.800 y \$5.300 CLP por metro cúbico de agua utilizada, dependiendo del precio de mercado en la región.

Conclusiones

El uso de la metodología FAO 56 asistida con información satelital demostró ser una herramienta eficaz para optimizar el manejo del riego en el cultivo de maíz, maximizando la eficiencia hídrica



sin comprometer el rendimiento.

- Impacto positivo: Los índices de vegetación satelital permitieron monitorear el desarrollo del cultivo y ajustar las necesidades de riego con precisión.
- Sostenibilidad: La reducción del consumo hídrico y el aumento de la productividad económica del agua refuerzan la viabilidad del uso de tecnologías para enfrentar limitaciones hídricas.
- Recomendaciones: Implementar herramientas satelitales como PLAS FONTAGRO y capacitar a los productores en el uso de metodologías avanzadas de manejo hídrico es clave para mejorar la sostenibilidad de la producción de maíz en regiones áridas como Coquimbo.

El estudio confirma que la tecnología no solo mejora la eficiencia del uso del agua, sino que también contribuye a la rentabilidad económica, adaptándose a las condiciones específicas del cultivo y la región.



2.2.10 Chile - Cultivo de Uva de Mesa

Introducción

En Chile, la región de Coquimbo destaca por su relevancia en la producción de uva de mesa, representando el 18% de la producción nacional con una superficie cultivada estimada en 6.000 hectáreas. Ante las limitaciones hídricas propias de esta región árida, surge la necesidad de optimizar la eficiencia en el uso del agua mediante estrategias tecnológicas. Este estudio evalúa el impacto de la metodología FAO 56 asistida con información satelital para la gestión del riego en uva de mesa, validando su aplicabilidad y beneficios a escala de parcela.

Materiales y Métodos

El ensayo se realizó en el Centro Experimental INIA Intihuasi, Peralillo, comuna de Vicuña (30° 2.336'S, 70° 41.275'O), durante la temporada 2023-2024. Se trabajó con un parrón de la variedad *Allison* de 3 años, bajo un marco de plantación de 3 m x 2 m y una superficie total de 2,5 hectáreas. El riego se llevó a cabo mediante un sistema de goteo con emisores de 4 L/h separados a 1 metro, generando una precipitación de 1,2 mm/h.

La metodología FAO 56 se aplicó con soporte de la plataforma PLAS FONTAGRO, utilizando imágenes satelitales para calcular el coeficiente de cultivo basal (Kcb). El monitoreo hídrico se complementó con sondas capacitivas (Teros11) a tres profundidades (10, 30 y 50 cm), conectadas a un datalogger (Zentra).

Resultados

Desarrollo del cultivo

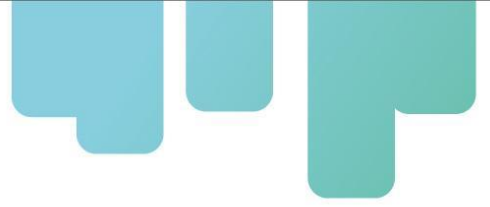
El monitoreo satelital permitió identificar las diferentes etapas fenológicas del cultivo, alcanzando un coeficiente de cultivo basal (Kcb) máximo de 0,8. Esta información fue clave para ajustar los aportes hídricos a las necesidades específicas del cultivo en cada etapa.

Manejo del riego

La evapotranspiración de referencia (ET_o) acumulada durante la temporada fue de **1.379 mm**, con un promedio diario de **3,75 mm/día**. Se realizaron **94 eventos de riego**, totalizando un tiempo de **32.940 minutos (549 horas)** y un volumen aplicado de **8.060 m³/ha**. El contenido volumétrico de humedad en el suelo se mantuvo entre un 12% y un 30%, garantizando condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo.

Rendimiento

La producción total promedio fue de **24 t/ha**, con un 82% destinado a comercialización, alcanzando una productividad económicamente útil de **20,4 t/ha**. La productividad del agua estimada fue de **2,4 kg/m³**, generando un retorno económico promedio de **\$3.600 CLP/m³**, considerando un precio de venta de \$1.500 CLP/kg.



Conclusiones

- Eficiencia hídrica: La implementación de la metodología FAO 56 asistida con datos satelitales permitió optimizar el uso del agua, maximizando la productividad hídrica en condiciones de escasez.
- Viabilidad económica: La alta calidad de la producción generó retornos significativos, reafirmando la eficacia económica de esta estrategia.
- Adopción tecnológica: La accesibilidad de los insumos tecnológicos y la simplicidad de la metodología favorecen su adopción por parte de los agricultores locales.

El estudio demuestra que la combinación de herramientas satelitales y métodos estandarizados como FAO 56 constituye una solución robusta y sostenible para enfrentar los desafíos de manejo hídrico en el cultivo de uva de mesa en regiones áridas como Coquimbo.



2.2.11 Chile - Cultivo de Mandarinas

Introducción

En la región de Coquimbo, el cultivo de mandarinas destaca por su relevancia económica, con una superficie cultivada de 7.550 ha que representa el 30% de la producción nacional. Los rendimientos promedio oscilan entre 30 y 65 t/ha, dependiendo de la variedad y las prácticas de manejo. Ante las limitaciones hídricas de la región, resulta crucial optimizar el uso del agua para maximizar la productividad. En este estudio se evaluó la metodología FAO 56 asistida con información satelital para el manejo del riego en mandarinas, validando su eficacia a escala de parcela.

Materiales y Métodos

El ensayo se realizó durante la temporada 2023-2024 en la parcela experimental San Clemente, ubicada en El Palqui, comuna de Monte Patria (30° 45.610'S, 70° 59.709'O). La parcela tiene 2,1 ha cultivadas con mandarinas (*Citrus x clementina* var. Orogrande), de 7 años de edad, con un marco de plantación de 2 m x 5 m. El riego se llevó a cabo mediante un sistema de goteo con dos líneas de emisores separados por 1 metro.

La metodología FAO 56 se implementó con el apoyo de la plataforma PLAS FONTAGRO, que permitió estimar el coeficiente de cultivo basal (Kcb) a partir de imágenes satelitales. El monitoreo hídrico se complementó con sondas de humedad capacitivas (GS1 y Teros11) enterradas a 30 y 70 cm y caudalímetros para registrar los volúmenes de agua aportados.

Resultados

Desarrollo del cultivo

El monitoreo satelital permitió identificar las fases fenológicas del cultivo, estableciendo un coeficiente de cultivo (Kcb) máximo de **1,1** durante el periodo de mayor demanda. Esta información fue clave para ajustar los volúmenes y frecuencias de riego.

Manejo del riego

La evapotranspiración de referencia (ET_o) acumulada durante la temporada fue de **1.208,7 mm**, con un promedio diario de **3,29 mm/día**. Se realizaron **94 eventos de riego**, con tiempos que variaron entre 60 y 480 minutos, totalizando un volumen aplicado de **8.327 m³/ha**. El contenido volumétrico de humedad en el suelo se mantuvo entre un 17% y un 42%, lo que garantizó condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo.

Rendimiento

La producción promedio en el sector regado con la plataforma PLAS fue de **68,3 t/ha**, con un 80% destinado a comercialización, lo que resultó en una productividad económicamente útil de **54,7 t/ha**. En contraste, el campo con riego tradicional obtuvo **46,5 t/ha**, con una productividad útil de **37,2 t/ha**.



Productividad del agua

La productividad del agua fue de **6,7 kg/m³** para el sector con tecnología PLAS, mientras que en el campo tradicional alcanzó **4,5 kg/m³**. Estos valores se traducen en un retorno económico de **\$4.318/m³** para el sector con PLAS, frente a **\$2.898/m³** para el sistema convencional, considerando un precio de \$644 CLP/kg.

Conclusiones

- Optimización hídrica: La metodología FAO 56 asistida con imágenes satelitales permitió maximizar la eficiencia en el uso del agua, incrementando la productividad hídrica y reduciendo el volumen de riego requerido.
- Viabilidad económica: Los altos rendimientos y el retorno económico asociado al riego con tecnología PLAS destacan su rentabilidad.
- Accesibilidad tecnológica: La facilidad de implementación y disponibilidad gratuita de las herramientas utilizadas refuerzan su potencial de adopción en contextos de limitaciones hídricas.

La combinación de metodologías estandarizadas y tecnología satelital representa una solución eficiente y sostenible para el manejo del riego en el cultivo de mandarinas en regiones áridas como Coquimbo.

2.2.12 Chile - Cultivo de Alfalfa

Introducción

En la región de Coquimbo, el deterioro de las praderas naturales ha reducido la disponibilidad de forraje para el ganado, especialmente en áreas de secano. Sin embargo, la implementación de sistemas de riego eficientes en zonas semiáridas puede establecer sistemas productivos sostenibles y ambientalmente amigables. Este estudio busca evaluar la eficiencia hídrica de un sistema de riego por goteo subterráneo en el cultivo de alfalfa, validando su aplicación en condiciones locales.

Objetivos

- **General:** Evaluar y contrastar la eficiencia hídrica de un sistema de riego por goteo subterráneo en cultivos de alfalfa establecidos en una zona semiárida de Chile.
- **Específicos:**
 - Caracterizar el crecimiento y la productividad del cultivo bajo diferentes tratamientos.
 - Evaluar el consumo de agua según el sistema de riego.
 - Comparar la eficiencia hídrica entre tratamientos.

Materiales y Métodos

El ensayo se realizó en la Parcela Experimental Pan de Azúcar, perteneciente a INIA Intihuasi, ubicada en Coquimbo (30° 4'26.89"S, 71°14'23.74"O). El suelo corresponde a la serie Quebrada de Martínez, caracterizado por textura franco-arenosa, sin limitaciones para el desarrollo radicular. Se cultivaron dos variedades de alfalfa:

1. **Baldrich 650** (dormancia intermedia, comercial).
2. **INIA PMG** (línea avanzada de mejoramiento genético).

Diseño experimental

El diseño incluyó 10 tratamientos resultantes de la combinación de cinco emisores de riego y dos variedades de alfalfa, con dos repeticiones. Cada parcela principal representó el sistema de riego, y las subparcelas, las variedades.

Sistema de riego

El sistema de riego subterráneo se instaló a 20 cm de profundidad con laterales separados por 50 cm. Para la definición del riego, se utilizó el marco conceptual FAO 56, incorporando coeficientes de cultivo (K_c) estimados mediante la plataforma PLAS y datos de evapotranspiración de referencia (ETo).



Evaluaciones experimentales

- Crecimiento del cultivo: Estimación semanal del porcentaje de cobertura a través de imágenes digitales y la aplicación de la App Canopeo.
- Registro del agua de riego: Medición semanal y final mediante contadores volumétricos.
- Humedad del suelo: Monitoreo con sensores de humedad y análisis gravimétrico.
- Productividad del cultivo: Evaluación del número de plantas por metro cuadrado, biomasa producida y porcentaje de materia seca.
- Eficiencia hídrica: Relación entre la productividad del cultivo y el volumen de agua utilizada.

Avances del Proyecto

- Preparación del suelo: Durante enero y febrero de 2024, se realizaron labores de despedrado y acondicionamiento del suelo mediante arado y rastra.
- Instalación del sistema de riego: En febrero de 2024 se completó la instalación del sistema de riego subterráneo, con emisores a 20 cm de profundidad y un espaciamiento de 50 cm entre líneas.
- Siembra: La siembra se realizó en septiembre de 2024, dejando el sistema de riego instalado como legado del proyecto.

Resultados Preliminares


Dado que la cosecha no pudo ser evaluada, los resultados preliminares se enfocan en la instalación del sistema de riego y la preparación de la parcela:

- El sistema de riego quedó operativo y listo para futuras evaluaciones de productividad.
- El proyecto demostró la viabilidad técnica de instalar sistemas de riego subterráneo en suelos semiáridos.

Conclusiones

Aunque no se obtuvo información productiva del cultivo, el proyecto logró:

- Implementar infraestructura: La instalación del sistema de riego subterráneo es un legado que permitirá evaluar la eficiencia hídrica en futuros estudios.
- Generar conocimiento técnico: Este piloto proporciona un modelo replicable para mejorar la productividad en áreas semiáridas.

- 
- Promover la sostenibilidad: La adopción de tecnologías de riego eficientes es esencial para enfrentar limitaciones hídricas y optimizar el uso de recursos.

El sistema instalado representa una base sólida para continuar evaluando la eficiencia hídrica y su impacto en la producción de alfalfa bajo condiciones de riego en la región de Coquimbo.

2.2.13 Chile - Piloto Tecnológico en el Centro Experimental INIA Choapa

Introducción

En el invierno de 2024, se llevaron a cabo mejoras significativas en el sistema de riego del Centro Experimental Choapa (INIA), ubicado en Cuz-Cuz, Illapel. Estas acciones se centraron en optimizar la eficiencia hídrica intrapredial para garantizar un abastecimiento adecuado de agua y la sostenibilidad del sistema de riego frente a las limitaciones hídricas crónicas de la región.

Objetivo

Optimizar el sistema de riego del Centro Experimental INIA Choapa mediante mejoras en la capacidad de almacenamiento, distribución y control del riego, promoviendo un uso eficiente del recurso hídrico.

Descripción de las Mejoras

1. Renovación del estanque de riego

El estanque de riego existente presentaba una capacidad embalsada limitada (500 m³, equivalente al 20% de su capacidad total). Esta situación afectaba la disponibilidad de agua, especialmente durante los períodos críticos de déficit hídrico, como en la temporada 2020/21, donde la dotación hídrica sólo cubrió el 30% de la demanda ambiental (ETc).

Las mejoras incluyeron:

- Retiro de la geomembrana anterior, cuya vida útil había expirado.
- Profundización del estanque en 1 metro, aumentando su capacidad a 600 m³.
- Reacondicionamiento de paredes y taludes, eliminando sedimentos acumulados.
- Instalación de nueva geomembrana soldada y revisada para evitar fugas.

Las pruebas de llenado verificaron la estanqueidad del sistema, alcanzando una capacidad plena de almacenamiento.

2. Mejoras en la caseta de control de riego

El sistema de riego del huerto presentaba limitaciones operativas significativas:

- Baja capacidad de la bomba de impulsión (110 l/min), insuficiente para cubrir todos los sectores de riego en un día.
- Ausencia de un sistema adecuado para la inyección de fertilizantes, lo que generaba problemas frecuentes de cavitación en la bomba de riego.

Para abordar estas deficiencias, se realizaron las siguientes mejoras:

- Instalación de una nueva bomba de impulsión con capacidad de 170 l/min, permitiendo regar todos los sectores diariamente.
- Incorporación de un estanque de fertilización de 500 litros, una bomba de inyección de fertilizantes, y un sistema de filtrado y control de presión.
- Implementación de un tablero de control de riego para una gestión más precisa (Figura 143).

Impacto de las Mejoras

Estas intervenciones optimizaron la capacidad de almacenamiento y distribución de agua, asegurando el riego eficiente de las **2,5 hectáreas plantadas** (de un total de 10 ha). El huerto alberga diversas especies frutales, entre ellas:

- Damascos: Variedades Katty, Castelbrite, Tilton.
- Nogales: Serr y Chandler.
- Almendros: Non Pareil, Carmel y Price.
- Mandarinos, olivos (mesa y aceite), pecanos, ciruelos y cerezos (Brooks, Lapins, Glen Red, Santana).

Estas especies se utilizan para la transferencia de conocimiento en manejo agronómico, determinación de demanda hídrica y balances hídricos. Además, se implementó el monitoreo de humedad de suelo mediante **sondas de capacitancia** y la plataforma satelital Agrisat, lo que permite ajustar la frecuencia del riego según las condiciones ambientales (Figura 144).

Conclusión

El proyecto piloto en el Centro Experimental INIA Choapa representa un avance significativo en la gestión hídrica intrapredial. Las mejoras realizadas:

- Aumentaron la capacidad de almacenamiento de agua en un 20%, asegurando una disponibilidad hídrica suficiente para cubrir las necesidades del huerto.
- Optimizaron la eficiencia operativa del sistema de riego, permitiendo la irrigación completa de los sectores y la aplicación precisa de fertilizantes.
- Fortalecieron la sostenibilidad del predio, promoviendo un uso eficiente de los recursos hídricos en un contexto de creciente escasez.

Este proyecto se consolida como un modelo replicable en sistemas productivos de zonas semiáridas, combinando innovación tecnológica y prácticas agrícolas sostenibles.

2.2.14 Resultados por país: Colombia - Piloto Tecnológico en el Cultivo de Lima Ácida Tahití, C.I. Palmira

Introducción

El cultivo de lima ácida Tahití en el Centro de Investigación Palmira (AGROSAVIA) representa un esfuerzo significativo por optimizar la eficiencia hídrica y la productividad en un contexto de alta demanda ambiental y limitaciones hídricas. Este piloto se desarrolló para evaluar el impacto del manejo de riego bajo balance hídrico y la incorporación de tecnologías como sensores de monitoreo de humedad y dendrómetros. Los resultados obtenidos proporcionan una visión integral del manejo sostenible de recursos hídricos en un cultivo clave para la región.

Objetivos

1. Evaluar el impacto del riego bajo balance hídrico en la productividad del cultivo de lima ácida Tahití.
2. Analizar el comportamiento del suelo y el desarrollo del fruto bajo diferentes condiciones de humedad.
3. Determinar la productividad del agua tras la implementación de tecnología en el sistema de riego.

Descripción del Piloto

Ubicación y características del cultivo

El piloto se realizó en el lote 31 del C.I. Palmira, ubicado en el Valle del Cauca. Las plantas de lima ácida Tahití están injertadas sobre **Citrumelo CPB 4475** y **limón Volkameriano**. El experimento incluyó cuatro parcelas (P1 a P4) de 45 plantas cada una:

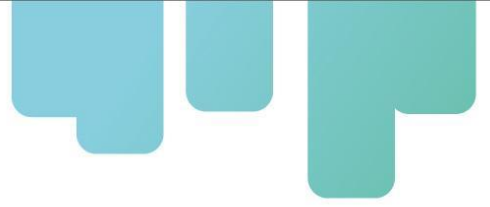
- P1 y P3: Manejo tradicional del riego.
- P2 y P4: Riego bajo balance hídrico.

Clima y suelo

La región presenta un régimen pluviométrico bimodal con un balance hídrico atmosférico predominantemente negativo. El suelo pertenece a la consociación **Palmira (PLa)**, caracterizado por ser bien drenado, muy profundo, neutro, de textura franco arcillosa y alta fertilidad.

Sistema de Riego

El cultivo cuenta con un sistema de riego por goteo abastecido por una motobomba de 10 HP, filtros de anillos e hidrociclón, y una red de distribución con emisores autocompensados (32 Lh-1árbol-1). El riego se realiza manualmente en cuatro módulos, con una frecuencia promedio de 1,5 días.



Resultados

1. Humedad del suelo y desarrollo del fruto

El análisis de la curva de retención de humedad mostró:

- Capacidad de campo (CC): 22%, Punto de marchitez permanente (PMP): 15%.

El agua aprovechable se agota en 4 días, lo que sugiere una frecuencia óptima de riego de 2 días para evitar déficits hídricos significativos. El seguimiento con dendrómetros mostró que, bajo condiciones de déficit hídrico, el crecimiento del fruto se desacelera significativamente, afectando el tamaño comercial y la viabilidad económica.

2. Programa de riego

El programa de riego se diseñó utilizando datos históricos de humedad del suelo y la tasa de cambio de humedad en procesos de secado e hidratación. Aunque las altas precipitaciones durante el período experimental limitaron la aplicación del programa, los datos obtenidos proporcionaron valiosa información para su implementación futura.

3. Productividad del agua

La implementación de tecnología en el manejo del riego mostró un impacto positivo significativo:

- Incremento del 3.7% en la producción, de 13.5 t/ha (2022) a 14 t/ha (2023).
- Reducción del 48.15% en el uso anual de agua.
- Mejora del 100.16% en la productividad del agua, pasando de 61.4 kg/m³ a 122.9 kg/m³.

Conclusiones

La implementación de tecnologías de monitoreo y manejo de riego bajo balance hídrico en el cultivo de lima ácida Tahití en el C.I. Palmira demostró ser una estrategia efectiva para:

- Aumentar la eficiencia hídrica: Se logró duplicar la productividad del agua con una reducción significativa en el volumen utilizado.
- Mejorar la sostenibilidad y rentabilidad: El incremento en la producción y la disminución del consumo hídrico son claves para enfrentar los desafíos de cambio climático y disponibilidad limitada de recursos.
- Optimizar el manejo del riego: Las herramientas tecnológicas permiten un control preciso de la humedad del suelo, reduciendo los riesgos asociados con déficits hídricos.

Estos resultados reafirman la relevancia de incorporar tecnologías accesibles y metodologías adaptadas a las condiciones locales para maximizar la productividad agrícola de manera sostenible.



2.2.15 Resultados por país: Colombia Piloto Tecnológico en Cultivos Tropicales Asistido por Sensores y Redes IoT – Colombia

Introducción

El distrito de riego RUT (D.RUT), ubicado en el Valle del Cauca, Colombia, es un área estratégica para la producción agrícola del país. Con más de 10,200 ha, destacan cultivos como aguacate, cacao, guayaba, papaya, maíz, vid, guanábana, lima ácida Tahití, caña de azúcar y maracuyá, que representan el 90% de su área productiva. Sin embargo, las técnicas tradicionales de riego, basadas en métodos empíricos y poco eficientes, han generado un uso excesivo del agua. Este piloto evaluó el impacto del uso de sensores de humedad y redes IoT para optimizar el manejo hídrico en estos cultivos, mejorando la productividad y reduciendo el consumo de agua.

Materiales y Métodos

El estudio se desarrolló en el D.RUT entre junio de 2021 y octubre de 2023. Se instalaron sensores capacitivos de humedad en 10 nodos principales, uno por cultivo, a profundidades adaptadas a cada especie (15-30 cm). Los datos se transmitieron a través de una red IoT a un servidor central, permitiendo monitoreo en tiempo real.

El sistema de riego incluyó tecnologías de alta frecuencia, ajustadas con base en el balance hídrico del suelo. Además, se capacitó a los productores en el uso de herramientas digitales como una plantilla Excel® para la toma de decisiones de riego. El consumo de agua y la productividad hídrica se analizaron comparando escenarios con y sin tecnología.

Resultados

Ahorro de agua: La implementación de sensores y redes IoT permitió reducir significativamente el consumo de agua en todos los cultivos. El ahorro de agua por cultivo fue:

- Aguacate: 61.8%
- Cacao: 79%
- Guayaba: 67.3%
- Papaya: 89.85%
- Maíz: 80.97%
- Vid: 89.19%
- Guanábana: 68.9%
- Lima ácida Tahití: 65%
- Caña de azúcar: 60.61%

- Maracuyá: 97.9%

Productividad del agua: La tecnología incrementó la productividad del agua, medida en toneladas de producto por m³ de agua utilizada:

- Aguacate: 0.024 t/m³
- Cacao: 0.000 t/m³
- Guayaba: 0.027 t/m³
- Papaya: 0.032 t/m³
- Maíz: 0.003 t/m³
- Vid: 0.0017 t/m³
- Guanábana: 0.245 t/m³
- Lima ácida Tahití: 0.027 t/m³
- Caña de azúcar: 0.005 t/m³
- Maracuyá: 0.013 t/m³

Estos resultados reflejan un manejo hídrico más eficiente, reduciendo costos operativos y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

Conclusiones

- Optimización hídrica: El uso de sensores de humedad y redes IoT mejoró significativamente la eficiencia en el uso del agua, reduciendo el consumo hasta en un 97.9% y aumentando la productividad hídrica en todos los cultivos.
- Impacto económico: La reducción del consumo de agua y combustible resultó en ahorros operativos significativos, incrementando la rentabilidad de los cultivos.
- Adopción tecnológica: La capacitación y las herramientas digitales facilitaron la implementación de estas tecnologías, mostrando su viabilidad para su adopción a gran escala en el Valle del Cauca y en otras regiones del país.

Este piloto establece un modelo replicable para el manejo eficiente del agua en la agricultura tropical, promoviendo prácticas sostenibles y rentables.

2.2.16 Uruguay – Cultivo de Soja

Introducción

Uruguay cuenta con una superficie de cultivo de soja de aproximadamente 1.000.000 ha, con un rendimiento promedio de 2.300 kg/ha, mayormente influenciado por las precipitaciones estivales. En la región noroeste, donde la superficie cultivada asciende a 140.000 ha, solo 1.200 ha reciben riego estratégico. Este piloto validó la metodología FAO-56 asistida con información satelital para optimizar el manejo del riego y maximizar la eficiencia hídrica en sistemas de pivot central.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó en dos pivots ubicados en El Junco, Salto, y Los Olivos, Paysandú. Se aplicó la metodología FAO-56 con apoyo de la plataforma AgriSatwebGIS®, integrando datos satelitales Sentinel 2 para estimar coeficientes de cultivo (K_c y K_{cb}) y la evapotranspiración ajustada (ET_a).

- Monitoreo del cultivo: Se seleccionaron de 14 a 30 puntos de muestreo por pivot. En estos, se midió índice de área foliar (IAF), clorofila, altura de planta y peso de granos ajustado al 13% de humedad.
- Balance hídrico: Se utilizó el modelo SIMDualKc para simular el contenido de agua en el suelo, calcular la evapotranspiración actual ($ET_{aSIMDualKc}$) y evaluar el impacto del manejo hídrico.

Resultados

Ahorro de agua

La implementación de tecnología permitió importantes ahorros en el consumo de agua:

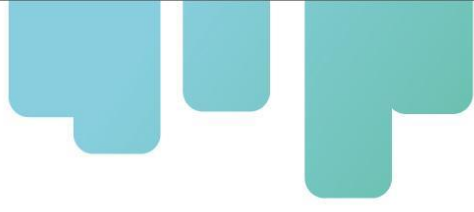
- Consumo hídrico ajustado: En condiciones de manejo adecuado, el uso de riego basado en datos satelitales y balance hídrico redujo el consumo de agua en más del 40%, comparado con métodos tradicionales.

Productividad del agua

La productividad hídrica mejoró significativamente gracias al uso estratégico del agua:

- Rendimientos ajustados: A pesar de condiciones de déficit hídrico en algunos pivots, los rendimientos se mantuvieron estables o mejoraron.
- Consistencia de ET_a : La ET_a estimada mediante el modelo SIMDualKc y los datos satelitales mostró una alta correlación, reflejando un manejo eficiente del riego en relación con las necesidades del cultivo.

Conclusiones

- 
- Eficiencia hídrica: La metodología FAO-56 asistida con imágenes satelitales y balance hídrico demostró su eficacia para reducir el consumo de agua y mejorar la productividad hídrica en cultivos de soja bajo pivot.
 - Adaptación climática: Este enfoque tecnológico es clave para enfrentar los desafíos del cambio climático y garantizar la sostenibilidad hídrica en Uruguay.
 - Escalabilidad: La plataforma AgriSatwebGIS® tiene potencial de ser implementada en otras regiones del país, promoviendo la digitalización del manejo del riego.

Este piloto posiciona a Uruguay como un referente en la adopción de tecnologías de precisión para el manejo eficiente del agua en cultivos estratégicos.



2.2.17 Uruguay - Cultivo de Maíz

Introducción

Uruguay cultiva aproximadamente 188.000 ha de maíz, con un rendimiento promedio de 5.500 kg/ha, el cual varía ampliamente según las precipitaciones estivales, ya que más del 80% del área se cultiva en secano. En sistemas de riego, los rendimientos promedian 7.600 kg/ha, con potencial de superar los 15.000 kg/ha en el litoral norte bajo manejo adecuado. Este piloto evaluó la metodología FAO-56 asistida con datos satelitales, con el objetivo de optimizar el riego y maximizar la productividad hídrica en pivots centrales.

Materiales y Métodos

El estudio se llevó a cabo durante las zafas de riego 2020-2021, 2021-2022 y 2023-2024 en pivots localizados en Salto y Paysandú. La metodología integró:

- Monitoreo del cultivo: Selección de 14 a 30 puntos representativos en cada pivot para evaluar índice de área foliar (IAF), clorofila y altura de planta, además del peso de granos ajustado al 13% de humedad.
- Datos climáticos: Estaciones meteorológicas y el modelo FAO-56 para calcular evapotranspiración de referencia (ET_o) y necesidades hídricas.
- Tecnología satelital: Uso del índice NDVI con la plataforma AgriSatwebGIS® para estimar los coeficientes de cultivo (K_c y K_{cb}) y la evapotranspiración actual (ET_a).
- Modelo de balance hídrico: SIMDualK_c para evaluar la disponibilidad hídrica y ajustar el manejo del riego según condiciones de suelo y clima.

Resultados

Ahorro de agua

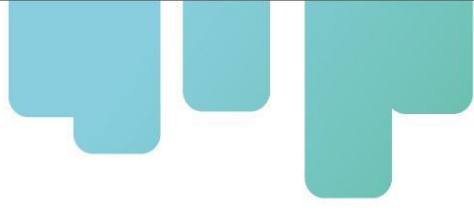
El uso de tecnología permitió reducir significativamente el consumo de agua:

- Consumo hídrico ajustado: Los pivots bien manejados lograron una reducción de hasta el 35% en el uso de agua, especialmente en años con estrategias de riego más oportunas y precisas.

Productividad del agua

La productividad hídrica aumentó considerablemente en sistemas manejados técnicamente:

- Rendimientos superiores: En pivots con riego eficiente, los rendimientos oscilaron entre 12 y 15 toneladas/ha, superando ampliamente el promedio nacional de cultivos de secano.

- 
- Relación ET_a y ET_c : La concordancia entre la ET_a estimada por balance hídrico ($ET_{aSIMDualKc}$) y la obtenida vía satelital (ET_a AgriSat) validó el uso de ambas herramientas para optimizar el manejo hídrico.

Efectos del manejo hídrico

El impacto del manejo del riego fue evidente en la variabilidad de los coeficientes de cultivo (K_c y K_{cb}):

- Riego eficiente: Los pivots con manejo adecuado mostraron valores de K_c y K_{cb} cercanos a los teóricos del FAO-56, reflejando un desarrollo óptimo del cultivo.
- Riego deficiente: En sitios con riego limitado, los coeficientes mostraron mayor dispersión, indicativa de estrés hídrico y rendimientos reducidos.

Conclusiones

- Eficiencia hídrica: La combinación de balance hídrico y datos satelitales permitió optimizar el uso del agua, garantizando rendimientos más altos y sostenibles.
- Viabilidad tecnológica: La plataforma AgriSatwebGIS® demostró ser una herramienta accesible y efectiva para evaluar y ajustar estrategias de riego.
- Impacto ambiental y económico: Reducir el consumo de agua no solo mejora la productividad hídrica, sino que también minimiza el impacto ambiental y los costos asociados al riego en cultivos de maíz.

Este piloto confirma la importancia de tecnologías innovadoras para el manejo hídrico eficiente, posicionando a Uruguay como un referente en agricultura de precisión.

2.2.18 Uruguay - Pasturas Permanentes

Introducción

En Uruguay, las pasturas permanentes ocupan una superficie aproximada de 2.500.000 ha, con una producción de materia seca anual altamente dependiente de las lluvias, principalmente en primavera y verano. Sin embargo, los eventos de déficit hídrico recurrentes, exacerbados por el cambio climático, afectan negativamente la persistencia y longevidad de estas pasturas. Este piloto tecnológico se centró en la implementación y validación de la metodología FAO-56 asistida por datos satelitales para optimizar el manejo del riego en una parcela experimental de pastura permanente.

El objetivo principal fue proporcionar a los productores ganaderos herramientas tecnológicas modernas para maximizar la eficiencia en el uso del agua, promoviendo un manejo sostenible y de alta precisión en las decisiones de riego.

Materiales y Métodos

El piloto se realizó en la parcela experimental "El Junco", Colonia Rubio, Salto, en una superficie de 6 ha sembradas con festuca (18 kg/ha) y trébol blanco (5 kg/ha) en 2015.

Infraestructura y monitoreo

- Sistema de riego: Riego por melgas, utilizando un canal superficial que transporta agua desde una represa ubicada a 3 km.
- Monitoreo climático: Datos obtenidos de una estación meteorológica automática cercana, para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) y las necesidades de riego según FAO-56.
- Tecnología satelital: Plataforma AgriSatwebGIS® para el cálculo de NDVI, K_c y K_{cb}, con imágenes Sentinel 2.
- Balance hídrico: Modelo SIMDualK_c para ajustar las necesidades de agua en función de las condiciones del suelo y el cultivo.

Riego y manejo del agua

Se aplicó una lámina neta de 60 mm cada vez que la evapotranspiración alcanzó ese valor, asegurando un manejo eficiente del agua. Cada melga abarcó un área promedio de 405 m², con un tiempo de riego de 75 minutos.

Resultados

Ahorro de agua

El riego por melgas permitió aprovechar eficientemente el agua disponible, ajustando los aportes según las necesidades del cultivo:

- Lámina total aplicada: Promedió 81 mm por evento, con 3 riegos en la zafra 2020-2021 y 7 en 2021-2022.

Productividad del agua

El riego incrementó significativamente la producción de materia seca:

- Producción bajo riego: En promedio, la materia seca acumulada fue de 13.662 kg/ha en 2020-2021 y 12.278 kg/ha en 2021-2022, superando en un 60-70% las producciones de pasturas en secano.
- Persistencia de la pastura: El riego favoreció la persistencia del cultivo, garantizando su aprovechamiento durante el otoño e invierno.

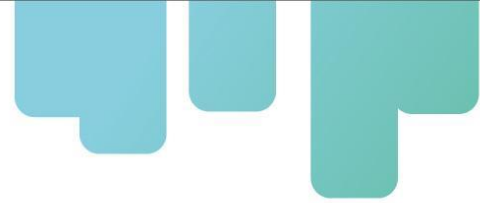
Monitoreo del desarrollo

- Índice de vegetación (NDVI): Mostró valores promedio de 0,6 durante el periodo de evaluación, reflejando un crecimiento estable bajo pastoreo directo.
- Humedad del suelo: El monitoreo continuo con sensores FDR aseguró que el contenido hídrico se mantuviera en torno al 50% de agotamiento permisible, siguiendo las recomendaciones de FAO-56.

Conclusiones

- Optimización del riego: Aplicar 60 mm cada vez que la evapotranspiración acumulada alcanza este valor resulta en un uso eficiente del agua, maximizando la producción de materia seca y minimizando pérdidas.
- Impacto del riego: El riego no solo aumenta la producción, sino que también mejora la persistencia y longevidad de las pasturas, fundamentales para la ganadería sostenible.
- Viabilidad tecnológica: La metodología FAO-56 asistida con NDVI y herramientas como AgriSatwebGIS® es una solución accesible y válida para manejar el riego en pasturas permanentes.

Estos resultados destacan el potencial del riego en la mejora de los sistemas ganaderos en Uruguay, incentivando su adopción entre los productores.



2.2.19 CONCLUSIÓN A ESCALA DE PARCELA

El análisis de los pilotos tecnológicos en la escala de parcela permitió identificar importantes avances en el manejo del agua para riego, optimizando su uso mediante la implementación de tecnologías de monitoreo, teledetección y metodologías estandarizadas como FAO-56. Estos estudios destacan que la combinación de herramientas tecnológicas y ajustes adaptativos en las prácticas de riego mejoran la eficiencia hídrica e incrementan la sostenibilidad y productividad de los cultivos. Los resultados confirman que es posible implementar soluciones escalables y replicables para enfrentar los desafíos de disponibilidad hídrica en regiones con condiciones climáticas adversas. A continuación, presentamos conclusiones por país:

Argentina: Los pilotos tecnológicos en Argentina, que incluyeron cultivos de pera, maíz, vid y tomate, mostraron mejoras significativas en la eficiencia hídrica gracias al uso de datos satelitales y sensores de humedad. La productividad del agua y los rendimientos superaron los promedios regionales, especialmente en sistemas de manejo tecnificado. Las plataformas de teledetección como PLAS FONTAGRO jugaron un papel clave en el ajuste de las necesidades hídricas, permitiendo un manejo más adaptado a las características locales de cada cultivo.

Chile: En Chile, los pilotos tecnológicos implementados en cultivos como lechuga, habas, papa, maíz y uva de mesa lograron optimizar el consumo de agua mediante tecnologías satelitales y sensores de humedad. En algunos casos, la productividad del agua aumentó hasta un 88%, destacando la adaptabilidad de estas herramientas en zonas áridas. Los resultados reflejan que la metodología FAO-56 asistida por teledetección no solo incrementa la eficiencia hídrica, sino que también contribuye a la sostenibilidad del sector agrícola en regiones con limitaciones de agua.

Colombia: En Colombia, los cultivos tropicales como lima ácida Tahití, cacao, maracuyá y aguacate beneficiaron enormemente de la implementación de sensores de humedad y redes IoT. Los resultados mostraron ahorros de agua de hasta el 97.9% y mejoras significativas en la productividad hídrica. La integración de tecnologías digitales permitió un manejo más eficiente y sostenible, reafirmando su viabilidad para optimizar el riego en sistemas agrícolas diversificados y de alta demanda ambiental.

Uruguay: En Uruguay, los pilotos tecnológicos aplicados en soja, maíz y pasturas permanentes lograron importantes avances en eficiencia hídrica. La implementación de FAO-56 y datos satelitales permitió reducir el consumo de agua en un 35-40% y mejorar significativamente la producción de materia seca y granos. Estos resultados validan la importancia de adoptar tecnologías adaptativas en regiones donde los eventos de déficit hídrico son cada vez más recurrentes.



2.2.20 PRINCIPALES RECOMENDACIONES PARA EL AUMENTO DE LA EFICIENCIA HÍDRICA A ESCALA DE PARCELA

Tecnología y Monitoreo: Es fundamental implementar herramientas de teledetección y sensores de humedad para ajustar las necesidades hídricas a las características específicas de cada cultivo y región. El uso de plataformas accesibles como PLAS FONTAGRO o AgriSatwebGIS® puede facilitar la gestión hídrica en tiempo real, permitiendo a los agricultores tomar decisiones informadas que optimicen el uso del agua.

Capacitación y Educación: La capacitación técnica es clave para que los agricultores y las organizaciones de usuarios del agua puedan interpretar datos satelitales y manejar eficientemente el riego. Es necesario desarrollar programas de formación enfocados en el uso de tecnologías digitales y su integración en las prácticas agrícolas tradicionales, garantizando así una adopción más amplia y efectiva.

Infraestructura y Políticas: Es imperativo modernizar los sistemas de riego tradicionales hacia tecnologías más eficientes, como el riego por goteo o subterráneo. Además, es crucial diseñar políticas públicas e incentivos económicos que promuevan la adopción de estas prácticas sostenibles, reduciendo las barreras de entrada para pequeños y medianos productores.

Sostenibilidad y Adaptación: El diseño de estrategias adaptativas es esencial para enfrentar los desafíos del cambio climático y garantizar la sostenibilidad de los sistemas productivos. Priorizar la innovación tecnológica permitirá maximizar la eficiencia hídrica y asegurar la seguridad alimentaria, incluso en contextos de limitaciones hídricas severas. Estos enfoques adaptativos son indispensables para fortalecer la resiliencia del sector agrícola frente a las crecientes demandas ambientales.



3. LEGADO Y RECOMENDACIONES

El legado del proyecto PLAS-ALC sobre la obtención de una mayor eficiencia en el uso del agua en el manejo del agua de riego se puede resumir en tres aspectos:

- 1. La eficiencia del uso del agua mejora al disponer de información en tiempo real de las demandas de agua de riego, información que necesita ser precisa, fiable y oportuna. La plataforma PLAS-ALC se ha mostrado idónea para proveer esta información.**
- 2. Esta mejora requiere de un equipo técnico que capacita en el uso de las herramientas tecnológicas y trabaja estrechamente con los usuarios. Además, acompaña a otros técnicos y usuarios directamente en campo para la correcta interpretación de la información de acuerdo a las condiciones reales de los cultivos.**
- 3. En relación con una mejor gestión del agua en zonas regables, la Contabilidad del Agua de Riego asistida por Teledetección es un buen instrumento y su integración en la rutina de los gestores requiere garantizar una continuidad en el tiempo año tras año.**

El proyecto ha abordado también los trabajos de capacitación y acompañamiento a técnicos a través de eventos presenciales y mediante videoconferencias. En total, se llevaron a cabo 127 actividades de difusión, con un impresionante total de 16.113 participantes o visualizaciones registradas.

El proyecto ha abordado también los trabajos de capacitación y acompañamiento a técnicos y estudiantes a través de eventos presenciales y mediante videoconferencias. De este modo se han alcanzado más de 550 usuarios capacitados y más de 3.000 visualizaciones de contenidos on-line, lo cuales siguen siendo consultados.

En este sentido, la recomendación es la identificación en cada zona de técnicos clave para los trabajos de extensión masiva, que tendría que ser implementada en la continuidad de este proyecto.

Así mismo, es recomendable ampliar la cobertura de la plataforma de forma que abarque todas las zonas susceptibles de utilizar sistemas de riego para incrementar la productividad agrícola en los países ALC. Dicha plataforma, sobre la base de la actual, proporcionaría las demandas de agua de riego en tiempo real. Se requiere que sea de forma transparente, esto es permita visualizar las imágenes, muestre el coeficiente de cultivo y su evolución, y muestre también el valor de la serie temporal de la evapotranspiración de referencia, así como el dato agregado de la demanda de agua del cultivo. Todo ello en tiempo real.

Se recomienda encarecidamente que, a la tradicional formación de técnicos y agricultores avanzados vía cursos, talleres y/o seminarios, se incorpore el modo de acompañamiento por miembros del grupo en su aplicación a casos reales específicos, pues sin ello la formación puede tener un efecto limitado.

La mejora de la gestión del agua en zonas regables utilizando la metodología de Contabilidad del



Agua de Riego asistida por Teledetección, requiere la continuidad en el tiempo de la información generada para su integración paso a paso en la rutina de operación de la gestión del agua en cada zona regable.

Se recomienda extender la formación en estas nuevas tecnologías a estudiantes de cursos avanzados de grado y master, en colaboración con los centros docentes y universidades con las que se pueda establecer convenios para la impartición de cursos reglados. Se ha detectado que la metodología aquí desarrollada no forma parte usualmente del currículo reglado actual. Durante el desarrollo del proyecto se realizaron seminarios en la Universidad Nacional (Colombia), Universidad de San Juan (Argentina), Universidad Católica de Chile, Universidad Autónoma Metropolitana de México, pero fueron eventos puntuales.

Así mismo, se recomienda la extensión mediante charlas en centros escolares dada la facilidad con que se visualiza la metodología y la necesidad de énfasis en el cuidado del agua desde la formación básica. Entre las estrategias de difusión y capacitación en este segmento, también se considera adecuada la generación de repositorios con material audiovisual de capacitación en canales digitales (ej. YouTube).



Figura 1. Actividades de capacitación realizadas durante el proyecto.

3.PRODUCTOS DE DIFUSIÓN CON RECOMENDACIONES

3.1 SERIE TÉCNICA INIA URUGUAY.

La serie técnica titulada “*Experiencias y avances en la mejora de la eficiencia del uso del agua de riego mediante la plataforma agraria satelital PLAS en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia*” será publicada una vez finalizado el proyecto. Se encuentra en fase de diagramación por parte de la imprenta y se publicará como una serie técnica de INIA Uruguay. Tendré ejemplares físicos y también digital en la biblioteca de INIA Uruguay e INIA Chile.

Presentamos la portada (**Figura 2**) e índice general ()



Figura 2. Portada serie técnica “Experiencias y avances en la mejora de la eficiencia del uso del agua de riego mediante la plataforma agraria satelital PLAS en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia”



Índice General

1. Resumen del proyecto PLAS-ALC

- 1.1. Introducción
- 1.2. Objetivos del proyecto
- 1.3. Metodología general
- 1.4. Principales resultados

2. La plataforma PLAS: Determinación de las necesidades de agua

Alfonso Calera; Claudio Balbontín; Raúl Moreno; Jaime Campoy; Jesús Garrido-Rubio; Claudio García, Álvaro Otero; Claudia Bavestrello; Britt Wallberg; José González-Piqueras.

- 2.1. Introducción a la plataforma PLAS
- 2.2. Metodología para determinar las necesidades de agua
- 2.3. Validación de la plataforma
- 2.4. Uso práctico por técnicos y agricultores

3. Contabilidad del agua en las zonas regables

Jesús Garrido-Rubio; Claudio Balbontín; Claudia Bavestrello; Britt Wallberg; Ayelén Montenegro; Roberto Simón Martínez; Fernando González Aubone; Gustavo Satlari; Carlos Marcelo Puertas; Guillermo Cúneo; Julieta Ferrer; Diana Mateo; Liliana Ríos; Mauricio Martínez; Claudio García; Álvaro Otero; Sofía Calero y Alfonso Calera.

3.1 Introducción

3.2 Valle del Río Elqui; Coquimbo; Chile.

- **3.2.1 Presentación del modelo y productos obtenidos.**
- **3.2.2 Intercambio de información de entrada al modelo**
- **3.2.3 Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección**
- **3.2.4 Transferencia de la información a los gestores públicos y privados del agua**

3.3 Villa Regina; Río Negro; Argentina

- **3.3.1 Presentación del modelo y productos obtenidos**
- **3.3.2 Intercambio de información de entrada al modelo**
- **3.3.3 Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección**
- **3.3.4 Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua**

3.4 Tunuyán Inferior; Mendoza; Argentina

- **3.4.1 Presentación del modelo y productos obtenidos**
- **3.4.2 Intercambio de información de entrada al modelo**
- **3.4.3 Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección**
- **3.4.4 Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua**



3.5 Colonia Fiscal Sarmiento; San Juan; Argentina

- **3.5.1 Presentación del modelo y productos obtenidos**
- **3.5.2 Intercambio de información de entrada al modelo**
- **3.5.3 Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección**
- **3.5.4 Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua**

3.6 Arroyo del Tala; Salto; Uruguay

- **3.6.1 Presentación del modelo y productos obtenidos**
- **3.6.2 Intercambio de información de entrada al modelo**
- **3.6.3 Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección**
- **3.6.4 Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua**

3.7 Distrito RUT; Valle del Cauca; Colombia

- **3.7.1 Presentación del modelo y productos obtenidos**
- **3.7.2 Intercambio de información de entrada al modelo**

3.8 Discusión y Conclusiones

3.9 Datos suplementarios. Capas accesibles en la plataforma PLAS

3.10 Referencias

4. Experiencias en el manejo del riego en cultivos con riego satelital.

4.1 ARGENTINA

VIDES. Manejo eficiente del riego en vides con información satelital

Carlos Marcelo Puertas; Fabian Marcelo Tozzi; Daiana Giselle Mateo.

PERAS. Manejo eficiente del riego en peras con información satelital

Ayelén Montenegro; Roberto Simón Martínez; Andrea Rodríguez; Ángel Muñoz; y Mariela Martinotti.

MAÍZ. Manejo eficiente del riego en maíz con información satelital

Martínez, Roberto S; Reinoso Lucio; Neffen, E; Román, José L; Montenegro, Ayelén; Muzi, Enrique; D'Onofrio, Mariano; Zelmer, Hernán; Cerrota, Alfonso.

TOMATE. Manejo eficiente del riego en tomates con información satelital

Fernando González Aubone; Emanuel Delfino; Sebastián Rodríguez y Marcela Molina.

4.2. CHILE

LECHUGA. Manejo eficiente del riego en lechuga con información satelital

Cornelio Contreras S.; Claudio Balbontín; Álvaro Castillo R.; Claudia Bavestrello.

PAPA. Manejo eficiente del riego en papa con información satelital



Cornelio Contreras S.; Claudio Balbontín; Álvaro Castillo R.; Claudia Bavestrello.

MANDARINA. Manejo eficiente del riego en mandarina con información satelital

Claudio Balbontín; Ariadna Veas; Álvaro Castillo; Claudia Bavestrello.

MAÍZ. Manejo eficiente del riego en maíz con información satelital

Álvaro Castillo; Claudio Balbontín; Claudia Bavestrello.

UVA DE MESA. Manejo eficiente del riego en uva de mesa con información satelital

Álvaro Castillo R.; Claudio Balbontín; Claudia Bavestrello.

POROTO. Manejo eficiente del riego en poroto verde con información satelital

Cornelio Contreras S.; Claudio Balbontín; Álvaro Castillo R.; Claudia Bavestrello.

4.3 COLOMBIA

CULTIVOS TROPICALES. Manejo eficiente del riego en cultivos tropicales con información satelital

Ríos-Rojas L.; Cano-Benítez M.; Martínez M.; Giraldo-Castaño M.; Castillo-Sánchez L.

4.4. URUGUAY

PASTURAS Manejo eficiente del riego en pasturas con información satelital

Claudio García & Álvaro Otero

MAÍZ. Manejo eficiente del riego en maíz con información satelital

Claudio García & Álvaro Otero

SOJA. Manejo eficiente del riego en soja con información satelital

Claudio García & Álvaro Otero

5. Capacitación y acompañamiento a técnicos y usuarios

Alfonso Calera; Claudio Balbontín; Claudio García; Álvaro Otero; Claudia Bavestrello; Britt Wallberg; Guillermo Cuneo; Vicente Bodas.

5.1. Estrategias de formación implementadas

4.2. Actividades realizadas en los países participantes

4.3. Retos y aprendizajes

4.4. Recomendaciones para futuros proyectos

6. Legado y recomendaciones.

El documento final será difundido por los miembros del proyecto y las instituciones



participantes.

3.2 AGRICULTURA 4.0: CUÁNDO, CUANTO Y CÓMO REGAR.

La publicación “**Agricultura 4.0: Cuándo, cuanto y Cómo regar**” fue desarrollado en el marco del proyecto PLAS-ALC para abordar los desafíos en la gestión hídrica en sistemas agrícolas colombianos. Este documento técnico y práctico, elaborado por el equipo de investigación del proyecto de Agrosavia, liderado por la Dra, Liliana Ríos, incluye recomendaciones para la implementación de tecnologías avanzadas como sensores IoT, monitoreo satelital, y plataformas digitales en el manejo del agua.

El manual se encuentra disponible en formato digital a través del portal de la editorial Agrosavia, y puede ser descargado en la siguiente dirección: <https://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/book/377>. Su contenido está orientado a productores, técnicos agrícolas y gestores de recursos hídricos interesados en adoptar prácticas innovadoras para enfrentar la escasez hídrica y promover la sostenibilidad en la producción agrícola.

Contenido de la publicación:

El manual incluye capítulos que explican detalladamente:

1. **La importancia de la agricultura 4.0 en la gestión del agua de riego:** Describe los principios y beneficios de la integración de tecnologías digitales.
2. **Implementación de sensores IoT y sistemas de monitoreo remoto:** Proporciona guías prácticas para instalar y operar estos dispositivos.
3. **Uso de plataformas digitales para el manejo eficiente del agua:** Detalla las herramientas disponibles para la planificación del riego y la toma de decisiones basada en datos.
4. **Estudios de caso:** Presenta ejemplos de cultivos tropicales como maracuyá, maíz, caña de azúcar y guanábana en el distrito de riego RUT, demostrando ahorros significativos en el consumo hídrico y mejoras en la rentabilidad económica.

Recomendaciones Basadas en la publicación:

- **Capacitación de usuarios:** Se enfatiza la necesidad de programas de formación continuos para asegurar el uso efectivo de las tecnologías descritas.
- **Expansión a otras regiones:** Se recomienda replicar esta metodología en diferentes áreas del país para evaluar su aplicabilidad en diversos contextos.
- **Fortalecimiento de la infraestructura digital:** Mejorar la conectividad y la integración de redes IoT para garantizar la eficiencia del monitoreo en tiempo real.
- **Inversión en investigación y desarrollo:** Fomentar alianzas entre instituciones públicas y

privadas para optimizar las tecnologías existentes y desarrollar nuevas soluciones.

La publicación de este manual representa un paso significativo hacia la modernización de la agricultura en Colombia, promoviendo la adopción de tecnologías innovadoras que contribuyan a una gestión hídrica sostenible y eficiente. Este esfuerzo refuerza el compromiso del proyecto PLAS-ALC con la sostenibilidad agrícola en América Latina y el Caribe.

En la **Figura 3** se presenta la portada de la publicación.



Figura 3. Portada de Agricultura 4.0: Cuando, cuánto y Cómo regar.



4. CONCLUSIONES

Innovación y precisión tecnológica

La metodología implementada en el proyecto PLAS-ALC, basada en información satelital y herramientas digitales, ha demostrado ser precisa, confiable y robusta para determinar las necesidades de agua de riego en diversos climas y cultivos. Su integración en la planificación hídrica ha permitido una gestión eficiente tanto a nivel de parcela como de zona regable (cuenca), consolidándose como una solución innovadora frente a los desafíos del uso del agua en la agricultura.

Resultados significativos

En las regiones piloto del proyecto, se lograron importantes ahorros en el uso del agua, incrementos en la productividad agrícola y mejoras en la sostenibilidad económica de los productores. La tecnología demostró ser particularmente eficaz en climas áridos y semiáridos, adaptándose a las condiciones específicas de estos entornos. Sin embargo, enfrentó ciertas limitaciones en zonas tropicales con alta nubosidad, lo que pone de manifiesto la necesidad de seguir desarrollando soluciones específicas para estos contextos.

Capacitación y transferencia de conocimientos

Un componente clave del proyecto fue la formación y transferencia de conocimientos, alcanzando 127 actividades de difusión, mediante talleres, seminarios y eventos de capacitación, con un impresionante total de 16.113 participantes o visualizaciones registradas. Este esfuerzo ha consolidado una base sólida para la transferencia tecnológica en la región. No obstante, se recomienda fortalecer la capacitación con un enfoque práctico y continuo en campo, asegurando que los usuarios puedan aplicar de manera efectiva las herramientas en sus sistemas productivos.

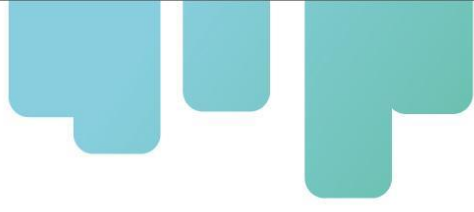
Legado del proyecto

La plataforma PLAS-ALC se ha consolidado como un modelo replicable para otras regiones de América Latina y el Caribe, destacando su potencial para promover la sostenibilidad hídrica y la modernización de la agricultura. Su continuidad y expansión dependerán de la construcción de alianzas estratégicas entre instituciones públicas, privadas y académicas, así como de políticas que apoyen su adopción a mayor escala.

Recomendaciones

Fortalecer políticas públicas: Fomentar programas de subsidios e incentivos que promuevan la adopción de tecnologías avanzadas para la gestión del agua. Favorecer la articulación entre los tomadores de decisiones y los científicos para poder trabajar en conjunto.

- **Ampliar la cobertura tecnológica:** Integrar la plataforma PLAS-ALC en nuevas regiones agrícolas con potencial de riego, para maximizar su impacto.
- **Promover infraestructura digital:** Mejorar la conectividad y la integración de redes IoT,



facilitando un monitoreo eficiente y en tiempo real.

- **Aumentar la investigación aplicada:** Continuar desarrollando herramientas tecnológicas adaptadas a los desafíos climáticos y socioeconómicos de la región.

El proyecto PLAS-ALC representa un avance significativo en la adopción de tecnologías innovadoras para la gestión hídrica, marcando un camino hacia una agricultura más eficiente, sostenible y resiliente en América Latina y el Caribe.

Instituciones participantes



Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



www.fontagro.org

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org