



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

Producto 13: Al menos cuatro pilotos implementados a nivel de finca y otros cuatro a nivel de cuenca.

Claudio Balbontín, Claudia Bavestrello, Britt Wallberg.

2023





Códigos JEL: Q16

ISBN: (Este registro lo realizarán los autores en caso de ser necesario, queda a criterio del líder del proyecto)

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, Claudia Bavestrello y Britt Wallberg.

Copyright © 2022 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:

FONTAGRO

Correo electrónico: FONTAGRO@FONTAGRO.org

www.FONTAGRO.org



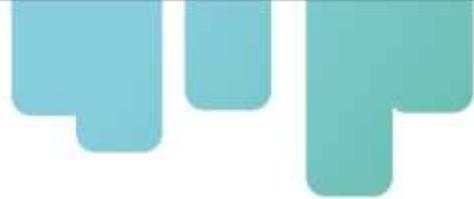
Tabla de Contenidos

Índice.

Resumen	8
Abstract	9
1. Introducción	10
2. Pilotos tecnológicos a escala Predial/Parcela	12
2.1 Validación de nuevas tecnologías en el riego en Chile: Manejo eficiente del riego con información satelital. Claudio Balbontín N., Cornelio Contreras S. INIA Intihuasi.....	12
2.1.1 Piloto tecnológico en Parcela Experimental Pan de Azúcar	12
2.1.2. Piloto tecnológico Vicuña.	17
2.2 Validación nuevas tecnologías en el riego en Argentina: Manejo eficiente del riego con información satelital. Carlos Puertas, Fernando González, Roberto Martínez, Ayelén Montenegro – INTA.	20
2.2.1. Piloto Tecnológico en Junín, Mendoza.	20
2.2.2 Piloto Tecnológico en cultivo de tomates para la industria, San Juan.	24
2.2.3. Validación de nuevas tecnologías para la determinación de las necesidades de riego en cultivo de maíz para la industria. Piloto Río Negro, Patagonia Norte.	27
2.3. Validación nuevas tecnologías en el riego en Colombia: Manejo eficiente del riego con información satelital.....	32
2.3.1 Piloto Tecnológico Distrito de riego Roldanillo, La Unión y Toro RUT.	32
2.3.2. Piloto Tecnológico Centro de investigación Palmira, Agrosavia.....	38
2.4. Validación nuevas tecnologías en el riego en Uruguay: Manejo eficiente del riego con información satelital.....	42
2.4.1 Piloto tecnológico en Parcela Experimental El Junco, Arroyo de Tala.	42
3. Pilotos tecnológicos a escala de Cuenca	46
3.1. Metodología de trabajo en cuenca	47
3.2 Validación de nuevas tecnologías a escala de Cuenca: Balance de agua en el suelo asistido por teledetección.....	51
3.2.1. Validación a escala de cuenca Río Elquí, Chile.....	52
3.2.2. Validación a escala de cuenca Mendoza, Argentina.....	53



3.2.3. Validación a escala de cuenca Juan, Argentina	54
3.2.4. Validación a escala de cuenca Villa Regina, Río Negro, Argentina	55
3.2.5. Validación a escala de cuenca Distrito RUT, Colombia.....	56
3.2.6. Validación a escala de cuenca Arroyo de Tala, Uruguay	57
4. Conclusiones	58
5. Bibliografía	60
Instituciones participantes	64

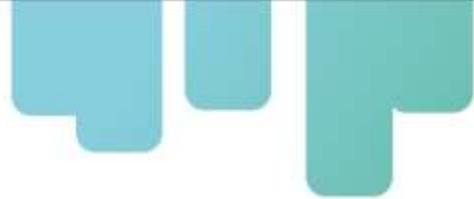


Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación parcela piloto Pan de Azúcar y vista general de los cultivos.	13
Figura 2. Infraestructura para el riego en parcela Pan de Azúcar.....	13
Figura 3. Plataforma telemétrica para el riego (DropControl, Waseconn).....	14
Figura 4. Selección de goteros y evaluación coeficiente de uniformidad y precipitación real del equipo de riego en parcela piloto.	14
Figura 5. Datalogger Zentra, pluviómetro de gotero y caudalímetro utilizados para el monitoreo.	15
Figura 6. Sondas de capacitancia (mod. Teros 10, Decagon Devices) utilizadas para el monitoreo continuo de la humedad en el suelo.	15
Figura 7. Red de estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) en la región de Coquimbo y estación disponible en la parcela piloto.....	16
Figura 8. Cultivos anuales monitoreados para el ajuste del riego de precisión.	16
Figura 9. Ubicación parcela Centro experimental Vicuña y vista general de los cultivos.....	17
Figura 10. Datalogger Zentra, pluviómetro de gotero y caudalímetro utilizados para el monitoreo.....	18
Figura 11. Sondas de capacitancia (mod. Teros 10, Decagon Devices) utilizadas para el monitoreo continuo de la humedad en el suelo.....	18
Figura 12. Cultivos vides monitoreadas para el ajuste del riego de precisión.....	19
Figura 13. Ubicación piloto tecnológico Junín-Mendoza.	21
Figura 14. Resumen hidráulico del avance y receso del agua de riego en el evento evaluado. (WinSRFR v.5.1.1).	22
Figura 15. Estación meteorológica.	22
Figura 16. Monitoreo de cultivo con valores de NDVI para el ciclo 2021-2022.	23
Figura 17. Ubicación piloto tecnológico en el departamento de Pocito, San Juan.	25
Figura 18. Monitoreo de cultivo de tomate con valores de NDVI entre el 01-01-2021 y 21-12-2021.....	27
Figura 19. Ubicación de los valles de Negro Muerto, Guardia Mitre y zona de riego del partido de Patagones.....	28
Figura 20. Colocación de sensores durante el primer año de estudio en el pivot 16.....	29
Figura 21. Cultivo de maíz monitoreado con plataforma PLAS-FONTAGRO.	31
Figura 22. Monitoreo del Kc del cultivo de maíz con la plataforma PLAS-FONTAGRO.	31
Figura 23. Ubicación piloto distrito de riego RUT.	33
Figura 24. Instalación estaciones de humedad del suelo en el sitio experimental.	35
Figura 25. Esquema de red de estaciones de registro instalado en el piloto tecnológico del D.RUT.....	35
Figura 26. Sensor de humedad del suelo.	36
Figura 27. Ubicación cultivos y EMAs. Fuente información cartográfica IGAC-CVC, (2004).	36
Figura 28. Monitoreo al desarrollo del fruto.	37



Figura 29. Ubicación parcela piloto en el C.I. Palmira – AGROSAVIA.	38
Figura 30. Imágenes del equipamiento utilizado en el seguimiento ambiental de la parcela piloto.	39
Figura 31. Equipamiento para seguimiento al crecimiento del fruto.	40
Figura 32. Evaluación de conductancia estomática con porometría.	41
Figura 33. Ubicación parcela piloto “El Junco”.	42
Figura 34. Esquema de la evaluación a campo del avance y receso del agua en las parcelas del piloto tecnológico. Fuente: Bourdin et al., 2015	43
Figura 35. Curvas de tiempos de avance y receso del agua, resultante de la evaluación a campo.	44
Figura 36. Sondas FDR (Decagon) utilizadas para el monitoreo continuo de la humedad en el suelo.	44
Figura 37. Estación meteorológica automática (EMA) en la parcela piloto tecnológico “El Junco”.	45
Figura 38. Cultivos monitoreados para el ajuste del riego de precisión.	45
Figura 39. Esquema conceptual del modelo HidroMORE basado en la teledetección para estimar espacial y temporalmente distribuidas las NIR (Garrido-Rubio, 2021).	48
Figura 40. Modelamiento a escala de cuenca del Valle del Elqui con HidroMORE de la temporada 2018-2019.	52
Figura 41. Modelamiento a escala de cuenca de Mendoza con HidroMORE, temporada 2020-2021.	53
Figura 42. Modelamiento a escala de cuenca de San Juan con HidroMORE, temporada 2020-2021.	54
Figura 43. Modelamiento a escala de cuenca de Río Negro con HidroMORE, temporada 2020-2021, 2021-2022	55
Figura 44. Modelamiento a escala de cuenca del Distrito RUT con HidroMORE, temporada 2019-2020, 2020-2021.	56
Figura 45. Modelamiento a escala de cuenca de Arroyo de Tala con HidroMORE, temporada 2020-2021.	57



Índice de cuadros

Cuadro 1. Resumen de los pilotos tecnológicos a escala predial y de cuenca.	10
Cuadro 2. Dispositivos red de monitoreo.	34
Cuadro 3. Coordenadas red de monitoreo.	34
Cuadro 4. Ubicación EMAs en el Distrito RUT.....	37
Cuadro 5. Ficha técnica cultivo lima ácida C.I. Palmira.	40
Cuadro 6. Superficie total y cultivos principales desarrollados por cuencas de trabajo.	51

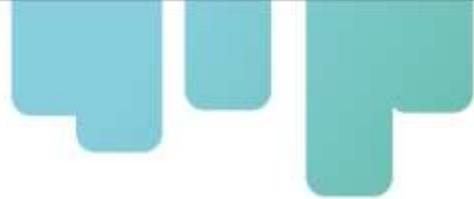


Resumen

El siguiente informe reporta el establecimiento de pilotos tecnológicos establecidos en el marco de la iniciativa **“Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia en la agricultura ALC-2030”**. Donde se implementaron pilotos altamente tecnificados en diferentes cultivos representativos de los países co-ejecutores del proyecto. El objetivo de estos pilotos tecnológicos fue permitirles a los agricultores conocer nuevas herramientas tecnológicas para un manejo adecuado del agua en la agricultura, apostando a mejorar la eficiencia hídrica de sus cultivos. Estos pilotos se implementaron en Chile, Argentina, Colombia y Uruguay.

Los pilotos tecnológicos fueron implementados a escala de parcela (intrapredial) y cuenca (extrapredial). En ambas escalas se determinaron las necesidades hídricas de los cultivos, mediante el uso de nuevas tecnologías, como es el uso de la teledetección mediante el análisis de imágenes satelitales. A escala de parcela, además, se realizaron evaluaciones ecofisiológicas de los cultivos y de los procesos metabólicos primordiales para mantener alta productividad del cultivo. Y a nivel de cuenca las necesidades hídricas se obtuvieron mediante balance hídrico en el suelo, el cual fue modelado por HidroMore.

Palabras Clave: Piloto tecnológico, Parcela, Cuenca, Eficiencia Hídrica, Balance Hídrico



Abstract

The following report presents the establishment of technological pilots within the framework of the "New Technologies for Increased Efficiency in Agriculture ALC-2030" initiative. Highly technified pilots were implemented in different representative crops of the co-implementing countries involved in the project. The objective of these technological pilots was to enable farmers to become familiar with new technological tools for proper water management in agriculture, aiming to enhance the water efficiency of their crops. These pilots were implemented in Chile, Argentina, Colombia, and Uruguay.

The technological pilots were implemented at both the plot (intra-farm) and watershed (extra-farm) scales. At both scales, the water needs of the crops were determined using new technologies, such as satellite image analysis through remote sensing. At the plot scale, eco-physiological evaluations of the crops and the fundamental metabolic processes essential for maintaining high crop productivity were conducted. At the watershed level, water needs were obtained through soil water balance, which was modeled by HidroMore.

Keywords: Technological pilot, Plot, Watershed, Water Efficiency, Water Balance

1. Introducción

Este proyecto ha tenido un alto nivel de esfuerzo en el desarrollo de trabajo práctico en terreno. La implementación de los pilotos tecnológicos en diferentes cultivos de importancia económica para cada país participante, ha requerido un gran esfuerzo y constancia. Actualmente tenemos establecidos 8 pilotos tecnológicos a nivel de parcela, los cuales han tenido un monitoreo constante de diferentes variables para poder validar el uso de las nuevas tecnologías incorporadas. La toma de datos a largo plazo es el mejor ejercicio de validación que podemos obtener para reportar a la comunidad de productores y posteriormente a la comunidad científica.

A nivel de cuenca también hemos establecido pilotos, actualmente estamos evaluando el balance agua con el modelo HidroMore en 5 cuencas distribuidas en los países ejecutores del proyecto.

A continuación, entregamos una tabla resumen de todos los pilotos tecnológicos establecidos:

Cuadro 1. Resumen de los pilotos tecnológicos a escala predial y de cuenca.

No	Nombre de sitio	Observación
1	Piloto tecnológico Estación Experimental Pan de Azúcar, Chile	Parcela piloto con rotaciones de cultivos hortícolas: papas, lechugas, habas, frijol.
2	Piloto tecnológico Estación Experimental Vicuña, Chile	Parcela piloto con cultivo de vides para uva de mesa y uva pisquera
3	Piloto Tecnológico Junín, Mendoza, Argentina	Parcela de vid cv. Moscatel conducido en espaldero, más de 30 años de edad. Sistema de riego superficial dotada de agua de forma discontinuada a través del sistema de turnado de riego.
4	Piloto tecnológico INTA, Asociación Tomate2000, San Juan, Argentina.	Parcela de cultivo de tomates, agricultor particular Asociación Tomate2000, riego tecnificado.
5	Piloto tecnológico INTA Rio Negro, Argentina	Parcela maíz, riego aspersión pivote central.
6	Piloto tecnológico Palmira, Cali, Colombia	Parcela Experimental de Agrosavia, con cultivo de lima ácida Tahití (Citrus latifolia Tanaka)

7	Piloto tecnológico Distrito RUT, Colombia	Parcela experimental con cultivos representativos en el norte del Valle. (Aguacate (<i>Persea americana</i>), cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.), caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>), guanábana (<i>Annona muricata</i>), guayaba (<i>Psidium guajaba</i>), lima ácida Tahití (<i>Citrus latifolia</i> Tanaka), maíz (<i>Zea mays</i>), maracuyá (<i>Passiflora edulis</i> f. <i>Flavicarpa</i>), papaya (<i>Carica papaya</i>) y vid (<i>Vitis vinifera</i>).
8	Piloto Tecnológico Arroyo de Tala, El Junco, Uruguay	Pasturas permanentes, sembradas en 2009, con pastoreo de ganado de forma directa. El sistema de riego es por gravedad; son melgas de 9 m de ancho y 50m de largo. El caudal de diseño es de 0.7 l/s/m de ancho de faja. La lámina bruta promedio aplicada es 60 mm con una eficiencia de aplicación mayor al 75%.
9	Cuenca Rio Elqui	Zona de riego, provincia del Elqui, administrada por la Junta de Vigilancia del Rio Elqui
10	Subcuenca del río Tunuyan inferior	Zona de riego, provincia de Mendoza, administrada por el Departamento General de Irrigación DGI
11	Cuenca Villa Regina	Zona de riego, provincia de Rio Negro.
12	Cuenca Sarmiento	Zona de riego, provincia de San Juan.
13	Distrito RUT	Valle del Cauca, Colombia
14	Arroyo del Tala	Salto, Uruguay.

2. Pilotos tecnológicos a escala Predial/Parcela

2.1 Validación de nuevas tecnologías en el riego en Chile: Manejo eficiente del riego con información satelital. Claudio Balbontín N., Cornelio Contreras S. INIA Intihuasi.

2.1.1 Piloto tecnológico en Parcela Experimental Pan de Azúcar



Área de estudio

El piloto tecnológico de riego se implementó en la Parcela Experimental Pan de Azúcar (PEPA) de INIA Chile, ubicada en el Km 21 de la Ruta D-43 Coquimbo - Ovalle, sector de Cerrillos en la localidad de Pan de Azúcar, Coquimbo. Debido al clima dominante, con baja demanda ambiental, la parcela se encuentra enclavada en un entorno agrícola orientado principalmente a la producción de cultivos hortícolas y en menor medida cítricos y olivos.

Esta parcela tiene una superficie de 7 ha cultivables, en las cuales se realizan rotaciones de cultivos hortícolas y cultivos frutales estables. El suministro de agua de riego para la parcela se realiza por medio de un sistema de canales superficiales abiertos (Canal Bellavista), administrados por la Junta de Vigilancia del Río Elqui, donde se cuenta con 4 acciones. Para la acumulación de agua de riego, la parcela tiene un acumulador con capacidad para 5.000 m³, el cual es fundamental para aportar el riego en correcta oportunidad, dado el régimen de turnado de las entregas de agua.



Figura 1. Ubicación parcela piloto Pan de Azúcar y vista general de los cultivos.

El sistema de distribución de agua a los cultivos se realiza por medio de tuberías enterradas y sistemas de hidrantes controlados por electroválvulas y laterales para el sistema de riego localizado generalmente por medio de cintas con goteros, práctica muy común entre los agricultores de la región.



Figura 2. Infraestructura para el riego en parcela Pan de Azúcar.

Adicionalmente, la parcela piloto cuenta con un sistema de control telemétrico *on line* (Plataforma web DropControl), el cual permite programar la apertura de válvulas en diversos horarios y el registro automáticos de los aportes de riego (Figura 3).



Figura 3. Plataforma telemétrica para el riego (DropControl, Waseconn).

Monitoreo Riego.

Este nivel de control es fundamental para que los cálculos teóricos de riego se traduzcan en aportes precisos de riego. Para esto, en primer lugar, se evalúa el desempeño del equipo de riego a través del cálculo de coeficiente de uniformidad (CU) y la precipitación efectiva del equipo de riego. El protocolo utilizado es la selección en cada sector o subsector de riego de 4 laterales de riego equidistantes entre sí (para sectores de superficies muy grandes se recomienda la medición de 6 laterales) y de cada lateral se seleccionan 4 emisores, uno en cada extremo del lateral y dos intermedios (Figura 4). En los emisores seleccionados se recibe la descarga de agua en un periodo de tiempo definido.



Figura 4. Selección de goteros y evaluación coeficiente de uniformidad y precipitación real del equipo de riego en parcela piloto.

Con el objetivo de monitorear la descarga de riego, durante todo el periodo de desarrollo de los cultivos se utilizan caudalímetros y pluviómetros de gotero, conectados a registradores automáticos (dataloggers) lo cual permite llevar un registro continuo de los instantes y los aportes de riego entregados. La Figura 5 **Error! Reference source not found.** señala los equipos utilizados en esta tarea.



Figura 5. Datalogger Zentra, pluviómetro de gotero y caudalímetro utilizados para el monitoreo.

Para el monitoreo de la disponibilidad hídrica en el suelo (balance hídrico), los instantes y profundidades de los riegos aportados, se utilizaron sondas de capacitancia enterradas, también conectadas a registradores automáticos. La información obtenida de esta manera corresponde al contenido volumétrico de humedad en el suelo (%/%).



Figura 6. Sondas de capacitancia (mod. Teros 10, Decagon Devices) utilizadas para el monitoreo continuo de la humedad en el suelo.

Monitoreo meteorológico

Finalmente, y para completar la ecuación del cálculo del consumo hídrico o evapotranspiración de cultivo (ETc) se debe considerar la demanda ambiental de la parcela. Para esto se utiliza el parámetro **evapotranspiración de referencia (ETo)**, el cual se estima a partir de variables meteorológicas registradas por una estación agrometeorológica automática (EMA). En este piloto la estación agrometeorológica, así como muchas otras a lo largo del país, pertenecen a la red de estaciones agrometeorológicas de INIA Chile (RAN), con información disponible en el sitio web agrometeorologia.cl.

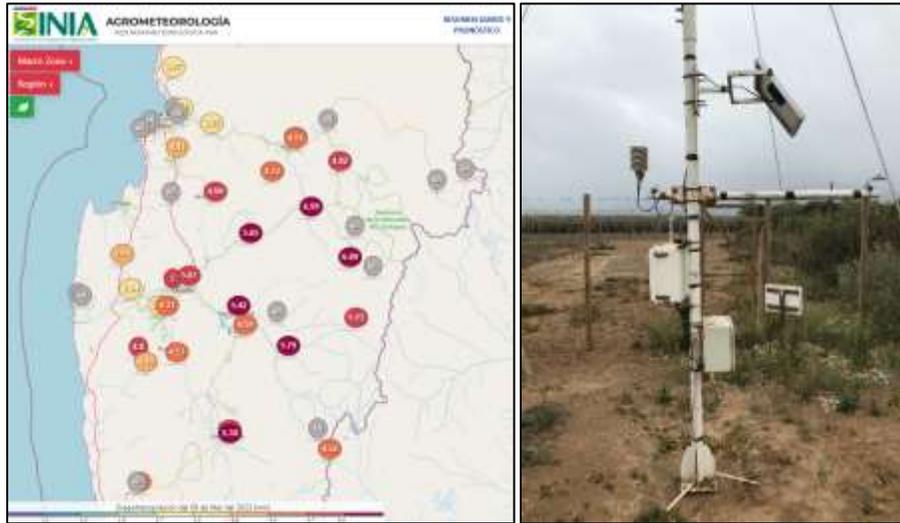


Figura 7. Red de estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) en la región de Coquimbo y estación disponible en la parcela piloto.

Cultivos monitoreados

Durante el periodo analizado se han monitoreado y asesorado en el aporte preciso de riego (siguiendo la metodología comentada anteriormente) diversos cultivos, que tradicionalmente se cultiva en la zona de la parcela piloto. Entre estos, se cuenta con el cultivo de papas, lechugas, habas y porotos (Figura 8 **Error! Reference source not found.**).



Figura 8. Cultivos anuales monitoreados para el ajuste del riego de precisión.

2.1.2. Piloto tecnológico Vicuña.



Área de estudio

El piloto tecnológico de riego se implementó en el Centro Experimental Vicuña, Valle del Elqui de INIA Chile, ubicado en Camino a Peralillo s/n, Vicuña, Coquimbo. El centro enfoca su quehacer en la investigación, transferencia tecnológica y producción en uno de los principales cultivos de la región como lo es la vid. Cuenta con una superficie de alrededor de 30 hectáreas de este cultivo, donde se pueden encontrar variedades de uva de mesa, de uva pisquera y variedades para la elaboración de vinos y pasas.



Figura 9. Ubicación parcela Centro experimental Vicuña y vista general de los cultivos.

El sistema de distribución de agua a los cultivos se realiza por medio de tuberías enterradas y sistemas de hidrantes controlados por electroválvulas y laterales para el sistema de riego localizado generalmente por medio de cintas con goteros, práctica muy común entre los agricultores de la región.

Con el objetivo de monitorear la descarga de riego, durante todo el periodo de desarrollo de los cultivos se utilizan caudalímetros y pluviómetros de gotero, conectados a registradores automáticos (dataloggers) lo cual permite llevar un registro continuo de los instantes y los aportes de riego entregados. La señala los equipos utilizados en esta tarea (Figura 10).



Figura 10. Datalogger Zentra, pluviómetro de gotero y caudalímetro utilizados para el monitoreo.

Para el monitoreo de la disponibilidad hídrica en el suelo (balance hídrico), los instantes y profundidades de los riegos aportados, se utilizaron sondas de capacitancia enterradas, también conectadas a registradores automáticos (Figura 11). La información obtenida de esta manera corresponde al contenido volumétrico de humedad en el suelo (%/%).



Figura 11. Sondas de capacitancia (mod. Teros 10, Decagon Devices) utilizadas para el monitoreo continuo de la humedad en el suelo.

Monitoreo meteorológico

Finalmente, para completar la ecuación del cálculo del consumo hídrico o evapotranspiración de cultivo (ETc) se debe considerar la demanda ambiental de la parcela. Para esto se utiliza el parámetro **evapotranspiración de referencia (ETo)**, el cual se estima a partir de variables meteorológicas registradas por una estación agrometeorológica automática (EMA). En este piloto la estación agrometeorológica, así como muchas otras a lo largo del país, pertenecen a la red de estaciones agrometeorológicas de INIA Chile (RAN), con información disponible en el sitio web agrometeorologia.cl.

Cultivos monitoreados

Durante el periodo analizado se han monitoreado y asesorado en el aporte preciso de riego (siguiendo la metodología comentada anteriormente) en cultivos de vides, que tradicionalmente se cultiva en la zona de la parcela piloto.



Figura 12. Cultivos vides monitoreadas para el ajuste del riego de precisión.

2.2 Validación nuevas tecnologías en el riego en Argentina: Manejo eficiente del riego con información satelital. Carlos Puertas, Fernando González, Roberto Martínez, Ayelén Montenegro – INTA.

2.2.1. Piloto Tecnológico en Junín, Mendoza.



Área de estudio.

El sitio de estudio fue una propiedad de vid cv. Moscatel de más de 30 años de edad ubicado en el departamento de Junín, Mendoza, Argentina (33°8'28,04" S; 68°29'11,85" O) (Figura 13).



Figura 13. Ubicación piloto tecnológico Junín-Mendoza.

Monitoreo del riego

Para determinar el desempeño de riego se realizó una medición en la parcela de distintas variables al momento de la ocurrencia de un evento de riego (Figura 14). Estas variables comprenden datos del cultivo (largo de hileras y distancia entre ellas), datos del suelo (pendiente, tasa de infiltración, humedad presenta pre y post riego) y del riego (caudal, tiempo de aplicación, tiempo de avance y receso de agua en la hilera). A partir de los datos obtenidos se utilizó el software de simulación WinSRFR (v 5.1.1) con el cual se obtuvieron los valores de eficiencia de aplicación, de la uniformidad de distribución y percolación profunda. A partir de este análisis se determinó que la lámina de aplicación media de agua en cada evento de riego era de 62 mm.

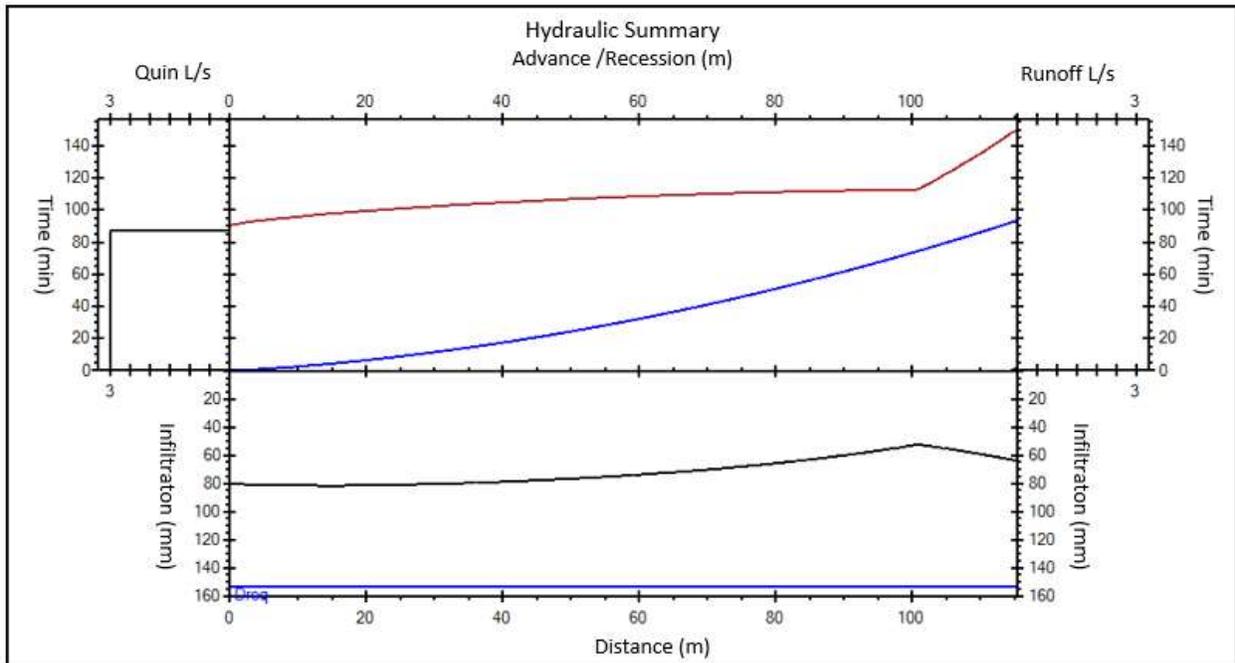


Figura 14. Resumen hidráulico del avance y receso del agua de riego en el evento evaluado. (WinSRFR v.5.1.1).

Monitoreo meteorológico

Los datos meteorológicos para la temporada de estudio se obtuvieron a partir de una estación ubicada a 3 km de la parcela bajo estudio perteneciente a la Dirección de Contingencias Climáticas Del Gobierno de la provincia de Mendoza.



Figura 15. Estación meteorológica.

Cultivos monitoreados

A partir de los valores del índice de vegetación satelital NDVI, disponible en la Plataforma PLAS FONTAGRO, se estimaron los valores de Kcb a partir de la fórmula propuesta por Campos et al. (2010) como se detalló anteriormente.

La Figura 16 **Error! Reference source not found.** muestra la evolución temporal del desarrollo del cultivo de vid cv. Moscatel rosado conducido en espaldero bajo. La cantidad de imágenes satelitales disponibles en la plataforma permitió describir sin problemas las diferentes fases de desarrollo vegetativo del cultivo.

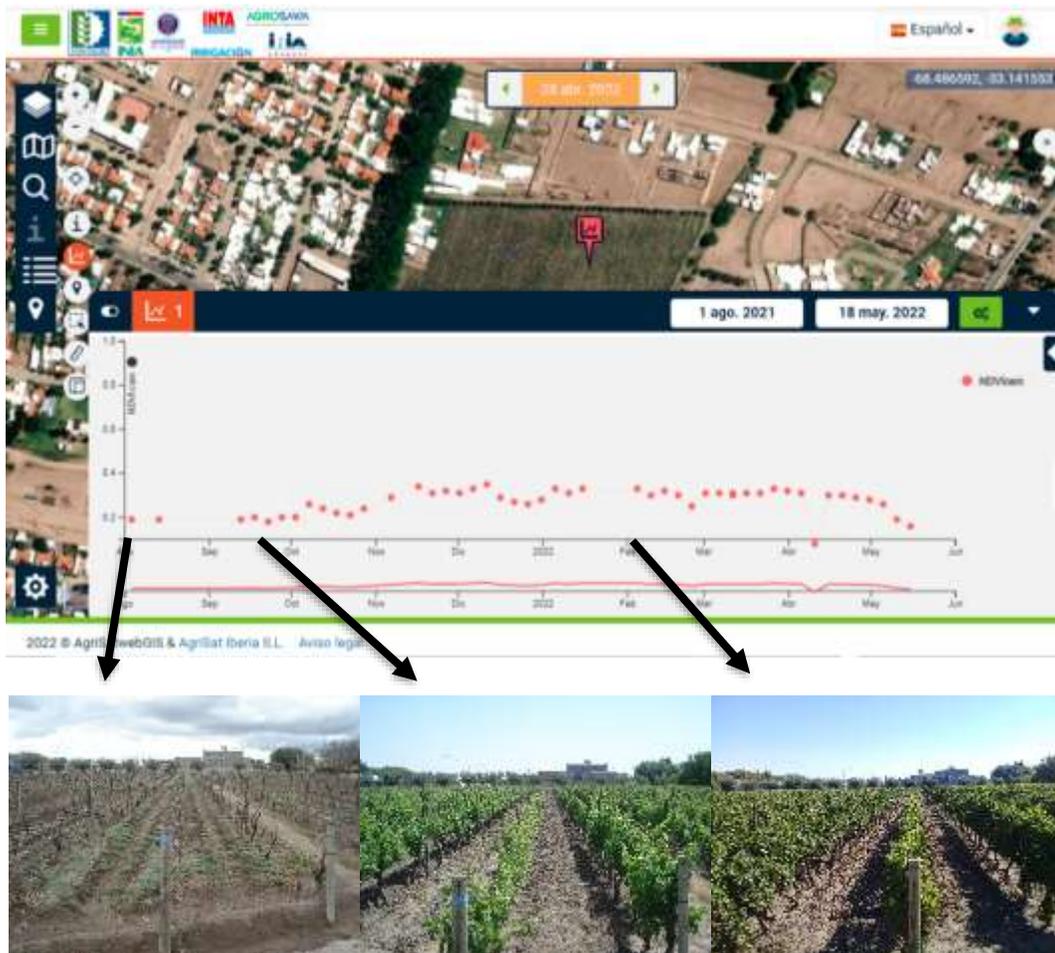


Figura 16. Monitoreo de cultivo con valores de NDVI para el ciclo 2021-2022.

2.2.2 Piloto Tecnológico en cultivo de tomates para la industria, San Juan.



Área de estudio.

La parcela piloto se encuentra en el departamento Pocito, en el suroeste de la provincia de San Juan (Figura 17).



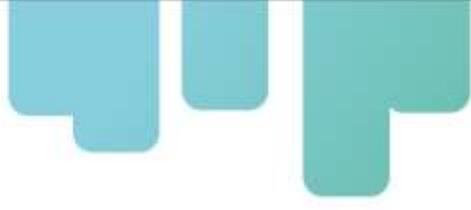
Figura 17. Ubicación piloto tecnológico en el departamento de Pocito, San Juan.

Monitoreo del riego

Para el monitoreo, se realizó una evaluación de la uniformidad de distribución del riego según la metodología Merriam-Keller simplificada. Para esto se seleccionó la operación de riego más desfavorable (condiciones hidráulicas críticas) y dentro de ésta una subunidad representativa. Se instaló un contador volumétrico al inicio del primer lateral de la subunidad, para medir cantidad de agua aplicada al cultivo (etapa fenológica y ciclo total).

A nivel de parcela se evaluó la uniformidad de distribución del equipo de riego según Merriam-Keller simplificado, se seleccionó la operación de riego más desfavorable (condiciones hidráulicas críticas) y dentro de ésta una subunidad representativa, se instaló un contador volumétrico, se describió el perfil de suelo (hasta la profundidad de 1 m) y finalmente, se determinó rendimiento (kg/ha).

Además, en el momento de la cosecha y sobre tres sectores de la subunidad evaluada (cabecera, medio y pie), se determinaron parámetros de calidad de frutos: calibre, concentración de sólido



solubles, prueba de rajado, pH, peso de 50 frutos.

Monitoreo meteorológico

Como se menciona en las parcelas piloto anteriores, para completar la ecuación del cálculo del consumo hídrico o evapotranspiración de cultivo (ETc) se debe considerar la demanda ambiental de la parcela. Para esto se utiliza el parámetro **evapotranspiración de referencia (ET_o)**, el cual se estima a partir de variables meteorológicas registradas por una estación agrometeorológica automática (EMA).

Cultivos monitoreados.

Se realizó el monitoreo en conjunto de la producción de tomate para industria comparando dos parcelas regadas por goteo, una “testigo” con manejo tradicional del riego con otra “control” donde se incorporarán actividades del marco conceptual de agricultura de precisión definidas en el proyecto.

Estos trabajos corresponden al análisis de las necesidades de riego del cultivo de tomate, utilizando para esto la expresión vegetativa indicada por medio del índice NDVI, proporcionado por imágenes satelitales de alta resolución y frecuencia (Sentinel) disponibles en la Plataforma PLAS-FONTAGRO. Esta información se complementa con el monitoreo de la demanda ambiental para definir las láminas de riego a reponer, el contenido de humedad en el suelo y los volúmenes y tiempos de riego.

El monitoreo desarrollo del cultivo se realizó con el uso del índice de vegetación NDVI disponible en la plataforma PLAS, con el objetivo de establecer los valores de coeficiente de cultivo basal para las condiciones reales del predio, como ejemplo presentamos la Figura 18.



Figura 18. Monitoreo de cultivo de tomate con valores de NDVI entre el 01-01-2021 y 21-12-2021.

2.2.3. Validación de nuevas tecnologías para la determinación de las necesidades de riego en cultivo de maíz para la industria. Piloto Río Negro, Patagonia Norte.



Área de estudio

El ensayo se ubica en valles templados de norpatagonia, en la cuenca del Río Negro, ubicada sobre la margen norte del río Negro en el Partido de Patagones, provincia de Buenos Aires, sobre un lote con cultivo de maíz regado por pivote central.

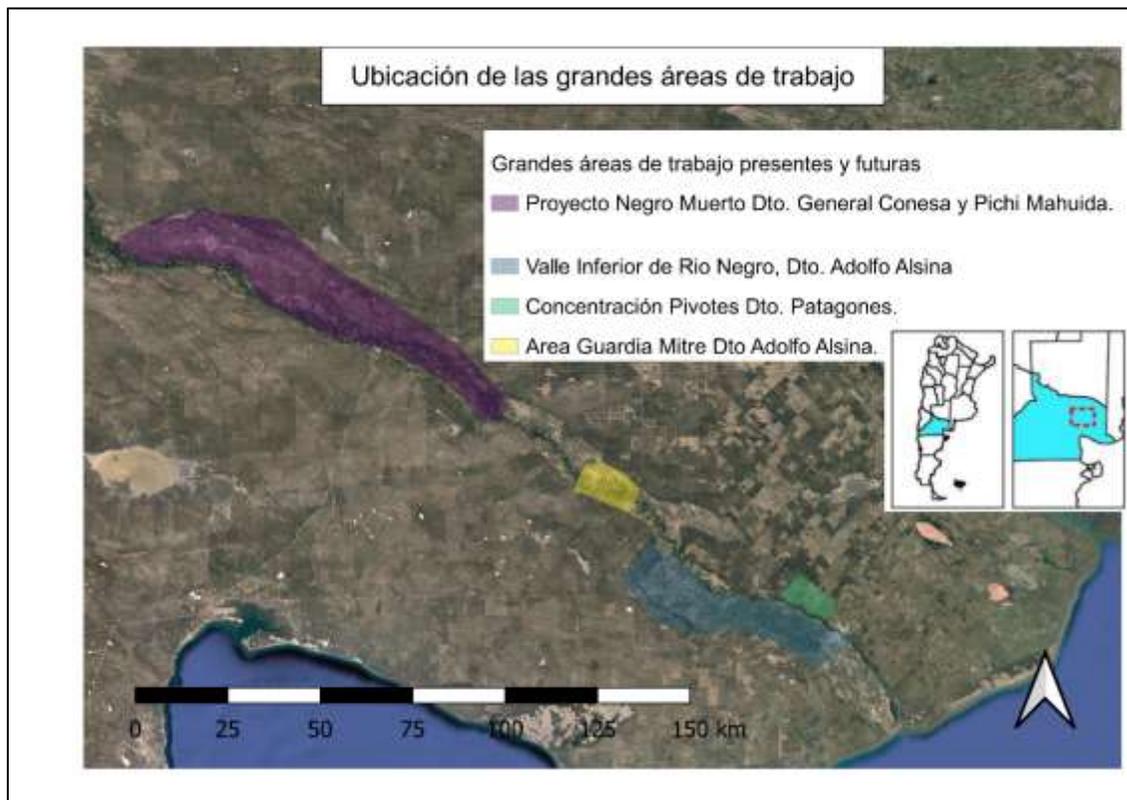


Figura 19. Ubicación de los valles de Negro Muerto, Guardia Mitre y zona de riego del partido de Patagones.

La zona de estudio que se proyecta contiene los valles de Negro Muerto, Guardia Mitre y la zona regable próxima al río Negro en el partido de Patagones.

La superficie regada que cuenta con sistemas de riego de pivote central es próxima a las 7000 hectáreas. Los cultivos son de alto requerimiento hídrico, como el maíz, pasturas, soja, verdes, trigo, cebolla.

Monitoreo del riego

El trabajo se ha realizado en el monitoreo de los riegos aplicados sobre un pivot en particular, la determinación de las necesidades del cultivo de maíz mediante datos obtenidos con la plataforma PLAS FONTAGRO, la estación meteorológica local y el cálculo de k_c a través del NDVI obtenido con la plataforma Google Earth Engine (GEE).

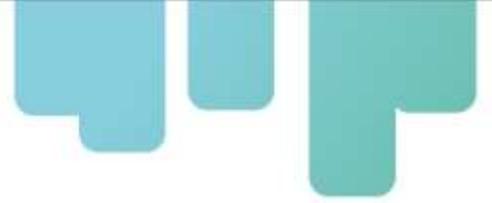
También se añadieron los índices de Humedad de Diferencia Normalizada y el índice de estrés hídrico (NMDI y MSI por sus siglas en inglés) para realizar un monitoreo espacial de la humedad del pivot, en relación a las lluvias y los riegos registrados. Estos datos fueron comparados con un seguimiento de la humedad del suelo a distintas profundidades de manera de relacionar el manejo, con la evapotranspiración del cultivo y la dinámica del agua en el suelo.

Es importante destacar que no existió en los dos años un manejo específico del riego o diferencial, por lo tanto, se monitoreó el manejo por parte del establecimiento y se comparó con el manejo que hubiera sido recomendado (Figura 20).



Figura 20. Colocación de sensores durante el primer año de estudio en el pivot 16.

Con respecto al trabajo a través de GEE (<https://code.earthengine.google.com/>), es importante destacar que es una plataforma en línea que permite explorar, analizar y visualizar información geoespacial. Con GEE podemos acceder a una gran cantidad de datos satelitales y geográficos, y realizar análisis avanzados sin necesidad de descargar o procesar gran cantidad de información en la computadora, ya que trabaja en línea. El protocolo utilizado para GEE en la obtención del índice NDVI y su análisis en la temporada 2020-2021, para luego analizar datos de las subsiguientes temporadas, es el siguiente: 1) se detalla el periodo de interés para la colección de imágenes Sentinel: En GEE, las colecciones de imágenes contienen datos recopilados por satélites a lo largo del tiempo, para concentrar un período específico, se ajustó la colección de imágenes Sentinel para el intervalo en particular 15/10/2020 – 21/04/2021; 2) se establece un filtro de nube con 20% y con 5%: Cuando se trabajan con imágenes satelitales ópticas, es común que las nubes obstruyan la vista de la Tierra. Se probaron dos filtros para comparar resultados, excluyendo



imágenes con más del 20% de su área cubierta por nubes y con más del 5% de cobertura de nubes. Esto aseguró que las imágenes que utilizaras estuvieran relativamente libres de nubosidad, mejorando la calidad del análisis; 3) Se establece un filtro de efecto borde: Al procesar imágenes, es importante considerar el efecto de los bordes, donde la calidad puede disminuir debido a la forma en que los sensores capturan la información. Al utilizar el filtro de efecto de borde, de ser necesario se incluye para eliminar los píxeles en los bordes de las imágenes que podrían no ser tan confiables o relevantes para tu análisis, ayudando a mantener una calidad consistente en todo el conjunto de datos; 4) Cálculo de Índices espectrales: Se realizaron scripts en GEE para el cálculo del NDVI, NDMI y MSI para el período analizado. El NDMI y MSI utilizan las bandas SWIR y NIR, ambas están asociadas al contenido de agua de las plantas y el suelo. El primero es un cociente de suma algebraica de las bandas. Adopta valores de entre -1 y 1, siendo un potente indicador del estrés hídrico. Los valores negativos que se acercan a -1 indican la falta de agua, mientras que valores de 1 se asocian al anegamiento. Por lo tanto, cada valor intermedio corresponderá a una situación agronómica ligeramente diferente. El MSI se calcula como el cociente entre la banda SWIR y la NIR, adopta valores que van desde cero en adelante. Cuando dicho valor es ms alto indica falta de agua. El NDVI se calculó utilizando la diferencia entre la reflectividad del infrarrojo cercano (NIR) y la reflectividad del rojo (Red) en una imagen satelital o aérea. Y el valor de Kc se obtuvo a partir del mismo NDVI ($Kc = 1.25 \cdot NDVI + 0.1$) según Calera *et al.*, 2014; 5) Resultados de salida expresados como valores promedio en el área de interés: después de aplicar los filtros y preparar las imágenes, se calcula el valor promedio de los píxeles en un área específica. Esto puede ser útil para identificar tendencias y patrones en los datos. Para la elaboración de los mapas se trabajó desde QGIS para optar por diferentes visualizaciones y análisis espaciales, luego de exportar el archivo en formato GeoTIFF del ráster de cada índice en GEE.

Los mapas obtenidos son herramientas de análisis para supervisar globalmente y en detalle (píxeles de 8-10 m) el cultivo y las condiciones de crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Monitoreo meteorológico

Como se menciona en las parcelas piloto anteriores, para completar la ecuación del cálculo del consumo hídrico o evapotranspiración de cultivo (ET_c) se debe considerar la demanda ambiental de la parcela. Para esto se utiliza el parámetro **evapotranspiración de referencia (ET_o)**, el cual se estima a partir de variables meteorológicas registradas por una estación agrometeorológica automática (EMA).

Cultivos monitoreados.

El cultivo monitoreado es maíz y se ha realizado el seguimiento de acuerdo a la metodología antes descrita con la plataforma PLAS-FONTAGRO. En la figura 36 se observa una imagen del pivot que riega maíz obtenida con la plataforma. En la figura 37 se observa el seguimiento del cálculo del Kc con las herramientas tecnológicas planteadas en el marco teórico.



Figura 21. Cultivo de maíz monitoreado con plataforma PLAS-FONTAGRO.

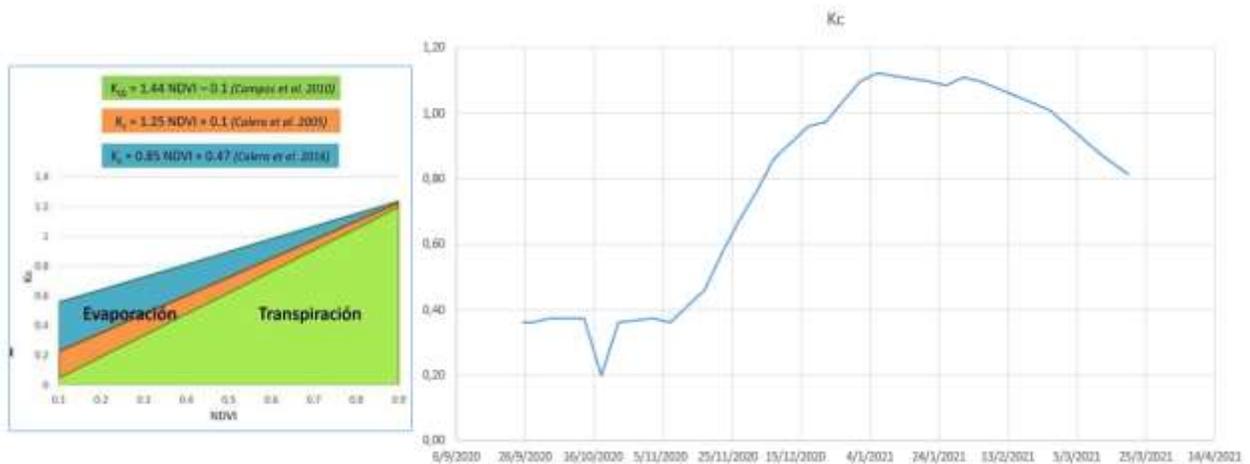


Figura 22. Monitoreo del Kc del cultivo de maíz con la plataforma PLAS-FONTAGRO.



2.3. Validación nuevas tecnologías en el riego en Colombia: Manejo eficiente del riego con información satelital.

2.3.1 Piloto Tecnológico Distrito de riego Roldanillo, La Unión y Toro RUT.



Área de estudio

El distrito de riego RUT – D.RUT, se ubica al norte del departamento del Valle del Cauca y ocupa la zona plana, delimitada entre la cordillera Occidental y el río Cauca, de los municipios Roldanillo, La Unión y Toro (Figura 23). La principal fuente hídrica del D. RUT es el río Cauca, más comparte el abastecimiento de la demanda hídrica agrícola, pecuaria y doméstica, con el acuífero del sector norte del departamento del Valle del Cauca.



Figura 23. Ubicación piloto distrito de riego RUT.

Monitoreo riego.

Tal como se indicó, el piloto del distrito de riego RUT, se desarrolla sobre 10 cultivos: aguacate, cacao, caña de azúcar, guanábana, guayaba, lima ácida Tahití, maíz, maracuyá, papaya y Vid. Para cada cultivo se seleccionó una finca representativa y dentro de un marco de influencia para la comunicación en red. Una red de monitoreo de la humedad del suelo fue ubicada alrededor del centro administrativo del distrito de riego RUT, donde se ubicó el nodo coordinador de la red. Dentro de la red hay diferentes dispositivos que capturan, almacenan y transmiten la información hasta un servidor donde la información está siempre disponible para los usuarios. En cada finca (cultivo priorizado) se instaló una estación con dos sensores capacitivos y un data logger (almacenador de datos) para medir y transmitir la humedad del suelo en tiempo real. Los equipos son custodiados por los productores y el equipo de la asociación de usuarios del distrito de riego RUT - ASORUT. El Cuadro 2 se relaciona el detalle de los componentes de la red y en el Cuadro 3 las coordenadas de los 10 nodos de suelo o estaciones en finca.

Cuadro 2. Dispositivos red de monitoreo.

Cantidad	Elemento	Función
1	Nodo coordinador de red	Recibe y almacena los datos provenientes de los sensores en los ensayos. Incluye sistema de almacenamiento local (datalogger), sistema de carga solar, sistema de comunicación en red local, sistema de comunicación GSM y estructura de soporte 10 metros con pararrayos.
5	Nodo repetidor	Repite la señal hasta el nodo coordinador donde se necesita la información. Incluye sistema de carga solar, sistema de comunicación en red local y estructura de soporte de 6m
10	Nodo de suelo	Cada nodo se ubica en un sitio de cultivo (uno por finca). Almacena y transmite los datos tomados por dos sensores capacitivos de humedad. Incluye sistema de almacenamiento local (datalogger) como respaldo de la información, sistema de carga solar, sistema de comunicación en red local.
20	Sensores de humedad	Captura el dato de humedad del suelo en el sitio de las raíces. Se instalan dos por cada nodo de suelo

Cuadro 3. Coordenadas red de monitoreo.

Código	Cultivo	Coordenadas geográficas		
		N	W	Altitud
1D378	Cacao	04°31'25,1"	076°04'43,2"	933
5A233	Maracuyá	04°31'18,8"	076°05'02,1"	898
2D942	Lima ácida Tahití	04°31'49,8"	076°03'00,3"	929
4A114	Guanábana	04°31'52,3"	076°02'45,4"	929
2D872	Vid	04°31'49,5"	076°04'40,0"	929
3A019	Guayaba	04°33'2,78"	076°04'4,82"	887
3A002	Maíz	04°32'20,5"	076°04'31,0"	936
1D363	Caña	04°30'50,4"	076°04'24,9"	924
4A074	Aguacate	04°31'20,2"	076°04'38,5"	931
4A072	Papaya	04°32'43,5"	076°03'42,4"	915
ASORUT	Nodo coordinador	04°31'52,6"	076°03'44,0"	923

La red de monitoreo fue instalada en junio 2021. En la Figura 24 se pueden observar detalles gráficos de la instalación de las torres de los nodos de humedad del suelo y en la Figura 25, un esquema de la red. En cada sitio, junto a la antena transmisora (nodo de humedad del suelo) se instalaron dos sensores de humedad del suelo tipo capacitancia (Figura 26 **Error! Reference source not found.**) a una profundidad respectiva a cada cultivo. El registro de la humedad y

transferencia de los datos se programó con un paso de 20 minutos. En el cuadro 11 se reportan las profundidades de los sensores.



Figura 24. Instalación estaciones de humedad del suelo en el sitio experimental.

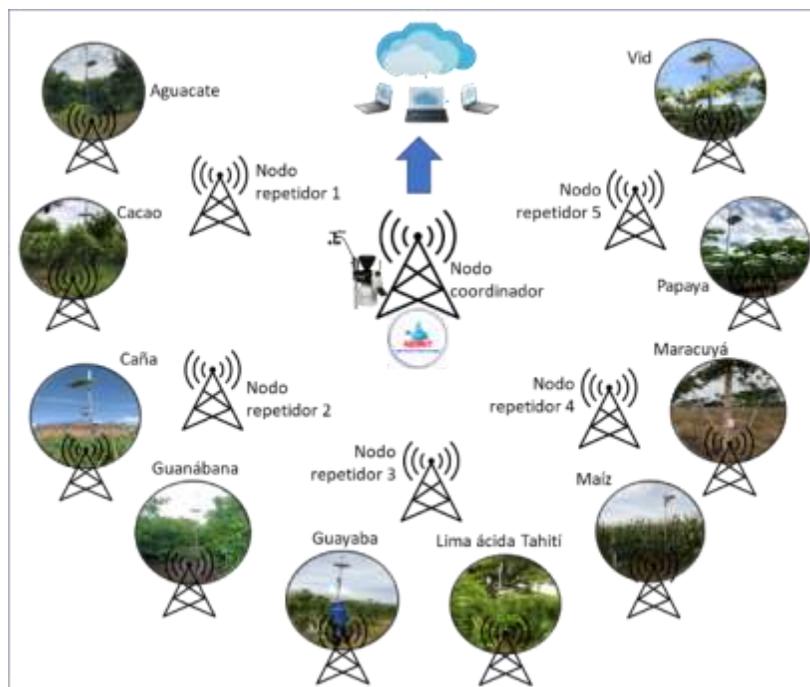


Figura 25. Esquema de red de estaciones de registro instalado en el piloto tecnológico del D.RUT.



Figura 26. Sensor de humedad del suelo.

Monitoreo meteorológico.

Dentro del D. RUT, se encuentran tres estaciones meteorológicas automáticas (EMA), con una mayor influencia para el sector experimental, de la estación del centro administrativo ASORUT (Figura 27). Las variables entregadas por la EMAs, tienen una frecuencia diaria/horaria, miden la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%), precipitación (mm), radiación solar ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), Velocidad del viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). En el Cuadro 4 se relaciona la ubicación de las EMAs.

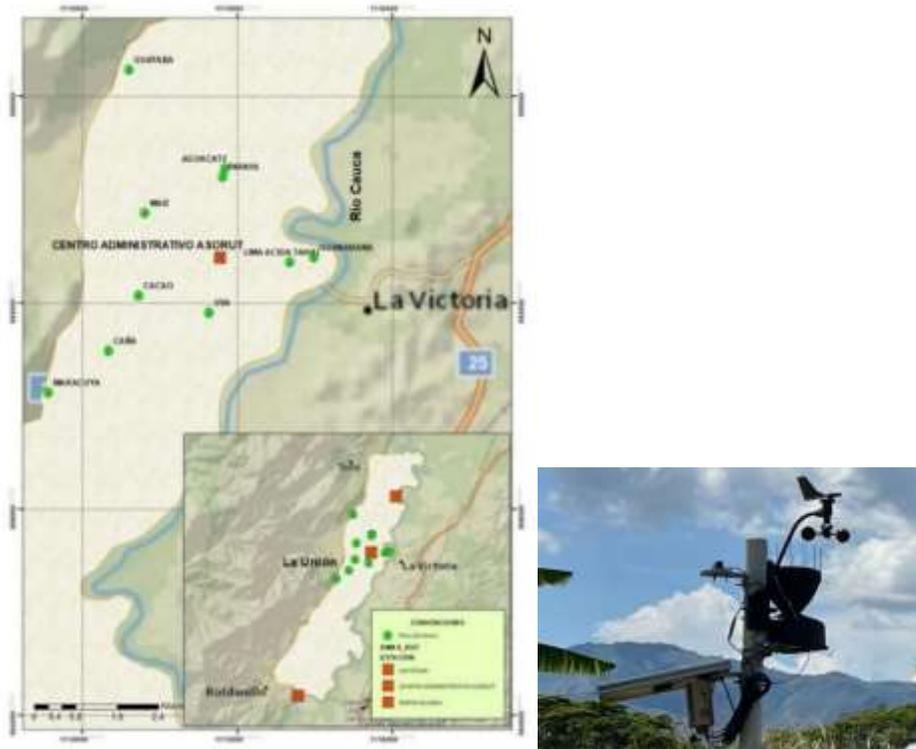


Figura 27. Ubicación cultivos y EMAs. Fuente información cartográfica IGAC-CVC, (2004).

Cuadro 4. Ubicación EMAs en el Distrito RUT

Sitio	Ubicación
Estación de bombeo La Cayetana	N 04°34'48.3" W 076°02'25.9", 884 msnm
Estación de bombeo Tierra Blanca	N 04°24'19.5" W 076°07'33.7", 942 msnm
Centro Administrativo ASORUT	N 04°31'52.6" W 076°03'44.0", 928 m.s.n.m

Cultivos monitoreados.

Para el caso del piloto del D.RUT, además del seguimiento de climático y de humedad del suelo, se hace monitoreo al desarrollo del fruto de forma manual, utilizando un calibrador electrónico marca Mitutoyo® (Figura 28). Esta medición se hace con regularidad semanal, partiendo de fruto cuajado. Se cuantifica además la duración del ciclo productivo. Para el caso de los árboles frutales se hace seguimiento a 6 árboles (aguacate, cacao, guayaba, guanábana, lima ácida Tahití, papaya); para vides se monitorean 80 racimos; en maracuyá 400 frutos y para el caso de maíz y caña se monitorean 10 surcos de cultivo, con un tamaño de muestra de 3 metros en cada surco. El rendimiento en $t \cdot ha^{-1}$, ha sido cuantificado para cada huerto completo y de acuerdo con la duración del período de fructificación.



Figura 28. Monitoreo al desarrollo del fruto.

2.3.2. Piloto Tecnológico Centro de investigación Palmira, Agrosavia.

Área de estudio.

Este piloto se encuentra en el Centro de investigación de La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia (3.515784N, -76.310642W, altitud 1001 msnm), en la ciudad de Palmira, Valle del Cauca. El clima en la localidad es bosque seco tropical, de acuerdo al sistema de clasificación bioclimática Holdridge (Guerra, Grajales y Ríos-Rojas, 2013). La condición ambiental media reporta una temperatura de 24°C, precipitación anual 1.032 mm, humedad relativa de 72%, brillo solar de 5,8 horas*día⁻¹ y velocidad del viento 1,5 m*s⁻¹. En la Figura 29 se presenta la ubicación de la parcela piloto.



Figura 29. Ubicación parcela piloto en el C.I. Palmira – AGROSAVIA.

Monitoreo riego.

En el sitio del cultivo se instalaron dos sensores de humedad tipo capacitancia, acoplados a una estación meteorológica automática – EMA, ubicada al interior de la parcela experimental (Figura 30). La estación entrega información con un paso de 20 minutos.



Figura 30. Imágenes del equipamiento utilizado en el seguimiento ambiental de la parcela piloto.

Monitoreo meteorológico

Como se menciona en las parcelas piloto anteriores, para completar la ecuación del cálculo del consumo hídrico o evapotranspiración de cultivo (ETc) se debe considerar la demanda ambiental de la parcela. Para esto se utiliza el parámetro **evapotranspiración de referencia (ETo)**, el cual se estima a partir de variables meteorológicas registradas por una estación agrometeorológica automática (EMA).

Cultivos monitoreados.

El piloto se ha instalado en un cultivo de lima ácida Tahití (Citrus latifolia Tanaka) injertado sobre Citrumello CPB 4475 (Citrus paradisi 'pomelo Duncan' x Poncirus trifoliata) y limón Volkameriano (Citrus Volkameriana). Está ubicado en el lote 31 (según nomenclatura Agrosavia), en las coordenadas 3.512796N, -76.312071W, del centro de investigación Palmira – AGROSAVIA. El estado actual del uso del agua por el cultivo de lima ácida Tahití en la parcela piloto, así como las características del cultivo se detallan en el

Cuadro 5.

Cuadro 5. Ficha técnica cultivo lima ácida C.I. Palmira.

Variable	Dimensión
Variedad	Lima ácida Tahití
Patrón	CBP (50%); Volkameriano(50%)
Fecha de plantación	2017
Edad cultivo	5,5 años
Área	3.150 m ²
No árboles	180
Distancia plantación	5 m x 3,5 m
Tipo riego	Goteo
Nº emisores / árbol	8
Caudal emisor	4 L*h ⁻¹
Frecuencia riego	1,5 días
Período riego	1-1,5horas
Q. aplicado/riego/árbol	48 L*riego ⁻¹
Rendimiento (ton/ha año)	22,8 (Volkameriano), 20,6 (CPB)
Prof. Raíces	0,4 m
Textura suelo	Franco-Arcilloso

Por su parte, para evaluar la respuesta productiva del cultivo al manejo, se evaluó la tasa de crecimiento del fruto a través de variaciones en el diámetro, con un sensor tipo dendrómetro (DC-SE-100®, general purpose DC LVDT, 19). El sensor se ubicó en uno de los árboles experimentales y se registró la fluctuación diaria del diámetro del fruto cada 20 minutos. La medición continua con este equipo se interrumpió debido a problemas de instalación y soporte, por lo que se continuó de manera manual semanalmente en 4 frutos por árbol. Para esto se utilizó un calibrador electrónico (Mitutoyo®). En este caso se trabajó con dos portainjertos (Volkameriana y el portainjerto CPB) en dos parcelas experimental con 6 árboles cada una.



Figura 31. Equipamiento para seguimiento al crecimiento del fruto.

Para evaluar el estado hídrico interno de las plantas, se utilizó el parámetro conductancia estomática (G_s), utilizando para esto un porómetro (SC-1 Leaf Porometer®, Meter Group, Inc., Decagon Devices, Figura 32 **Error! Reference source not found.**). La G_s fue correlacionada con las variables climáticas, representadas en el déficit de presión de vapor (DPV, KPa). Este seguimiento se hace con regularidad quincenal, bajo el régimen hídrico practicado tradicionalmente en el cultivo. Cabe indicar que, durante la fase diagnóstica, el riego se definió con base en la reposición de la demanda ambiental, representado por la evapotranspiración de referencia (ET_0).



Figura 32. Evaluación de conductancia estomática con porometría.

Finalmente, se cuantificó el rendimiento por árbol. Debido a que el cultivo de lima ácida Tahití, en la localidad analizada, produce fruta durante todo el año con peaks entre enero-marzo y entre julio-agosto, la variable fue cuantificada por semestre.

2.4. Validación nuevas tecnologías en el riego en Uruguay: Manejo eficiente del riego con información satelital.

2.4.1 Piloto tecnológico en Parcela Experimental El Junco, Arroyo de Tala.



Área de estudio

El piloto tecnológico en riego se implementó en la Parcela Experimental “El Junco”, en Colonia Rubio, a 75 km aproximadamente de la ciudad de Salto. La zona en general tiene un sistema ganadero fundamentalmente con algunas empresas que hacen cultivos extensivos regados y en las zonas bajas producción de arroz, existe en la región una pequeña cuenca de productores de leche.

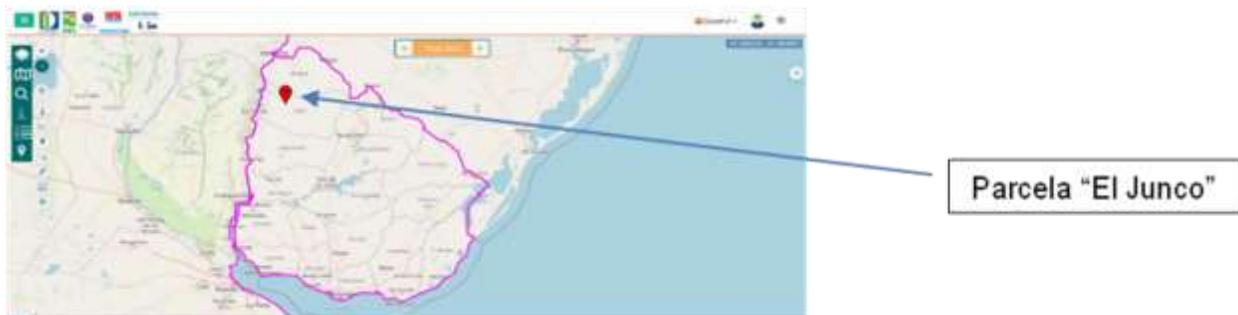


Figura 33. Ubicación parcela piloto “El Junco”.

Monitoreo Riego

El control del riego aplicado a las pasturas fue realizado a través de la evaluación de la eficiencia de aplicación y el coeficiente de distribución. Al ser riego por superficie que se realizó en las pasturas permanentes se trabajó con evaluaciones de avance y receso del agua en las parcelas en 2 o 3 riegos por temporada como se muestra en la Figura 34.

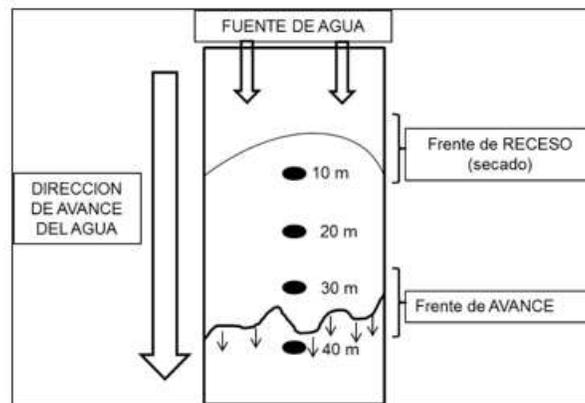


Figura 34. Esquema de la evaluación a campo del avance y receso del agua en las parcelas del piloto tecnológico. Fuente: Bourdin et al., 2015

Para la obtención de la eficiencia de aplicación, de la uniformidad de distribución, percolación profunda y el escurrimiento superficial del agua de riego, se utilizó el software de simulación WinSRFR v.4.13. En el módulo de Análisis de Evento se ingresaron los datos de campo requeridos por el software como son: largo de melga, ancho de melga, lámina máxima, pendiente, caudal, tiempo de corte, tiempo de avance acumulado cada 10 m, tiempo de receso acumulado cada 10 m, coeficiente de rugosidad de Manning, parámetro "a" de la función de Kostiakov. Este módulo con los datos ingresados calcula el tiempo de oportunidad, el parámetro K de la función de infiltración y luego al correrlo arroja resultados como eficiencia de aplicación (EA), uniformidad de distribución (UD), percolación profunda (P) y escurrimiento superficial (E) expresados en porcentaje (%) como en mm de lámina de agua según el caso. Ejemplo de la evaluación realizada a campo se presenta en la Figura 35 **Error! Reference source not found.**

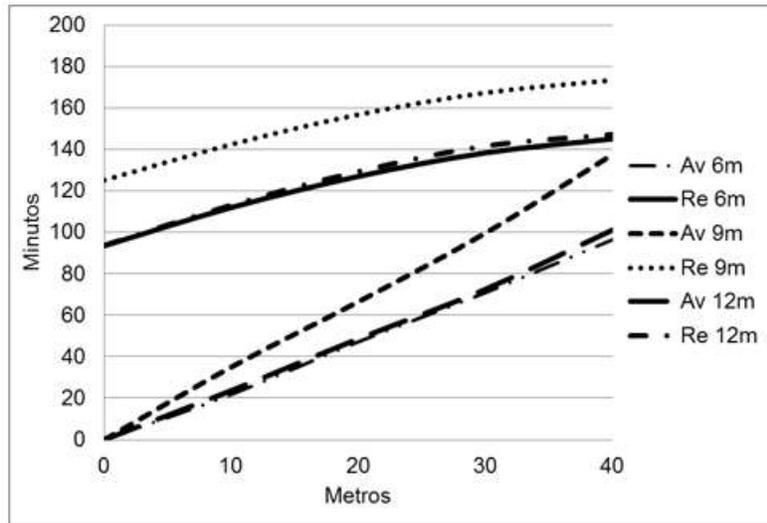


Figura 35. Curvas de tiempos de avance y receso del agua, resultante de la evaluación a campo.

Para el monitoreo de la disponibilidad hídrica en el suelo (balance hídrico), se utilizaron equipos datalogger 5mb de Decagon, con 5 sensores FDR modelo 10HS en cada uno de los dataloggers, colocados a diferentes profundidades hasta los 60 cm (que es la profundidad efectiva radicular). La información obtenida de esta manera corresponde al contenido volumétrico de humedad en el suelo (%/%).



Figura 36. Sondas FDR (Decagon) utilizadas para el monitoreo continuo de la humedad en el suelo.

Monitoreo meteorológico.

El monitoreo de la demanda atmosférica se realizó estimando la ecuación de evapotranspiración de referencia (ET_o) a partir de la utilización de las variables meteorológicas registradas en una estación meteorológica automática colocada a 2 km de la parcela piloto tecnológico (Davis Vantage Pro).



Figura 37. Estación meteorológica automática (EMA) en la parcela piloto tecnológico “El Junco”.

Cultivos monitoreados

En el transcurso del proyecto se realizó el monitoreo de pasturas permanentes, maíz y soja. En el caso de las pasturas el riego fue por melgas o fajas (riego por superficie) y el maíz y soja fueron regados por pivot central de aproximadamente 60 has cada uno (Figura 38 **Error! Reference source not found.**).

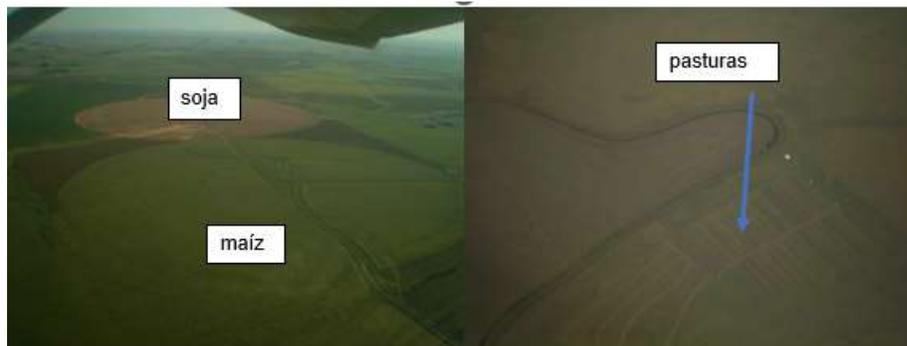


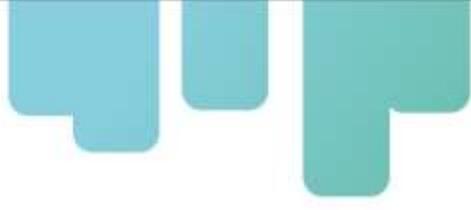
Figura 38. Cultivos monitoreados para el ajuste del riego de precisión.

3. Pilotos tecnológicos a escala de Cuenca

La agricultura de regadío, sirviéndose de más recursos hídricos, ha incrementado la producción de alimentos favoreciendo la seguridad alimentaria en un mundo cada vez más poblado. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), mediante el sistema de información global sobre los recursos hídricos AQUASTAT (FAO, 2016), distingue y cuantifica del total de aproximadamente 4.000 Km³ de extracciones, los usos doméstico (11%), industrial (19%) y agrícola (70%). A pesar de que la monitorización de las superficies regadas y sus consumos hídricos fomenta un uso eficaz y sostenible (European Commission, 2000), éstos no suelen gestionarse sosteniblemente, siendo habituales las presiones. A escala global, un manejo sostenible se entiende cómo aquel que *“puede satisfacer las necesidades de las generaciones presentes y futuras”* (UN, 2015). Por tanto, para alcanzar dicha gestión, el conocimiento y cuantificación del agua de riego empleada es fundamental.

Tradicionalmente, los gestores públicos del agua han abordado la cuantificación de la demanda de agua de riego mediante métodos directos o indirectos. En el caso de los métodos directos, basados en la instalación de contadores se presentan desventajas ya documentadas tras diferentes experiencias prácticas, demostrando así que la instalación y mantenimiento de estos sistemas resulta ineficaz a largo plazo por el elevado coste económico, personal y además, por la fiabilidad de las mediciones debidas el deterioro de los sistemas (Dalmau and Vierbücher, 1999; Díaz Mora, 1999; Cornish et al., 2004; Madurga del Cura and Ramírez, 2011; Pérez et al., 2011). En paralelo, la aproximación más extendida entre los gestores se centra en utilizar métodos indirectos basados en la estimación de la superficie regable combinada con las demandas teóricas de cultivos. Este enfoque ha empleado mayoritariamente la metodología propuesta por el manual FAO 56 (Allen et al., 1998) que resulta globalmente operativa y aceptada, con el objetivo de determinar la demanda hídrica de los cultivos en regadío.

El citado manual ha conseguido homogeneizar la estimación de la evapotranspiración de los cultivos (ET_c), mediante la aproximación denominada coeficiente de cultivo único. Éste se basa en: i) la combinación de la demanda evaporativa atmosférica calculada de forma rigurosa para un cultivo de referencia (conocida como evapotranspiración de referencia, ET_o); y ii) el coeficiente de cultivo (K_c) que expresa: *“la diferencia entre la evapotranspiración de la superficie cultivada y la de referencia”*. Por un lado, dicho procedimiento obtiene la ET_o a través de datos climáticos recogidos principalmente por una red de estaciones, y por otro lado emplea valores tabulados de K_c que integren las características del tipo de cultivo a lo largo de su crecimiento y bajo óptimas condiciones de manejo, esto es, sin limitaciones a la disponibilidad de agua o nutrientes, y en ausencia de enfermedades u otras limitaciones a su desarrollo. Su determinación para diferentes



tipos de cultivos ha permitido publicar valores tabulados por tipo de cultivo en sus diferentes etapas evolutivas: inicial ($K_{c\ ini}$), desarrollo ($K_{c\ des}$), medio ($K_{c\ med}$) y final ($K_{c\ fin}$). Sin embargo, para un correcto uso de las denominadas curvas de K_c se recomienda su adaptación a las condiciones locales (Allen et al., 1998), con lo que a pesar de que numerosos esfuerzos se han llevado a cabo para ampliar la base de datos y ponerlas a disposición de los usuarios, su transferencia y adaptación a nuevas zonas debe ser mejorada (Pereira et al., 2015, 2021).

Generar información complementaria y fiable para la monitorización de cultivos en regadío y los recursos hídricos empleados es posible mediante la teledetección (Bastiaanssen et al., 2000; Calera et al., 2005). Esta afirmación se apoya en adecuadas resoluciones espectrales, espaciales y temporales que presentan las imágenes capturadas por los actuales satélites de observación de la Tierra. Entre ellos destaca el satélite Sentinel-2 (S2, con los gemelos S2-A y S2-B) del programa *Copernicus* de la Agencia Europea Espacial, y cuyo acceso libre y gratuito ha contribuido a extender su operatividad, retornando beneficios económicos y medioambientales a la sociedad (Papadakis and Milosavljevic, 2019). Concretamente, los aproximadamente 110 km en cada lado del gránulo de las imágenes capturadas por S2 permiten cubrir grandes extensiones de territorio (Griffiths et al., 2019; Defourny et al., 2019), y al contar con una resolución espacial (mínimo tamaño de información contenido en el píxel) de 10-60 m resultan apropiadas para la monitorización a escala de parcela (Melton et al., 2012; Montgomery et al., 2015; Vuolo et al., 2015). Además, la alta frecuencia de revisita de 5 días permite la construcción de series temporales de imágenes de satélite que son apropiadas para el seguimiento evolutivo de las coberturas vegetales (González-Gómez et al., 2018; Piedelobo et al., 2019). Por último, las 13 bandas que abarcan el espectro radiométrico de los 0,43 – 2,28 μm , proporcionan la resolución espectral necesaria para el diagnóstico de la vegetación (Glenn et al., 2011; Weiss et al., 2020).

Por todo ello, el presente proyecto propone una aproximación que incluya basada el uso de series temporales de imágenes de satélite en la metodología FAO56 para monitorizar los cultivos en regadío y sus demandas hídricas. De esta forma, se produce información cartográfica temática, espacial y temporalmente asistida por satélite, sobre las necesidades de agua de riego. En consecuencia, ofrece una herramienta de trabajo para la toma de decisiones de los gestores públicos y privados del agua, pues genera un conocimiento complementario homogéneo, fiable y reproducible, que fomente el uso eficaz y sostenible de los recursos hídricos.

3.1. Metodología de trabajo en cuenca

El balance de agua en el suelo asistido por teledetección (Garrido-Rubio et al., 2020b) sigue la metodología FAO56, y es ejecutado en la última versión disponible de la aplicación operativa HidroMORE (Moreno et al., 2017). Dicho balance se trabaja píxel a píxel y bajo una frecuencia de

cálculo diaria extendida al rango temporal deseado (x-semanas, x-meses, x-años...), con el fin de obtener una base de datos cartográfica y temática del regadío, espacial y temporalmente distribuida, gracias a las salidas al modelo de mapas de las variables de balance de agua en el suelo (ETo, Precipitación, ETc o NIR entre otras). Su extensión final de trabajo está determinada por la superficie abarcada por las imágenes de satélite empleadas, y la mínima unidad espacial de trabajo es la inherente a dichas imágenes, es decir, el tamaño del píxel de entrada. Para llevar a cabo el balance, HidroMORE emplea los siguientes datos de entrada (Figura 39): a) series temporales de IV; b) mapa de usos del suelo en regadío; c) mapa de tipos de suelo según sus propiedades hidrológicas; y d) bases de datos agroclimáticas (P y ETo diaria). Esta herramienta operativa ha sido validada en diferentes escalas de gestión como: la parcela y asociación de regantes mediante el uso de contadores y planes de explotación (Garrido-Rubio et al., 2020b); la unidad geológica acuífero frente a datos piezométricos (Garrido-Rubio et al., 2019); y la demarcación hidrográfica usando Planes Hidrológicos de Cuenca (Garrido-Rubio et al., 2020a).



Figura 39. Esquema conceptual del modelo HidroMORE basado en la teledetección para estimar espacial y temporalmente distribuidas las NIR (Garrido-Rubio, 2021).

El balance de agua en el suelo asistido por teledetección sigue la metodología sintetizada en la ecuación (1), de forma que busca diariamente estimar el agotamiento de agua en el suelo en el perfil explorado por las raíces (D_r) que la evaporación ajustada de los cultivos extrae ($ET_{c,aj}$), para incorporar el agua finalmente mediante riego (NIR), en aquellas situaciones donde la

precipitación (P) sea insuficiente para un correcto desarrollo de los cultivos en regadío. En paralelo, usa la ecuación (2), aproximación de coeficiente de cultivo dual (Wright, 1982), ya que estima la ET_c aj cuando los cultivos cubren parcialmente la superficie del suelo (leñosos y herbáceos en los primeros estadios de su desarrollo), o bien, cuando necesiten de riegos frecuentes (cultivos hortícolas) (Allen et al., 2005); tal y como se presentan en extensas y diversas superficies regables. En dicha ecuación encontramos los parámetros del coeficiente de cultivo dual como el coeficiente basal de cultivo (K_{cb}), el coeficiente de estrés hídrico del cultivo (K_s), y el coeficiente de evaporación del suelo (K_e).

$$Dr_i = Dr_{i-1} - (P - RO)_i - NIR_i - CRI + ET_c aj,i + DP_i \quad (1)$$

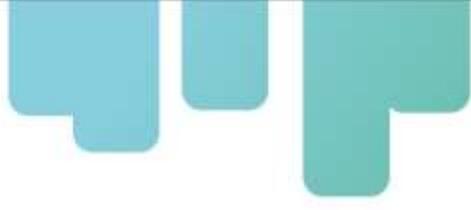
$$ET_c aj,i = ETo \cdot (K_{cb} \cdot K_s + K_e)_i \quad (2)$$

Asumiendo la gran variedad de cultivos y manejos desarrollados que sobre distintas condiciones locales tienen lugar en el proyecto ejecutado, en lugar de usar valores tabulados propuestos para coeficiente base de cultivo (K_{cb}) o de fracción de la superficie del suelo cubierta por la vegetación (f_c), el balance de agua en el suelo asistido por teledetección emplea la capacidad de monitorización de las coberturas vegetales por parte de las series temporales de índices de vegetación (IV) derivadas de las imágenes espectrales (Tasumi and Allen, 2007), junto con las relaciones lineales empíricas que lo asocian a dichos parámetros de cultivo (Heilman et al., 1982; Bausch and Neale, 1987; Neale et al., 1989; Choudhury et al., 1994; Bausch, 1995; Duchemin et al., 2006; Er-Raki et al., 2010; Odi-Lara et al., 2016). Así, los parámetros obtenidos desde la teledetección estiman su valor instantáneo con lo que debemos diferenciarlos de los obtenidos por FAO56, pasándose a denominar $K_{cb act}$ (actual K_{cb}) y $f_c act$ (actual f_c). Por ello, se ha escogido el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI (Rouse et al., 1974), como IV operativo (Glenn et al., 2008), a sabiendas del inconcluso debate sobre la mejor elección de un IV, basándonos en su fácil interpretación y computación además del generalizado uso en aplicaciones agronómicas operativas a gran escala. Así, para esta investigación se ha empleado la relación NDVI- $K_{cb act}$ (Campos et al., 2010), mostrada en la ecuación (3), y la relación NDVI- $f_c act$ (González-Piqueras, 2006), mostrada en la ecuación (4).

$$K_{cb act,i} = 1,44 \cdot (NDVI) - 0,1 \quad (3)$$

$$f_c act,i = 1,19 \cdot (NDVI) - 0,16 \quad (4)$$

Finalmente, el balance reproducido diariamente y a escala de píxel invierte la ecuación (1), para obtener a escala de píxel y mediante la ecuación (5), las NIR diarias (mm/día), generando una cartografía temática espacial y temporalmente distribuida. En la ecuación (5), se han descartado las variables de: ascenso capilar (CRI), pues no es recomendable su incorporación cuando la capa



freática está localizada a más de 1 m de la superficie (Allen et al., 1998), y la escorrentía superficial (RO_i), pues la aplicación HidroMORE trabaja flujos verticales, no laterales (Torres, 2010).

$$\text{NIR}_i = (\text{Dr}_{i-1} - \text{Dr})_i - P_i + \text{ETc}_{aj, i} + \text{DP}_i \quad (5)$$

3.2 Validación de nuevas tecnologías a escala de Cuenca: Balance de agua en el suelo asistido por teledetección.

Con el objetivo de generar información homogénea, fiable y reproducible, que fomente el uso eficaz y sostenible de los recursos hídricos sobre diferentes tipos de cultivo en distintas cuencas de trabajo (Cuadro 6), el diseño experimental ha seguido las siguientes fases:

1. Presentación del modelo y productos obtenidos.
2. Intercambio de información de entrada al modelo.
3. Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección.
4. Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua.

Cuadro 6. Superficie total y cultivos principales desarrollados por cuencas de trabajo.

Cuenca de trabajo	Superficie (ha)	Cultivos principales
Subcuenca del río Tunuyán Inferior (Mendoza, Argentina)	100.000	Vid, frutal, olivo y hortalizas
Colonia Fiscal Sarmiento (San Juan, Argentina)	2.000	Vid, hortalizas y alfalfa
Villa Regina (Río Negro, Argentina)	7.000	Peral, Manzano, ciruela...
Valle del Elqui (Coquimbo, Chile)	15.000	Vid, maíz, papas, alfalfa
Distrito RUT (Valle del Cauca, Colombia)	10.000	Caña de azúcar, maíz...
Arroyo del Tala (Salto, Uruguay)	2.000	Arroz, maíz, sorgo, soja y pasturas

3.2.1. Validación a escala de cuenca Río Elquí, Chile

En la Figura 40, el primer mapa corresponde al lugar de estudio con los usos de suelo reportados. El Segundo mapa corresponde al modelo de HidroMORE, utilizando los datos de entrada de los afluentes por zona. El tercer mapa corresponde al balance hídrico de cada sector, mientras más intenso es el color azul, indica mayor aporte de riego (NIR).

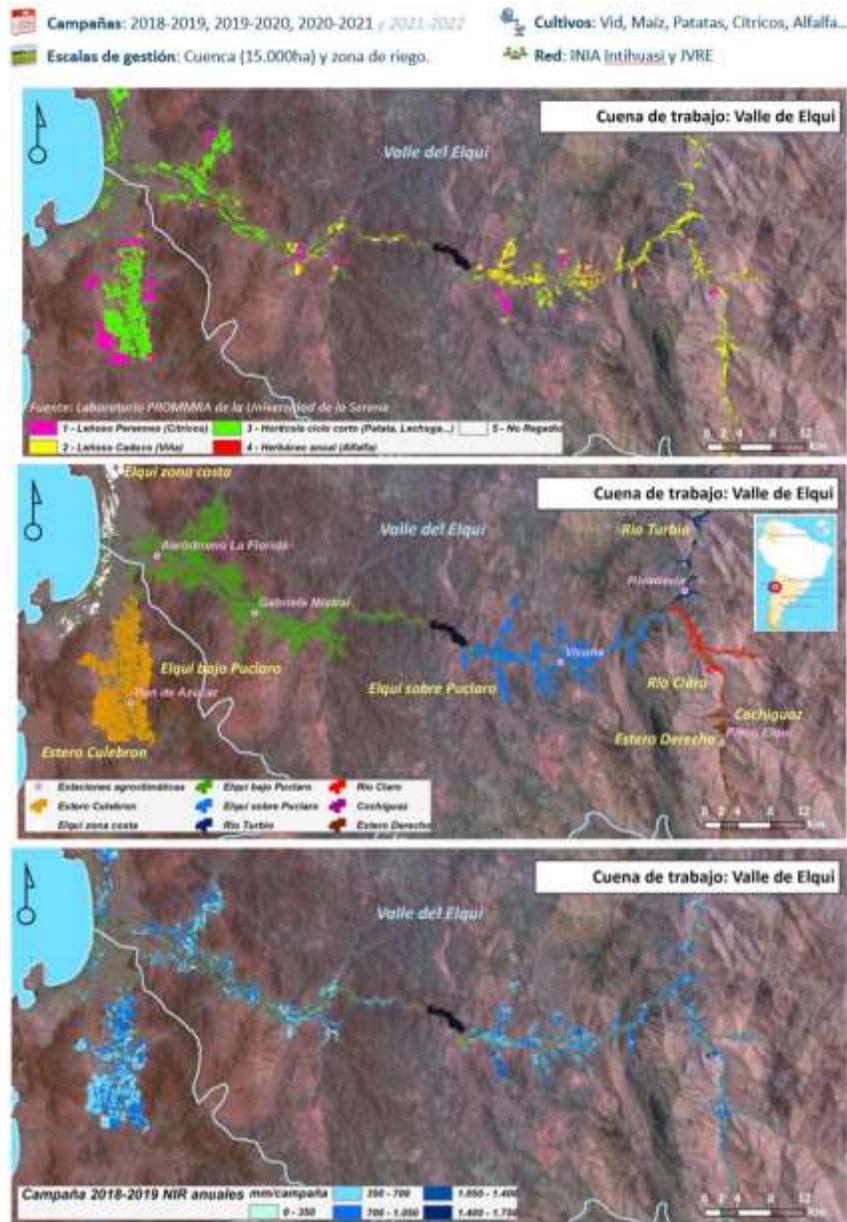


Figura 40. Modelamiento a escala de cuenca del Valle del Elquí con HidroMORE de la temporada 2018-2019.

3.2.2. Validación a escala de cuenca Mendoza, Argentina

En la Figura 41, el primer mapa corresponde al lugar de estudio. El Segundo mapa corresponde al modelo de HidroMORE, utilizando los datos de entrada con los usos de suelo reportados. El tercer mapa corresponde al balance hídrico de cada sector, mientras más intenso es el color azul, indica mayor aporte de riego (NIR).

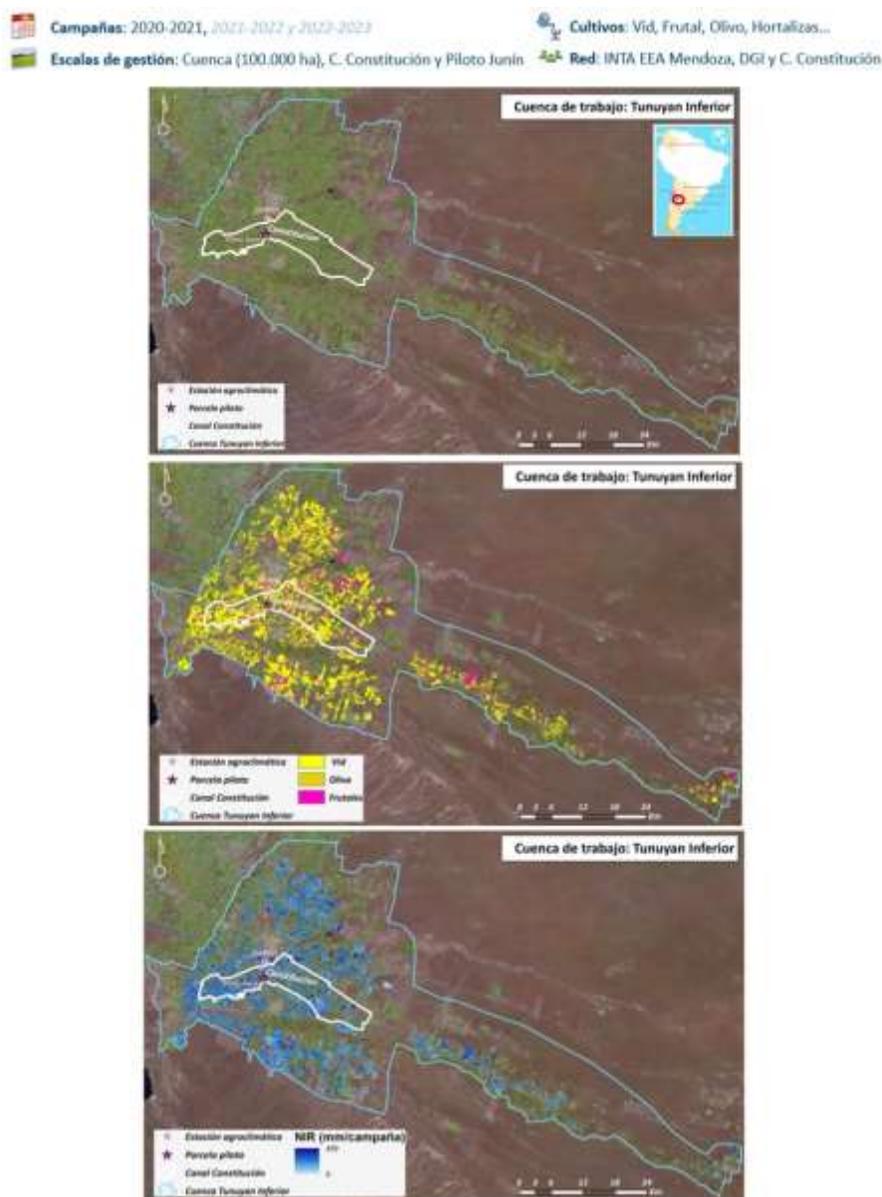


Figura 41. Modelamiento a escala de cuenca de Mendoza con HidroMORE, temporada 2020-2021.

3.2.3. Validación a escala de cuenca Juan, Argentina

En la Figura 42, el primer mapa corresponde al lugar de estudio. El Segundo mapa corresponde al modelo de HidroMORE, utilizando los datos de entrada con los usos de suelo reportados. El tercer mapa corresponde al balance hídrico de cada sector, mientras más intenso es el color azul, indica mayor aporte de riego (NIR).

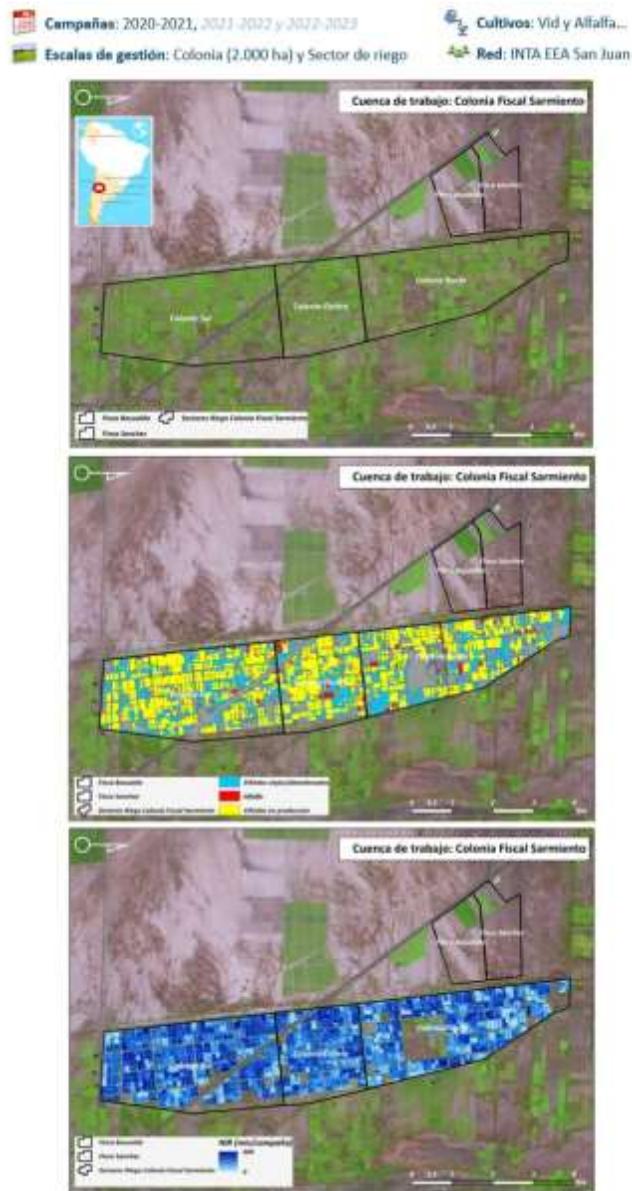


Figura 42. Modelamiento a escala de cuenca de San Juan con HidroMORE, temporada 2020-2021.

3.2.4. Validación a escala de cuenca Villa Regina, Río Negro, Argentina

En la Figura 43, el primer mapa corresponde al lugar de estudio. El Segundo mapa corresponde al modelo de HidroMORE, utilizando los datos de entrada con los usos de suelo reportados. El tercer mapa corresponde al balance hídrico de cada sector, mientras más intenso es el color azul, indica mayor aporte de riego (NIR).

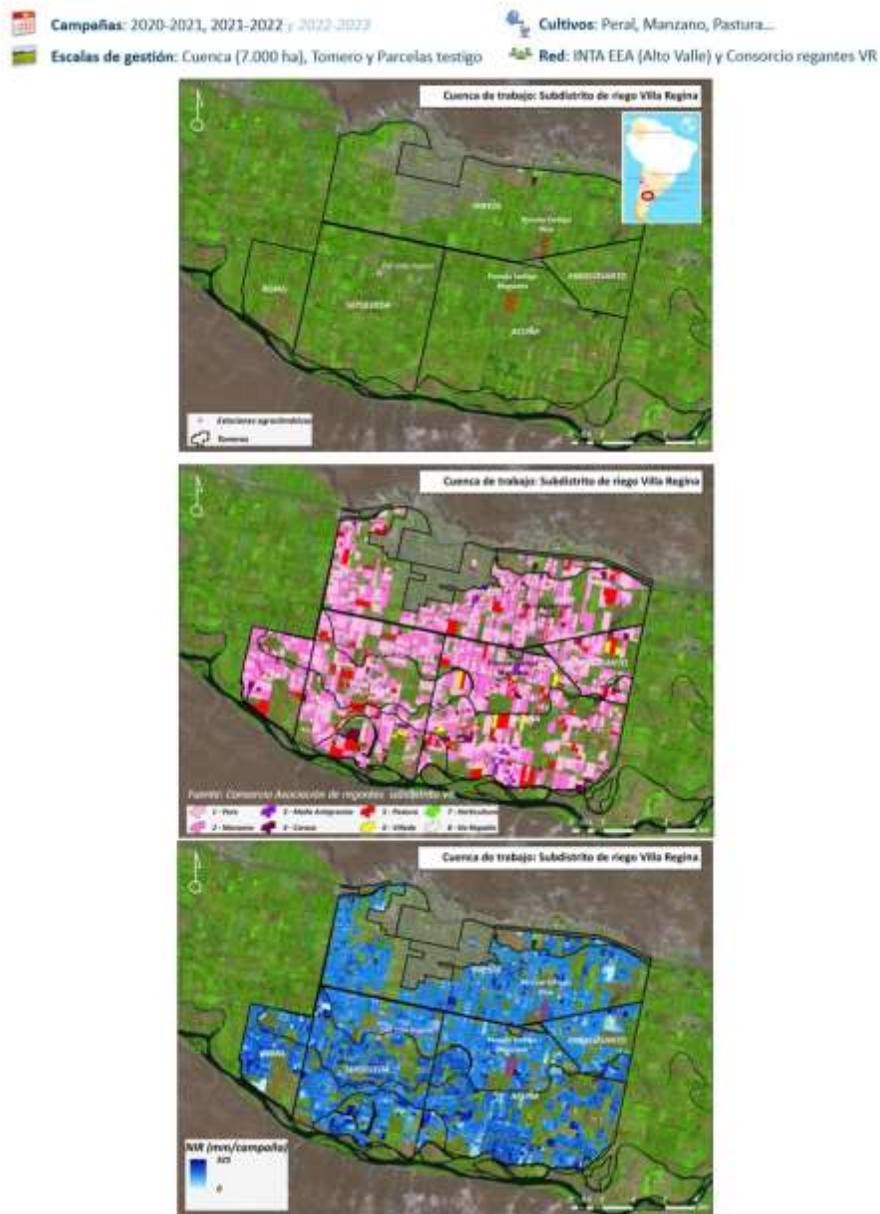


Figura 43. Modelamiento a escala de cuenca de Río Negro con HidroMORE, temporada 2020-2021, 2021-2022

3.2.5. Validación a escala de cuenca Distrito RUT, Colombia.

En la Figura 44 observamos la estimación de las necesidades de riego del Distrito RUT en las temporadas 2019-2020, 2020-2021 que van desde 0 mm, es decir que con el aporte del agua de la precipitación es suficiente para satisfacer las necesidades hídricas (NIR) del cultivo, y otros donde el aporte debe ser mayor.

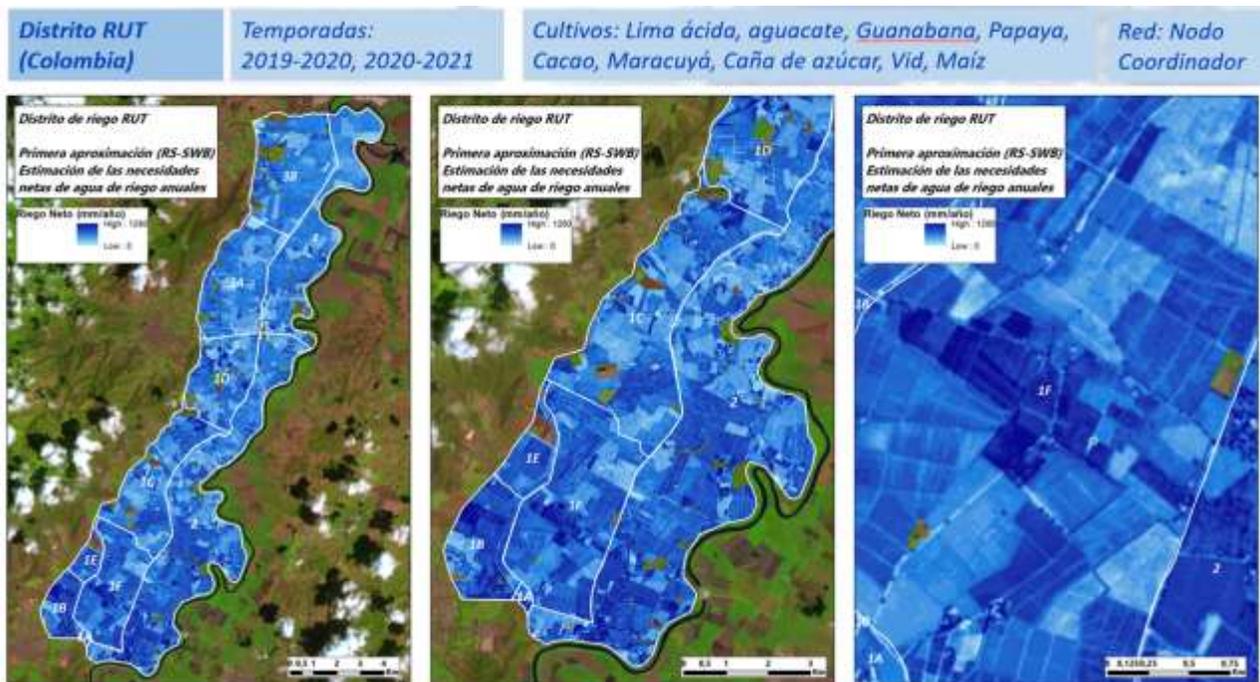


Figura 44. Modelamiento a escala de cuenca del Distrito RUT con HidroMORE, temporada 2019-2020, 2020-2021.

3.2.6. Validación a escala de cuenca Arroyo de Tala, Uruguay

En la Figura 45, el primer mapa corresponde al lugar de estudio. El Segundo mapa corresponde al modelo de HidroMORE, utilizando los datos de entrada con los usos de suelo reportados. El tercer mapa corresponde al balance hídrico de cada sector, mientras más intenso es el color azul, indica mayor aporte de riego (NIR).

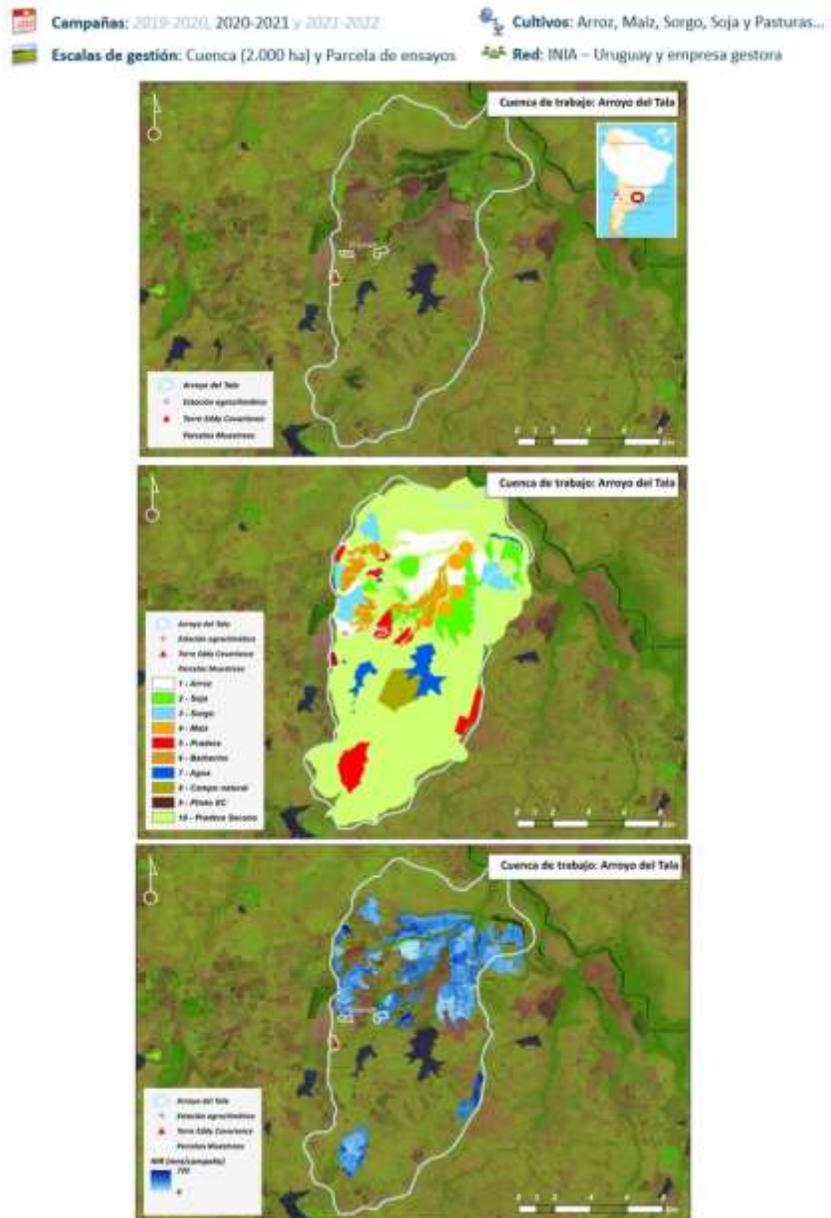


Figura 45. Modelamiento a escala de cuenca de Arroyo de Tala con HidroMORE, temporada 2020-2021.

4. Conclusiones

Los pilotos tecnológicos se enfocan en mejorar la eficiencia del riego agrícola mediante el uso de tecnologías diversas, desde sistemas de monitoreo remoto hasta mediciones precisas del riego y las condiciones del suelo. En estos pilotos aprovechamos tecnologías como la telemetría, el monitoreo satelital, estaciones meteorológicas, sensores de humedad de suelo, permitiendo ajustes precisos en el riego según las necesidades de diversos cultivos. A través del uso de índices de vegetación, interpretamos el estado de los cultivos y ajustamos el riego según sus necesidades específicas.

Adicionalmente, se evalúa el rendimiento de los cultivos y la eficiencia del agua aplicada. Esta atención a la sostenibilidad se refleja en la evaluación de la eficiencia de aplicación del riego y la uniformidad de distribución, buscando minimizar el desperdicio de agua y maximizar su efectividad en la producción agrícola. Estos esfuerzos revelan un claro avance hacia la optimización del riego agrícola a través de la implementación de tecnologías avanzadas.

De esta manera, los pilotos tecnológicos a escala predial representan un enfoque avanzado y prometedor para mejorar la eficiencia del riego agrícola, lo que puede ser crucial para maximizar la producción y optimizar el uso del agua la agricultura.

Respecto de los pilotos tecnológicos a escala de cuenca en el ámbito de la agricultura de regadío, han destacado la necesidad de una gestión más eficaz y sostenible de los recursos hídricos. A pesar de que la monitorización de las áreas regadas y su consumo de agua promueve un uso más eficiente, los métodos tradicionales para cuantificar la demanda de agua de riego presentan desafíos y limitaciones. Aunque el manual FAO 56 ha establecido estándares para estimar la evapotranspiración de los cultivos, su adaptación a condiciones locales y la mejora en su transferencia a nuevas áreas siguen siendo áreas de mejora.

En este contexto, la teledetección se ha destacado como una herramienta prometedora para generar información precisa y complementaria sobre el uso del agua en los cultivos de regadío. El uso de series temporales de imágenes de satélite, como las proporcionadas por el satélite Sentinel-2, ha demostrado su utilidad al ofrecer resoluciones espectrales, espaciales y temporales adecuadas para monitorear los cultivos a escala de parcela. Esta tecnología proporciona información valiosa sobre las necesidades de agua de riego y el estado de los cultivos, lo que puede ser fundamental para la toma de decisiones de los gestores públicos y privados del agua.

El proyecto propone una metodología que combina el uso de series temporales de imágenes de satélite con la metodología FAO56 para monitorear los cultivos de regadío y sus demandas hídricas. Esta aproximación busca proporcionar información cartográfica temática, espacial y temporalmente asistida por satélite sobre las necesidades de agua de riego, ofreciendo una herramienta para la toma de decisiones que fomente el uso eficaz y sostenible de los recursos hídricos.



La validación de estas tecnologías a escala de cuenca en diferentes regiones, desde el Valle del Elqui en Chile hasta el Distrito RUT en Colombia, ha mostrado la viabilidad y utilidad de este enfoque. Estos pilotos tecnológicos han demostrado su capacidad para generar información homogénea, fiable y reproducible, proporcionando una visión detallada del balance hídrico y las necesidades de riego en diversas áreas de cultivo. Este enfoque integrador, que combina la teledetección con modelos de estimación de demanda hídrica, promete ser una herramienta clave para la gestión sostenible del agua en la agricultura de regadío a escala de cuenca.

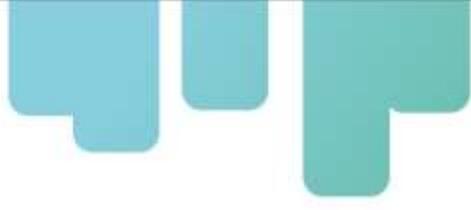
5. Bibliografía

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 56. FAO, Rome, Italy.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, M. Smith, D. Raes, and J.L. Wright. 2005. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131(1): 2–13. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(2).
- Bastiaanssen, W.G.M., D.J. Molden, and I.W. Makin. 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: Examples from research and possible applications. *Agric. Water Manag.* 46(2): 137–155. doi: 10.1016/S0378-3774(00)00080-9.
- Bausch, W.C. 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agric. Water Manag.* 27(1): 55–68. doi: 10.1016/0378-3774(95)01125-3.
- Bausch, W.C., and C.M.U. Neale. 1987. Crop Coefficients Derived from Reflected Canopy Radiation: A Concept. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 30(3): 703–709. doi: 10.13031/2013.30463.
- Bourdin Medici, A. D., Franco Fraguas Souto, J. M., & Burgos Valiente, M. J. (2015). Respuesta física al riego suplementario y desarrollo de tecnologías de riego por melgas en pasturas artificiales.
- Calera, A., A.M. Jochum, A.C. García, A.M. Rodríguez, and P.L. Fuster. 2005. Irrigation management from space: Towards user-friendly products. *Irrig. Drain. Syst.* 19(3–4): 337–353. doi: 10.1007/s10795-005-5197-x.
- Campos, I., C.M.U. Neale, A. Calera, C. Balbontín, and J. González-Piqueras. 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manag.* 98(1): 45–54. doi: 10.1016/j.agwat.2010.07.011.
- Choudhury, B.J., N.U. Ahmed, S.B. Idso, R.J. Reginato, and C.S.T. Daughtry. 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sens. Environ.* 50(1): 1–17. doi: 10.1016/0034-4257(94)90090-6.
- Cornish, G., B. Bosworth, C.J. Perry, and J.J. Burke. 2004. Water charging in irrigated agriculture: an analysis of international experience. Food and Agriculture Organization of the United Nations., Rome, Italy.
- Dalmau, B., and L. Vierbücher. 1999. Experiencia en el establecimiento de redes de control de extracciones de agua subterránea en Tarragona. In: Ballester, A., Fernández, J.A., and López, J.A., editors, *Medida y evaluación de las extracciones de agua subterránea*. ITGE (Instituto Tecnológico Geominero de España). p. 73–87
- Defourny, P., S. Bontemps, N. Bellemans, C. Cara, G. Dedieu, et al. 2019. Near real-time agriculture monitoring at national scale at parcel resolution: Performance assessment of the Sen2-Agri automated system in various cropping systems around the world. *Remote Sens. Environ.* 221: 551–568. doi: 10.1016/j.rse.2018.11.007.
- Díaz Mora, J. 1999. Experiencia en la implantación de contadores en los acuíferos de la cuenca alta del Guadiana. In: Ballester, A., Fernández, J.A., and López, J.A., editors, *Medida y evaluación de las extracciones de agua subterránea*. ITGE (Instituto Tecnológico Geominero

- de España). p. 69–72
- Duchemin, B., R. Hadria, S. Erraki, G. Boulet, P. Maisongrande, et al. 2006. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agric. Water Manag.* 79(1): 1–27. doi: 10.1016/j.agwat.2005.02.013.
- Er-Raki, S., A. Chehbouni, and B. Duchemin. 2010. Combining Satellite Remote Sensing Data with the FAO-56 Dual Approach for Water Use Mapping In Irrigated Wheat Fields of a Semi-Arid Region. *Remote Sens.* 2(1): 375–387. doi: 10.3390/rs2010375.
- European Commission. 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Off. J. Eur. Parliam.* L327(September 1996): 1–82. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj>.
- FAO. 2000. El riego en América Latina y el Caribe en cifras. FAO, Rome, Italy.
- FAO. 2016. AQUASTAT - FAO's Information System on Water and Agriculture. Food Agric. Organ. United Nations. http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm.
- Garrido-Rubio, J. 2021. Teledetección aplicada a la contabilidad del agua de riego sobre diferentes escalas espaciales y temporales de gestión: desde la parcela hasta la demarcación hidrográfica. doi: <http://hdl.handle.net/10578/28728>.
- Garrido-Rubio, J., A. Calera, I. Arellano, M. Belmonte, L. Fraile, et al. 2020a. Evaluation of remote sensing-based irrigation water accounting at river basin district management scale. *Remote Sens.* 12(19): 3187. doi: 10.3390/rs12193187.
- Garrido-Rubio, J., J. González-Piqueras, I. Campos, A. Osann, L. González-Gómez, et al. 2020b. Remote sensing-based soil water balance for irrigation water accounting at plot and water user association management scale. *Agric. Water Manag.* 238: 106236. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106236.
- Garrido-Rubio, J., D. Sanz, J. González-Piqueras, and A. Calera. 2019. Application of a remote sensing-based soil water balance for the accounting of groundwater abstractions in large irrigation areas. *Irrig. Sci.* 37(6): 709–724. doi: 10.1007/s00271-019-00629-3.
- Glenn, E.P., A.R. Huete, P.L. Nagler, and S.G. Nelson. 2008. Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors* 8(4): 2136–2160. doi: 10.3390/s8042136.
- Glenn, E.P., C.M.U. Neale, D.J. Hunsaker, and P.L. Nagler. 2011. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrol. Process.* 25(26): 4050–4062. doi: 10.1002/hyp.8392.
- González-Gómez, L., I. Campos, and A. Calera. 2018. Use of different temporal scales to monitor phenology and its relationship with temporal evolution of normalized difference vegetation index in wheat. *J. Appl. Remote Sens.* 12(02): 1. doi: 10.1117/1.JRS.12.026010.
- González-Piqueras, J. 2006. Evapotranspiración de la cubierta vegetal mediante la determinación del coeficiente de cultivo por teledetección extensión a escala regional: acuífero 08.29 Mancha Oriental. <http://hdl.handle.net/10550/14928>.



- Griffiths, P., C. Nendel, and P. Hostert. 2019. Intra-annual reflectance composites from Sentinel-2 and Landsat for national-scale crop and land cover mapping. *Remote Sens. Environ.* 220: 135–151. doi: 10.1016/j.rse.2018.10.031.
- Guerra, D. D., Grajales, L. C., & Rojas, L. R. (2015). Efecto del riego y la fertilización sobre el rendimiento y la calidad de la fruta de lima ácida Tahití *Citrus latifolia* Tanaka (Rutaceae). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 16(1), 87-93.
- Heilman, J.L., W.E. Heilman, and D.G. Moore. 1982. Evaluating the Crop Coefficient Using Spectral Reflectance 1. *Agron. J.* 74(6): 967–971. doi: 10.2134/agronj1982.00021962007400060010x.
- Ibañez, A. A., Parera, C., & Torres, M. (2016). Efecto de la restricción hídrica invernal en olivo (*Olea europaea* L.): el potencial hídrico xilemático y la conductancia estomática. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 42(2), 186-200.
- Madurga del Cura, C., and J. Ramírez. 2011. Influencia de la calidad del agua en la metrología de los contadores de riego. XXIX Congr. Nac. Riegos. doi: <http://www.aeryd.es/empresas/aeryd/trabajos/2011-C-20.pdf>.
- Melton, F.S., L.F. Johnson, C.P. Lund, L.L. Pierce, A.R. Michaelis, et al. 2012. Satellite irrigation management support with the terrestrial observation and prediction system: A framework for integration of satellite and surface observations to support improvements in agricultural water resource management. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 5(6): 1709–1721. doi: 10.1109/JSTARS.2012.2214474.
- Merriam, J. L., & Keller, J. (1978). *Farm irrigation system evaluation: A guide for management.* Farm irrigation system evaluation: a guide for management.
- Montgomery, J., J.W. Hornbuckle, I. Hume, and J. Vleeshouwer. 2015. *IrrisAT – weather based scheduling and benchmarking technology* (T. Acuña, C. Moeller, D. Parsons, and M. Harrison, editors). Australian Society of Agronomy Inc.
- Moreno, R., E. Arias, J.L. Sanchez, D. Cazorla, J. Garrido, et al. 2017. HidroMORE 2: An optimized and parallel version of HidroMORE. 2017 8th Int. Conf. Inf. Commun. Syst. ICICS 2017: 1–6. doi: 10.1109/IACS.2017.7921936.
- Neale, C.M.U., W.C. Bausch, and D.F. Heermann. 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 32(6): 1891–1899. doi: 10.13031/2013.31240.
- Odi-Lara, M., I. Campos, C. Neale, S. Ortega-Farías, C. Poblete-Echeverría, et al. 2016. Estimating Evapotranspiration of an Apple Orchard Using a Remote Sensing-Based Soil Water Balance. *Remote Sens.* 8(3): 253. doi: 10.3390/rs8030253.
- Papadakis, D., and I. Milosavljevic. 2019. Copernicus Sentinel Benefits Study. Exploring sectoral uptake of Sentinel data within academic publications. doi: http://ears.org/Sebs/wp-content/uploads/2019/07/CopernicusSentinelBenefitsStudy_UptakeOfSentinelDataInAcademicPublications_June2019.pdf.
- Pereira, L.S., R.G. Allen, M. Smith, and D. Raes. 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agric. Water Manag.* 147: 4–20. doi: 10.1016/J.AGWAT.2014.07.031.
- Pereira, L.S., P. Paredes, R. López-Urrea, D.J. Hunsaker, M. Mota, et al. 2021. Standard single and

- 
- basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crop water requirements approach. *Agric. Water Manag.* 243: 106196. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106196.
- Pérez, J., C. Madurga del Cura, and A. Sánchez de Ribera. 2011. Influencia en la disposición de un contador en su metrología. XXIX Congr. Nac. Riegos. doi: <http://www.aeryd.es/empresas/aeryd/trabajos/2011-C-19.pdf>.
- Piedelobo, L., D. Hernández-López, R. Ballesteros, A. Chakhar, S. Del Pozo, et al. 2019. Scalable pixel-based crop classification combining Sentinel-2 and Landsat-8 data time series: Case study of the Duero river basin. *Agric. Syst.* 171: 36–50. doi: 10.1016/j.agry.2019.01.005.
- Rouse, J., R. Haas, D. Deering, and J. Schell. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Goddard Space Flight Center NASA.
- Tasumi, M., and R.G. Allen. 2007. Satellite-based ET mapping to assess variation in ET with timing of crop development. *Agric. Water Manag.* 88(1–3): 54–62. doi: 10.1016/j.agwat.2006.08.010.
- Torres, E.A. 2010. El modelo FAO-56 asistido por satélite en la estimación de la evapotranspiración en un cultivo bajo estrés hídrico y suelo desnudo Torres Prieto, E.A., 2010. El modelo FAO-56 asistido por satélite en la estimación de la evapotranspiración en un cultivo baj. Tesis Univ. Castilla-La Mancha. doi: <https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=894945>.
- UN. 2015. 70/1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development Preamble. General Assembly, New York.
- Vuolo, F., G. D'Urso, C. De Michele, B. Bianchi, and M. Cutting. 2015. Satellite-based irrigation advisory services: A common tool for different experiences from Europe to Australia. *Agric. Water Manag.* 147: 82–95. doi: 10.1016/J.AGWAT.2014.08.004.
- Weiss, M., F. Jacob, and G. Duveiller. 2020. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sens. Environ.* 236: 111402. doi: 10.1016/j.rse.2019.111402.
- Wright, J. 1982. New Evapotranspiration Crop Coefficients. *J. Irrig. Drain. Div.* 108(1): 57–74. doi: <https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/id/eprint/382>.

Instituciones participantes



Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



www.fontagro.org

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org