

INFORME TÉCNICO FINAL

PROYECTO: RG-T3387-P002 - ATN/RF-17245-RG
“Sistema de Asesoramiento al Regante (SAR): ¿cuándo regar y cuánto regar? Las Tecnologías de Información y Comunicación (TICs) como herramientas para fortalecer la capacidad de la toma de decisiones de la agricultura familiar”

Gabriel A. Angella, Claudio García, Luis M. Urbina Urbina, Juana M. López, Carolina P. Frías, César Acevedo Narvárez, Irving Paredes Martínez, Oscar Castillo Mendoza, Howard van Meer, Gabriela A. Barraza, Jairo Trad, Catriel Santillán, Paula Plomer, Juan Rufail.

2023



Códigos JEL: Q16

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 Gabriel A. Angella, Juana M. López, Carolina P. Frías, Howard van Meer, Gabriela A. Barraza, Juan Rufail (INTA de Argentina); Claudio García (INIA de Uruguay); Luis M. Urbina Urbina, César Acevedo Narváez, Irving Paredes Martínez, Oscar Castillo Mendoza (INTA de Nicaragua); Jairo Trad, Catriel Santillán, Paula Plomer (KILIMO de Argentina).

Copyright © 2023 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



Tabla de Contenidos

Abstract / Resumen	4
Antecedentes.....	5
Objetivos.....	7
Metodología.....	8
Resultados.....	11
Indicadores Técnicos	31
Hallazgos Destacados.....	33
Historias en el campo.....	33
Discusión	34
Conclusiones	37
Recomendaciones.....	38
Referencias Bibliográficas.....	39
Instituciones participantes	45



Abstract

The agricultural sector is confronted with the challenge of increasing crop yields to meet the demands of a growing global population. This challenge is not solely quantitative but also qualitative, owing to consumer expectations regarding production processes and the efficient, sustainable utilization of water, soil, energy, and other agricultural inputs. In this context, irrigation and family agriculture (FA) play pivotal roles. Approximately 324 million hectares worldwide are irrigated, constituting 20% of arable land and yielding 40% of food production. FA, as the predominant production system globally, encompasses over 90% of all agricultural holdings and supplies upwards of 80% of food. In terms of irrigation, achieving more efficient water management is crucial, not as an end in itself but as a means to sustainably boost crop yields.


The primary goal of this project is to conduct a study identifying strategies to narrow the yield gap in selected crops, through irrigation schedules tailored to specific water requirements. The fieldwork was conducted in seven pilot areas across Argentina, Nicaragua, and Uruguay, covering a potential intervention area of 5,040 hectares and approximately 1,550 potential beneficiaries. Collaborating institutions include the National Institute of Agricultural Technology (INTA, Argentina), the Nicaraguan Institute of Agricultural Technology (INTA, Nicaragua), the National Institute of Agricultural Research (INIA, Uruguay), the Institute for Sustainable Agriculture (IAS, Spain), Wageningen University (WU, The Netherlands), and KILIMO (Argentina). The project was structured into three components and nine activities.

A significant innovation of this project is the development of the Irrigation Advisory Service (SAR), which guides users in determining optimal irrigation times and quantities using climate, crop, soil data, and satellite imagery. Platforms include a website and a mobile application, both nearing the final stages of refinement. The project focused on crops like cotton, alfalfa, strawberry, pepper, bean, and tomato. Adapting methodologies for processing high-resolution satellite imagery was a considerable challenge due to varying farm sizes. Another breakthrough was using the Gradient Boosting Tree (GBT) algorithm to estimate soil water content from satellite images. The GBT effectively predicted soil moisture using variables like soil texture and bulk density, and spectral indices such as NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDWI (Normalized Differential Water Index), and MSAVI2 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index).

Key words: AgTechs, Family agriculture, Irrigation.

Resumen

El sector agrícola se enfrenta al desafío de aumentar el rendimiento de los cultivos para satisfacer las demandas de una población mundial en crecimiento. Este desafío no es sólo cuantitativo sino también cualitativo, debido a las expectativas de los consumidores respecto de los procesos productivos y la utilización eficiente y sostenible del agua, el suelo, la energía y otros insumos agrícolas. En este contexto, el riego y la agricultura familiar (AF) juegan papeles fundamentales.



Aproximadamente 324 millones de hectáreas en todo el mundo son irrigadas, lo que constituye el 20% de la tierra cultivable y produce el 40% de la producción de alimentos. La AF, como sistema de producción predominante a nivel mundial, abarca más del 90% de todas las explotaciones agrícolas y suministra más del 80% de los alimentos. En términos de riego, lograr una gestión más eficiente del agua es crucial, no como un fin en sí mismo, sino como un medio para aumentar de manera sostenible el rendimiento de los cultivos.

El objetivo principal de este proyecto es realizar un estudio que identifique estrategias para reducir la brecha de rendimiento en cultivos seleccionados, a través de programas de riego adaptados a los requisitos de agua específicos. El trabajo de campo se llevó a cabo en siete áreas piloto en Argentina, Nicaragua y Uruguay, cubriendo un área potencial de intervención de 5.040 hectáreas y aproximadamente 1.550 beneficiarios potenciales. Las instituciones colaboradoras incluyen el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, Argentina), el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA, Nicaragua), el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA, Uruguay), el Instituto de Agricultura Sostenible (IAS, España), Universidad de Wageningen (WU, Países Bajos) y KILIMO (Argentina). El proyecto se estructuró en tres componentes y nueve actividades.

Una innovación significativa de este proyecto es el desarrollo del Servicio de Asesoramiento al Regante (SAR), que aconseja a los usuarios en la determinación de tiempos y cantidades óptimos de riego utilizando datos climáticos, de cultivos, de suelo e imágenes satelitales. Las plataformas incluyen un sitio web y una aplicación móvil, ambas acercándose a las etapas finales de perfeccionamiento. El proyecto se centró en los siguientes cultivos: algodón, alfalfa, fresa, pimiento, frijol y tomate. Adaptar metodologías para procesar imágenes satelitales de alta resolución fue un desafío considerable, debido a los diferentes tamaños de los predios. Otro avance fue el uso del algoritmo Gradient Boosting Tree (GBT) para estimar el contenido de agua del suelo a partir de imágenes de satélite. El GBT predijo eficazmente la humedad del suelo utilizando variables como la textura y la densidad aparente del suelo, e índices espectrales como NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada), NDWI (Índice de agua diferencial normalizado) y MSAVI2 (Índice de vegetación ajustado de suelo modificado).

Palabras Clave: AgTechs, Agricultura familiar, Riego.

Antecedentes

El sector agropecuario enfrenta el desafío de incrementar el rendimiento de los cultivos ante el crecimiento de la población mundial. El reto no es sólo cuantitativo, sino también cualitativo, debido a las exigencias de los consumidores sobre los procesos de producción, el uso eficiente y sostenible del agua, el suelo, la energía y otros insumos agrícolas. Asimismo, el cambio climático incorpora una incertidumbre extra que debe tenerse en cuenta. En este escenario, la agricultura irrigada y la agricultura familiar (AF), tienen un papel central. En el mundo se riegan alrededor de 275 millones de ha, lo que representa el 20% de la superficie cultivada, que producen el 40% de



los alimentos. En Argentina la superficie con riego es de 2.100.000 ha (FAO, 2015). En Nicaragua es de 91.580 ha, en 9.063 unidades de producción. Se cultivan aproximadamente 6.279.380 ha, de las que cerca del 20% poseen potencial para riego, pero sólo se aprovecha el 7,3% (MAG, 2017). En Uruguay, se riegan 242.000 ha (MGAYP, 2011). La AF es la forma de producción más extendida en el mundo, con más del 90% del total de explotaciones agropecuarias-EAPs (500 millones) y aporta el 80% de los alimentos (FAO, 2014). En América Latina y el Caribe (ALC), las EAPs familiares son 16,5 millones. En Argentina, de un total de 333.477 EAPs, 218.868 (66%) son de pequeños productores (Obschatko et al., 2007). En Nicaragua, el 83% de las EAPs son de AF (223.374 sobre 268.527) (FAO, 2014b). En Uruguay, sobre 45.000 EAPs, 25.000 pertenecen a la AF (Sganga et al., 2014).

Respecto al riego, es fundamental mejorar su manejo para incrementar el rendimiento de los cultivos de manera sostenible, evitando o limitando impactos ambientales negativos (salinización, erosión) derivados de prácticas inadecuadas. Uno de los principales factores biofísicos que causa la brecha de rendimientos es la baja disponibilidad de agua o su manejo poco eficiente. En los últimos años, la brecha de rendimientos (la diferencia entre los rendimientos alcanzables y los promedios que obtienen los agricultores) ha atraído fuertemente la atención, al punto que existe un sitio web que analiza este tema a nivel mundial (<http://www.yieldgap.org/>). En el Sistema de Riego del Río Dulce (SRRD), Santiago del Estero, Argentina, se ha calculado una brecha de rendimientos del 40% para maíz y algodón (Angella, 2016). En Uruguay no hay estudios recientes para la AF, pero datos publicados por el MGAYP indican una brecha importante en tomate, papa y frutilla. En Nicaragua la brecha de rendimientos para tomate y chiltoma (pimiento) se ha estimado en un 30%. Un aspecto importante del manejo del riego es la aplicación del agua siguiendo una programación o calendario de riego. Los agricultores raramente deciden el momento del riego en función de las necesidades de agua de los cultivos o del contenido de agua en el suelo, sino que se basan en decisiones empíricas, tales como el aspecto de los cultivos o la estimación “visual” de la humedad del suelo.

La AF tiene limitaciones para acceder a tecnologías e información acorde a sus necesidades. Las causas son diversas: las distancias entre los centros de investigación y las zonas de producción, sistemas de extensión insuficientes, baja capacidad de inversión, dificultad para acceder a créditos. El creciente acceso a Internet y a la telefonía móvil son una oportunidad para transferir información y conocimientos a la AF e integrar a los agricultores en los nuevos sistemas agroalimentarios impulsados digitalmente. A su vez, el acceso cada vez más sencillo a tecnología electrónica, transmisión de datos a distancia y datos de sensores remotos, facilita el monitoreo del clima, suelo, agua y cultivos, lo cual ayuda a la gestión sostenible de la agricultura.

Los servicios de asesoramiento de riego se han difundido en los últimos años. Están mayormente orientados a cultivos extensivos (trigo, maíz, soja, girasol, sorgo) y, en menor medida, a vid y otros árboles frutales. En este proyecto se trabajó en algodón, alfalfa, frutilla (fresa), chiltoma (pimiento), frijol y tomate. Como antecedentes de plataformas que brindan asesoramiento de



riego, se mencionan:

RiegoApp: permite el control de varios programadores, configurar riegos, ver el consumo y la presión en tiempo real, conocer datos históricos de riegos pasados.

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.iriego.riegoapp&hl=es&gl=US>

Aquadaia-app: permite saber la cantidad de agua necesaria en un cultivo para su crecimiento óptimo.

<https://www.agroes.es/agricultura/agua-riegos-regadios/1049-aquadaia-app-gratis-para-calculiar-agua-de-riego-optimo>

Kilimo app: plataforma para el manejo del riego, recomienda el riego óptimo para cada cultivo.

https://play.google.com/store/apps/details?id=com.kilimo.riego&hl=es_AR&gl=US

Ponce AgTechs: sistema de monitoreo de riego.

<https://ponceautomations.com/>

SupPlant: orientación sobre la eficiencia del uso del agua, riego, recomendaciones de riego para hoy y la próxima semana, datos climáticos actuales y previstos.

https://play.google.com/store/apps/details?id=me.supplant.dss&hl=es_AR&gl=US

GESIR-INIA web app: gestión y planificación del riego.

<http://www.inia.uy/investigaci%C3%B3n-e-innovaci%C3%B3n/programas-nacionales-de-investigaci%C3%B3n/Programa-Nacional-de-Investigaci%C3%B3n-en-Producci%C3%B3n-y-Sustentabilidad-Ambiental/GESIR---Gestor-inteligente-de-riego>

Irriga Global: servicio de gestión de riego.

https://play.google.com/store/apps/details?id=com.irrigaglobal.app&hl=es_AR&gl=US

Objetivos

Objetivo general

El objetivo general del proyecto es generar un estudio que permita identificar cómo disminuir la brecha de rendimientos en un grupo de cultivos seleccionados a través del uso de programaciones del riego ajustadas a los requerimientos de agua.

Objetivos específicos

- 1) Elaborar un diagnóstico inicial en las áreas de estudio y desarrollar la infraestructura del Sistema de Asesoramiento al Regante (SAR).
- 2) Desarrollar un estudio de un sistema de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) que constituirán las bases operativas del SAR. 3) Realizar estudios de prueba para implementar el SAR y sentar las bases para su escalamiento.

Metodología


El proyecto se organizó en tres componentes y nueve actividades.

COMPONENTE 1. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN INICIAL Y DESARROLLO DE LA INFRAESTRUCTURA DEL SAR. *Objetivo:* realizar un diagnóstico de la situación inicial en las áreas piloto y desarrollar la infraestructura del SAR. *Metodología:* el diagnóstico se hizo a través de un proceso participativo, que involucró la socialización del proyecto, el conocimiento de los actores involucrados y la definición de la línea de base. En Argentina, Nicaragua y Uruguay se establecieron las áreas piloto y el diagnóstico inicial permitió conocer las condiciones de referencia de los productores y sus sistemas de producción. El flujo de información del SAR se basó en una infraestructura conformada por una red de observación agrometeorológica, una base de datos para cada una de las áreas piloto, herramientas y procedimientos para garantizar el flujo y la comunicación de la información. Basado en el concepto del *big data* se diseñó e implementó una base de datos geográfica multiusuario, que recopiló y sistematizó información derivada del satélite Sentinel 2 e información de clima, suelos y cultivos. Con esta información de base y mediante protocolos metodológicos acordados, se generaron los *inputs* del SAR. Las actividades de este componente fueron las siguientes:

Actividad 1.1 Elaborar un diagnóstico inicial de las áreas piloto en Argentina, Nicaragua y Uruguay. *Objetivo:* delimitar y caracterizar las áreas piloto en cada uno de los países participantes. *Metodología:* las áreas pilotos se delimitaron espacialmente y se caracterizaron relevando áreas de producción, cultivos, manejo agronómico y manejo del riego, utilizando imágenes satelitales y GPS. Se consultaron fuentes primarias de datos y se realizaron entrevistas a productores, asesores y responsables de la administración del riego. Se definió un protocolo estándar de recolección de los datos de campo. *Responsables:* INTA Argentina, INIA, INTA Nicaragua. *Colaboradores:* IAS, Universidad de Wageningen. Se consultó la siguiente bibliografía: Angueira et al (2007), Caumo et al (2014), Municipalidad de El Sauce (2021), INIDE-MAGFOR (2013), INDEC (2010 y 2018), INE-ROU (2011), Intendencia Municipal de Canelones (2021), Intendencia Municipal de San José (2021), Ministerio de Agricultura y Pesca-ROU (1979), MGAP (2021), Universidad Nacional Autónoma de México (2022), Vervelde (2018).

Producto 1: Nota Técnica con el informe técnico del diagnóstico inicial de las áreas piloto.

Actividad 1.2. Elaborar un diagnóstico y modernizar/ampliar la red de estaciones meteorológicas locales. *Objetivo:* Conformar una red de estaciones meteorológicas en funcionamiento *on-line*. *Metodología:* se analizaron las características de las estaciones meteorológicas ya instaladas y las variables climáticas que registran, se relevaron posibles limitaciones de infraestructura y de manejo de la red, como así también su distribución espacial y cobertura. Se instalaron seis nuevas estaciones meteorológicas automáticas en las áreas piloto del proyecto y se realizaron las acciones necesarias para mejorar su conectividad *on-line*. También se definieron los protocolos



de control, transmisión y almacenamiento de datos. *Responsables:* INTA Argentina, INIA, INTA Nicaragua. Se consultó la siguiente bibliografía: Allen et al (2006), Hargreaves et al (1985), Smith (1999), Vera et al (2006), WMO (2018).

Producto 2. Nota Técnica con el informe técnico del protocolo de control, transmisión y almacenamiento de datos.

Actividad 1.3. Diseñar e implementar la base de datos del SAR. *Objetivo:* implementar la base de datos del SAR. *Metodología:* En una etapa inicial se recopilaron datos existentes de diferentes fuentes sobre variables de suelo requeridas por los modelos de balance hídrico y programación del riego (cobertura, relieve, textura, capacidad de retención hídrica) y se complementaron con datos obtenidos por muestreo a campo. Luego se desarrollaron los *scripts* en la plataforma *Google Earth Engine* para el procesamiento de datos y obtención de mapas de clima (temperatura, precipitación y evapotranspiración de referencia), humedad de suelos, índices de vegetación y cultivos a partir de información derivada de la red de estaciones meteorológicas, el satélite Sentinel 2 y datos de campo. Finalmente, se diseñó una base de datos geográficas relacional multiusuario, usando el software *open source* y *freeware PostgreSQL* con extensiones espaciales *PostGIS* y se implementaron interfaces de usuarios para el acceso remoto a las bases de datos, con la asignación de roles y permisos de acceso. *Responsables:* INTA Argentina, INIA, INTA Nicaragua. *Colaboradores:* Kilimo S.A. Se consultó la siguiente bibliografía: Harvard Humanitarian Initiative (2021), Open Source Geospatial Content Management System (2021), PostGIS Spatial and Geographic Objects for PostgreSQL (2021).

Producto 3: Nota Técnica con el informe técnico descriptivo de la infraestructura del SAR.

COMPONENTE 2. DESARROLLO DE LAS TICS DEL SAR. *Objetivo:* desarrollar la aplicación de telefonía móvil y el sitio web del SAR. *Metodología:* se desarrolló un software para elaborar balances hídricos y calendarios de riego (base conceptual del SAR). Se desarrolló una aplicación de telefonía móvil (*app*) y un sitio web para brindar recomendaciones sobre momentos y dosis de riego. Las actividades de este componente fueron las siguientes:

Actividad 2.1. Calibrar y validar datos de humedad de suelo obtenidos mediante sensores de campo y remotos. *Objetivo:* ajustar los datos de humedad de suelo obtenidos por sensores de diversos tipos (de campo y remotos). *Metodología:* se ajustaron datos de humedad del suelo estimados por sensores de campo y remotos vs. datos obtenidos por muestreos gravimétricos. Para el caso de los sensores de campo, el ajuste estadístico entre valores observados y estimados se realizó mediante el uso de indicadores estadísticos, tales como Coeficiente de Determinación (R^2), el Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE). *Responsables:* INTA Argentina, INIA, INTA Nicaragua. Se consultó la siguiente bibliografía: Abanto-Rodríguez (2020), Ali et al (2015), Angella et al (2016), Greifeneder et al (2021), Enciso et al (2007), Lievens et al (2017), Lizarazo et al (2017), Marano et al (2012), Martin et al (2010), Qiu et al (2019), Revelo Luna et al (2020), Schilardi et al (2015), Silva et al (2012), Solorza (2013), Ulaby et al (1978), Zhang et al (2016), Palacios-Vélez et al (2011).



Producto 4. Nota técnica con el informe técnico sobre el ajuste de datos de humedad de suelo obtenidos por diferentes tipos de sensores.

Actividad 2.2. Calibrar y validar un modelo de cálculo de balance hídrico. *Objetivo:* disponer de un software para definir las alertas de riego. *Metodología:* el software tiene un lenguaje de programación compatible con las TICs a desarrollar. Las variables agronómicas *inputs* del modelo son: características de los predios, de los cultivos, fecha de siembra, duración de las fases fenológicas en días calendario, contenido hídrico del suelo al momento de la siembra, características del suelo (textura, propiedades de retención hídrica, capas limitantes) y el clima (datos diarios de radiación o heliofanía, humedad relativa media, temperatura media, mínima y máxima, viento, lluvia). *Responsables:* INTA Argentina, INIA, INTA Nicaragua. *Colaboradores:* Kilimo S.A., IAS. Se consultó la siguiente bibliografía: Allen (2011), Baker et al (1983), Bausch (1987), Brown (1985), Calera et al (2016), Hearn et al (1984), Heilman et al (1982), Jones et al (2003), Mateos et al (2013), Neale et al (1989), Ritchie et al (1985), Steduto et al (2009), Stockle et al (2003), Wang et al (2002).

Producto 5. Nota técnica con el informe técnico sobre de las características del software.

Actividad 2.3. Desarrollar, en forma colaborativa con los beneficiarios directos, una aplicación de telefonía móvil y de un sitio web. *Objetivo:* disponer de las TICs que constituirán las interfaces del SAR. *Metodología:* El sitio web cuenta con un visor de mapas que muestra las estaciones meteorológicas, los mapas resultantes de la interpolación de datos de variables climáticas (precipitación acumulada, temperatura, etc.), las fincas en las que se hizo el seguimiento de cultivos, humedad de suelo, estado de los cultivos y necesidades de riego, derivado de productos de satélites. *Responsables:* INTA Argentina, INIA, INTA Nicaragua. *Colaboradores:* Kilimo S.A. Se consultó la siguiente bibliografía: Altobelli et al (2018), Lorite et al (2012), Tapsuwan et al (2015), Unver et al (2020), Vuolo et al (2015).

Producto 6. Nota técnica sobre el estudio de la aplicación de telefonía móvil de SAR.

Producto 7. Nota técnica sobre el estudio del sitio web del SAR.

COMPONENTE 3. IMPLEMENTACIÓN, IMPACTO Y ESCALAMIENTO EL SAR. *Objetivo:* aplicar el SAR en las áreas piloto de ejecución del proyecto, cuantificar su impacto y sentar las bases para su escalamiento. *Metodología:* las áreas pilotos se implementaron en campos de productores. Se establecieron las bases para escalar las innovaciones y se difundieron los resultados del proyecto. Las actividades de este componente son las siguientes:

Actividad 3.1. Aplicar el SAR en las áreas piloto de ejecución del proyecto. *Objetivo:* cuantificar el impacto del SAR. *Metodología:* se hizo una cuantificación preliminar del impacto del SAR, usando indicadores objetivamente verificables. *Responsables:* INTA Argentina, INIA, INTA Nicaragua. *Colaboradores:* Kilimo S.A., Universidad de Wageningen, IAS.

Producto 8. Nota Técnica conteniendo un informe técnico sobre el uso del SAR y la cuantificación de su impacto.



Actividad 3.2. Desarrollar la estrategia de escalamiento del SAR. *Objetivo:* disponer de un plan de negocios que permita escalar el SAR una vez finalizada la financiación del proyecto. *Metodología:* se elaboró un modelo de negocios, basado en el método CANVAS. *Responsables:* INTA Argentina, INIA, INTA Nicaragua, Kilimo S.A.

Producto 9. Nota Técnica conteniendo un informe técnico sobre el modelo de negocios para el escalamiento del SAR.

Actividad 3.3. Difundir los resultados. *Objetivo:* elaborar y concretar un plan de difusión de los resultados del proyecto. *Metodología:* se realizaron reuniones y talleres internos y externos, jornadas, webinars, seminarios. La difusión se hizo a productores, profesionales de organismos públicos, asesores del sector privado, académicos, investigadores y estudiantes. Se elaboraron productos diversos: las Notas Técnicas (Productos) propias del proyecto, boletines de difusión, memorias de talleres y seminarios, minutas de reuniones; informes de avance de tesis de posgrado en ejecución; publicaciones con referato; sitio web, webstory, FONTAGRO Tech y Póster del proyecto, publicaciones en redes sociales y en los sitios web de las instituciones participantes. *Responsables:* INTA Argentina, INIA, INTA Nicaragua, IAS, Kilimo S.A., Universidad de Wageningen.

Producto 10. Notas técnicas conteniendo diferentes productos del conocimiento y difusión: informes y boletines del proyecto, publicaciones en congresos, tesis de posgrado.

Resultados

COMPONENTE 1. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN INICIAL Y DESARROLLO DE LA INFRAESTRUCTURA DEL SAR.

Resultado 1.1. Áreas piloto establecidas y caracterizadas

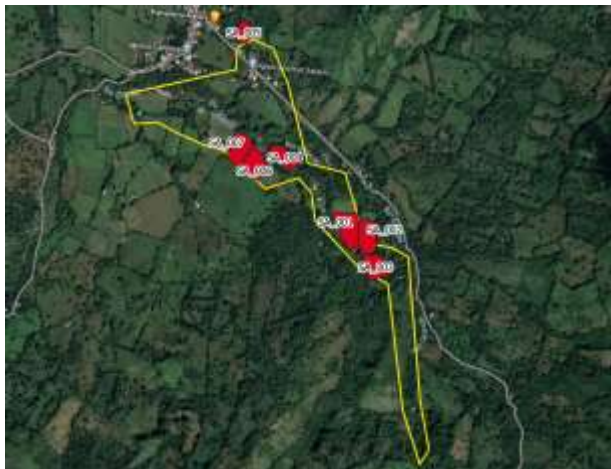
El Medio de Verificación (MDV) del Resultado 1.1 es el Producto 1. Se caracterizaron las áreas piloto en las cuales se desarrolló el proyecto, considerando aspectos socioeconómicos, climáticos, edáficos, productivos y del manejo del agua. En lo concerniente a este último punto, los principales problemas detectados fueron los siguientes:

Argentina: sobre irrigación y baja eficiencia de riego; turnados fijos de entrega de agua, lo cual limita poder regar en los momentos en que los cultivos lo necesitan; falta de aplicación de conceptos técnicos para definir el momento de riego y la dosis a aplicar; dificultades para acceder a créditos o financiamiento que permitan modernizar el riego en la finca; necesidad de mejorar la sistematización de suelos para el riego.

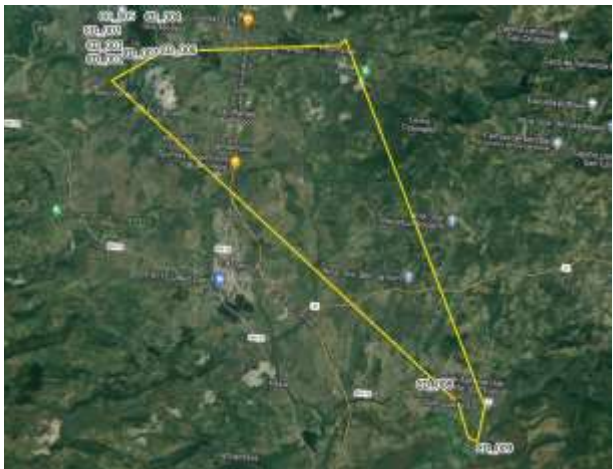
Nicaragua: la demanda de agua de los cultivos es mayor al agua disponible; limitación de fuentes de agua; sistemas de riego anticuados y poco eficientes; poco conocimiento sobre el régimen de riego de los cultivos y de los factores climáticos que determinan la necesidad de riego; la variabilidad climática (fenómeno de El Niño) limita la expansión de las áreas de riego; los regantes



se ven obligados a reducir las áreas irrigadas por falta de agua en épocas de verano. Uruguay: la cantidad del agua en los predios en muchos casos no es suficiente; presencia de elementos químicos que afectan su calidad para el uso en el riego; se necesita mejorar las capacidades para la gestión y fuentes de acceso al agua y, también, aplicar los fundamentos técnicos del riego, en aspectos agronómicos e hidráulicos. Las áreas piloto del proyecto se muestran en la Figura 1.



El Sauce, León, Nicaragua



Ciudad Darío, Nicaragua



Tisma, Masaya, Nicaragua

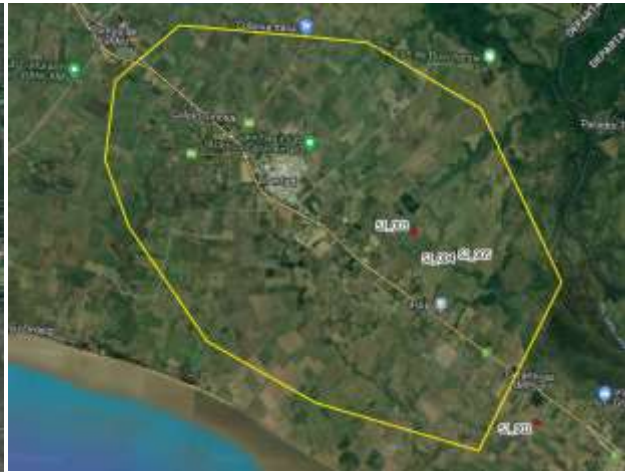


Colonia El Simbolar, Santiago del Estero, Argentina

Figura 1. Áreas piloto y fincas de seguimiento de cultivos en Nicaragua, Argentina y Uruguay.



Nueva Francia, Santiago del Estero, Argentina



San José, Uruguay



Canelones, Uruguay

Figura 1 (cont.). Áreas piloto y fincas de seguimiento de cultivos en Nicaragua, Argentina y Uruguay.

El documento completo del Producto 1 está disponible en:

https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/Proy_FONTAGRO_AgTech_19037_Nota_t%C3%A9cnica_Producto_1_3_mar_2022.pdf

Resultado 1.2. Redes de información agrometeorológicas fortalecidas

El MDV del Resultado 1.2 es el Producto 2. Se describieron las características de las estaciones meteorológicas convencionales y automáticas ubicadas en las áreas de influencia del proyecto; se abordó el concepto de metadato y los distintos tipos; se elaboró un protocolo sobre los datos meteorológicos necesarios para calcular la evapotranspiración de referencia; se hizo una descripción de las estaciones meteorológicas activas, al momento del inicio del proyecto, en las áreas piloto de Argentina, Nicaragua y Uruguay.

A través del proyecto se adquirieron seis estaciones meteorológicas automáticas, que se

instalaron en las áreas piloto San José y Canelones (Uruguay), Tisma y El Sauce (Nicaragua) y Colonia El Simbolar y Nueva Francia (Santiago del Estero, Argentina). Además de los beneficios directamente relacionados al proyecto (mejorar la estimación de los requerimientos de agua de los cultivos que se monitorean en las áreas piloto), las estaciones brindan servicios adicionales, de interés para los agricultores, tales como: estimar, de acuerdo a las tendencias de las variables meteorológicas, si se darán condiciones predisponentes para la aparición de insectos, plagas o enfermedades; definir el momento de corte de cultivos y pasturas para ensilado o enfardado, según la humedad atmosférica; definir el momento adecuado de aplicación de fitosanitarios, de acuerdo a la intensidad y dirección del viento. Se benefician 400 productores en Uruguay, 250 en Nicaragua y 900 en Argentina. Cinco de las estaciones tienen acceso online. La Figura 2 muestra la instalación de la estación meteorológica de El Sauce, León (Nicaragua).



Figura 2. Instalación de la estación meteorológica automática en El Sauce, León (Nicaragua).

El documento completo del Producto 2 está disponible en:

https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/Proy_FONTAGRO_AgTech_19037_Nota_t%C3%A9cnica_Producto_2_3_mar_2022.pdf

Resultado 1.3. Base de datos del SAR implementada

El MDV del Resultado 1.3 es el Producto 3. Se describió la Base de Datos Geográfica (GDB), diseñada para almacenar los datos de un conjunto de entidades espaciales. La Implementación de la GDB se realizó en el sistema gestor de bases de datos de acceso libre PostgreSQL, PostGIS. Para definir la plataforma de funcionamiento, se especificó la infraestructura tecnológica que dio soporte al sistema. Se presentaron tablas y diagramas detallados de la conformación y el funcionamiento de la GDB. Adicionalmente, se dieron detalles sobre la seguridad informática, el soporte informático y las tareas de mantenimiento del servidor. El diseño de la base de datos se realizó teniendo en cuenta las especificaciones de los requerimientos del SAR. La Figura 3 muestra

el diseño conceptual de la base de datos, a través del cual se representan las Entidades, de las cuales es necesario almacenar información, el tipo de relación entre ellas y la cardinalidad de las mismas: uno a uno, se simboliza como 1.1 (una instancia de una entidad A se relaciona con una instancia de la entidad B) y uno a muchos, se simboliza como 1..* (una instancia de una entidad A se relaciona con varias instancias de la entidad B).

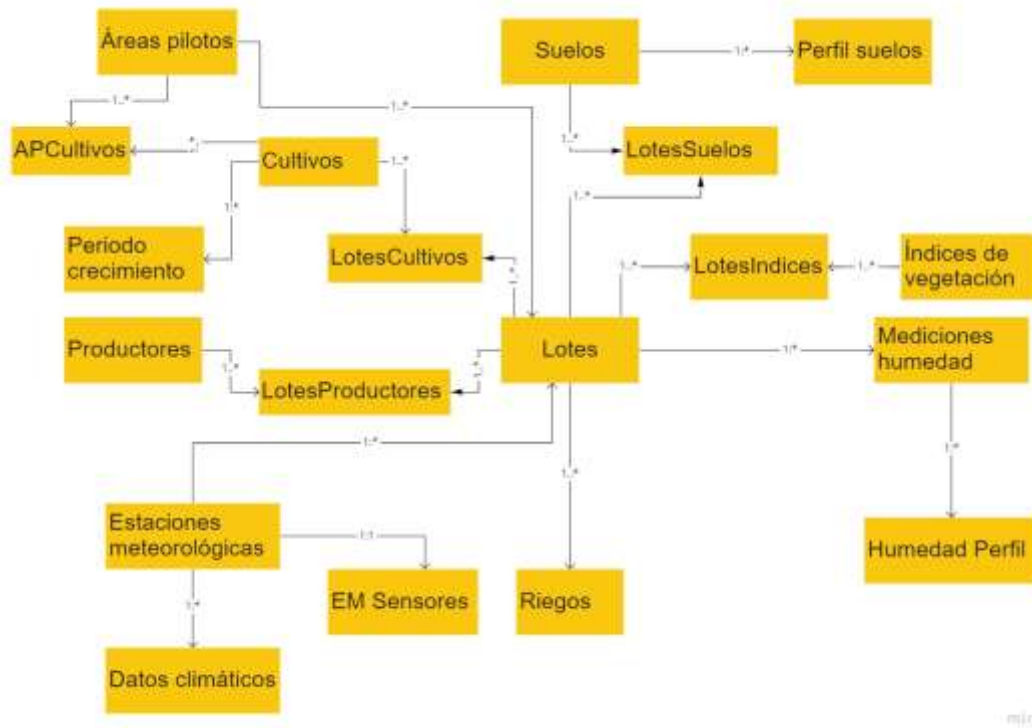


Figura 3. Diseño conceptual de la base de datos a escala de Lotes

Posteriormente se especificó el diseño lógico de la base de datos (Figura 4), definiéndose para cada una de las entidades, su geometría, atributos, tipo de datos, unidades de medida y los dominios (valores codificados y rangos) como posibles valores de los atributos.

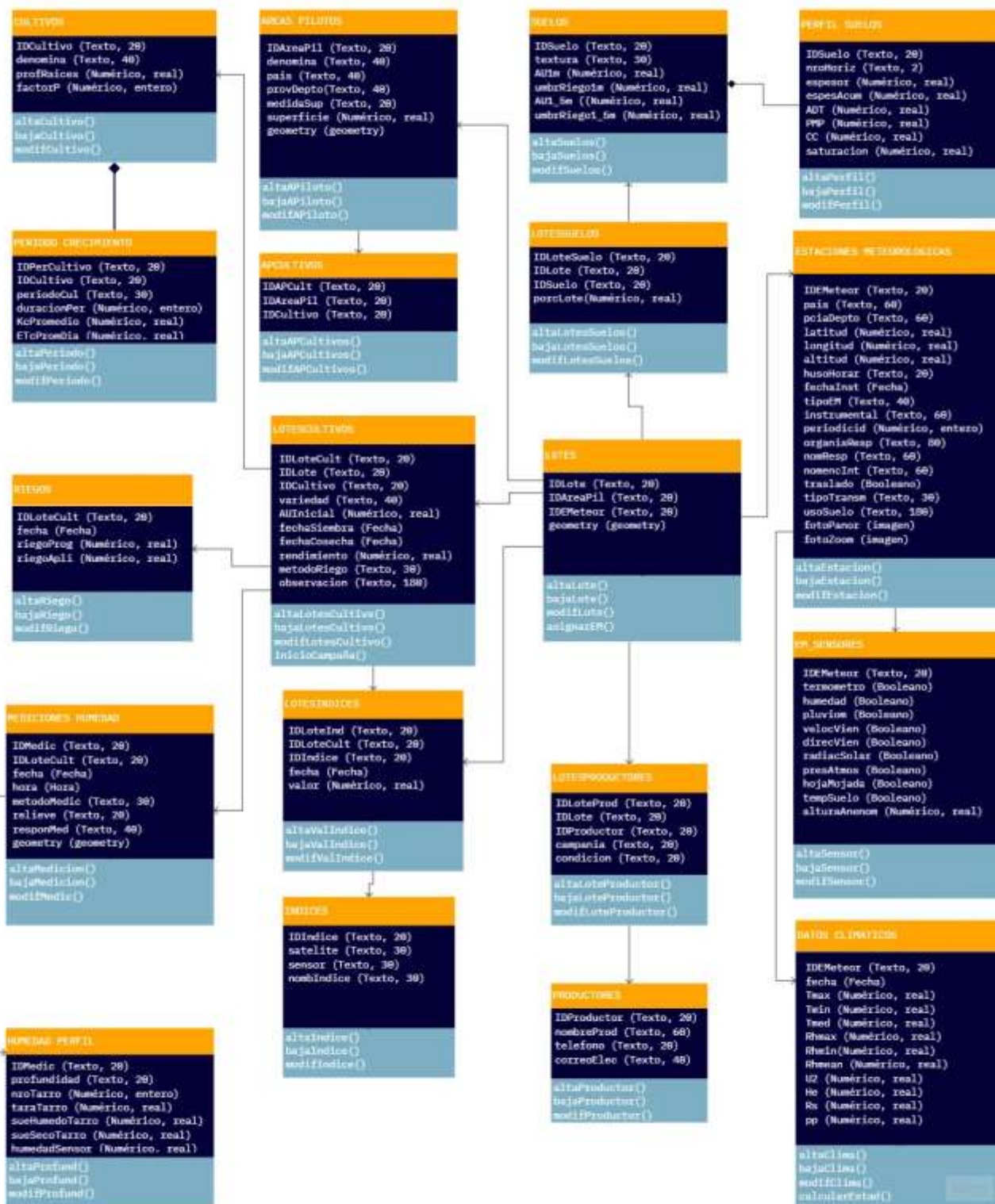


Figura 4. Diseño lógico de la base de datos

El documento completo del Producto 3 está disponible en:

https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/Proy_FONTAGRO_AgTech_19037_Nota_t%C3%A9cnica_Producto_3_3_mar_2022.pdf

COMPONENTE 2. DESARROLLO DE LAS TICS DEL SAR.

Resultado 2.1. Datos de humedad de suelo obtenidos por sensores de campo y remotos, ajustados

El MDV del resultado 2.1 es el Producto 4. A continuación se presentan los principales resultados.

Ajuste de datos de humedad de suelo estimados con sensores de campo

El objetivo fue comparar los datos de humedad de suelo obtenidos por sensores tipo de capacitancia, respecto de datos obtenidos por muestreos gravimétricos y analizar el grado de ajuste logrado. Se usaron sensores marca Decagon Modelo Teros I10 (70 MHz). En el Área piloto San José (Uruguay) se hizo el seguimiento de humedad en cultivos de frutilla (*Fragaria Sp.*) implantados en los predios de los productores Sres. Parodi, Figueira y López mientras que en el Área Piloto de Canelones (Uruguay) se siguió un cultivo de pimiento (*Capsicum annum*), en el predio del Sr. Fernández. La figura 5 muestra los sensores conectados al datalogger en un cultivo de frutilla regado por goteo.



Figura 5. Sensores Decagon y datalogger Meter Group en cultivo de frutilla, San José, Uruguay.

A los fines de hacer una correcta evaluación de la estimación de la humedad del suelo por los sensores, se usaron tres indicadores estadísticos: el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del



error cuadrático medio (RMSE) y la raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE). El R^2 da una indicación de la bondad de ajuste (precisión con la que los puntos de datos se encuentran en la línea de regresión) y varía entre 0 y 1, tomando el valor de 1 cuando el ajuste es perfecto. El RMSE representa una medida general de la diferencia absoluta entre valores observados y estimados, toma la misma unidad de la variable considerada y varía entre 0 e infinito. Valores cercanos a 0 indican buen desempeño; cuanto más pequeño es un valor RMSE, más cercanos son los valores estimados y observados. El NRMSE se expresa como porcentaje; el ajuste se considera excelente cuando es menor al 10%, bueno entre 10 y 20%, aceptable entre 20 y 30% y pobre cuando es mayor que 30%.

Calibración

En la Tabla 1 se presentan los cultivos, el rango de fechas de los muestreos, el número de muestreos y el tamaño de la muestra, en los cuatro predios en los que se hizo el seguimiento de humedad. En todos los casos, los datos corresponden a las tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60). La Tabla 2 muestra los valores de los indicadores para cada predio.

Tabla 1. Períodos de fechas de muestreo de humedad, número muestreos y tamaño de la muestra usados para la calibración, en cada predio de seguimiento.

Predio	Cultivo	Períodos de muestreo	Número de muestreos	Tamaño de la muestra
Parodi	Frutilla	19/8/2022 al 12/12/2022	7	21
Figueira	Frutilla	11/8/2022 al 21/12/2022	7	21
López	Frutilla	19/8/2022 al 12/12/2022	7	21
Fernández	Pimiento	19/3/2023 al 2/5/2023	3	9

Tabla 2. R^2 , RMSE y NRMSE para cada predio. Proceso de calibración.

Predio	R^2	RMSE	NRMSE (%)
Parodi	0,881	0,040	9,7
Figueira	0,957	0,025	5,9
López	0,737	0,025	7,4
Fernández	0,782	0,005	1,2

En todos los casos, tanto el RMSE como el NRMSE indicaron un muy buen ajuste. El R^2 mostró buenos a muy buenos ajustes. Considerando los buenos ajustes logrados sin necesidad de



cambiar los parámetros de la calibración de fábrica de los sensores, se siguió con el proceso de validación, usando otros conjuntos de datos.

Validación

En la Tabla 3 se presentan los cultivos, el rango de fechas de los muestreos, el número de muestreos y el tamaño de la muestra, en los cuatro predios en los que se hizo el seguimiento de humedad. En todos los casos, los datos corresponden a las tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60). La Tabla 4 muestra los valores de los indicadores para cada predio.

Tabla 3. Períodos de fechas de muestreo de humedad, número muestreos y tamaño de la muestra usados para la validación, en cada predio de seguimiento.

Predio	Cultivo	Período de muestreo	Número de muestreos	Tamaño de la muestra
Parodi	Frutilla	16/1/2023 al 10/6/2023	8	24
Figueira	Frutilla	25/1/2023 al 10/6/2023	8	24
López	Frutilla	16/1/2023 al 10/6/2023	8	24
Fernández	Pimiento	19/5/2023 al 10/6/2023	3	9

Tabla 4. R^2 , RMSE y NRMSE para los datos de cada predio. Proceso de validación.

Predio	R^2	RMSE	NRMSE (%)
Parodi	0,756	0,028	7,9
Figueira	0,720	0,015	3,7
López	0,660	0,016	4,5
Fernández	0,621	0,008	2,0

Como para la calibración, tanto el RMSE como el NRMSE indicaron un muy buen ajuste. Por su parte, el R^2 mostró aceptables a buenos ajustes, menos sólidos que en la calibración.

Análisis general de los datos

En la Tabla 5 se presentan los valores medios, mínimo y máximo de los indicadores, para todos los datos usados en calibración y validación (153 pares de muestras).


Tabla 5. valores medios, mínimo y máximo de R², RMSE y NRMSE para todos los datos de humedad de suelo observados y estimados en las áreas piloto de Uruguay.

Indicador	Promedio	Mínimo	Máximo
R ²	0,757	0,621	0,957
RMSE	0,020	0,005	0,040
NRMSE (%)	5,28	1,2	9,7

Para el RMSE, al estar expresado el contenido hídrico en m³ m⁻³, el valor promedio (0,020) significa una diferencia del 2,0%, referido al contenido volumétrico de agua. El NRMSE no superó en ningún caso el 10%. Los valores de los indicadores muestran que los sensores Decagon Modelo Teros I10 brindaron datos suficientemente precisos, sin necesidad de cambiar los parámetros de la ecuación de calibración de fábrica. El ajuste entre valores observados y simulados (especialmente el R²) podría mejorarse aplicando ciertas correcciones. Una de ellas es revisar la instalación de los sensores, para comprobar si se logró un adecuado contacto con el suelo, lo cual suele ser problemático. Otro aspecto importante sería disponer de un mayor rango de datos de humedad a los registrados en las parcelas. Las mediciones se hicieron en cultivos comerciales regados por goteo, en los que la humedad se mantuvo en valores altos durante todo el ciclo (entre el 30% y el 45% HV aproximadamente), no disponiéndose de datos en condiciones de suelo más seco.

Ajuste de datos de humedad de suelo estimados con sensores remotos

Se analizaron las limitaciones y potencialidades de los productos derivados de imágenes satelitales para la estimación de la humedad del suelo y su uso práctico en la toma de decisiones de riego. El área de estudio fueron las siete áreas piloto del proyecto (Figura 1). El set de datos contiene información sobre características físicas de suelos (densidad aparente, textura) e índices espectrales derivados de Sentinel 2, de 57 lotes de cultivos de algodón, alfalfa, frijol, chiltoma (pimiento) tomate y frutilla en las áreas piloto de Argentina, Nicaragua y Uruguay. Se realizaron mediciones de humedad de suelos aproximadamente cada 14 días, en el período julio del 2021 a marzo del 2023, a diferentes profundidades (según la profundidad de exploración radicular de los cultivos). Los intervalos de muestreo fueron: algodón 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 cm; alfalfa 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100, 100-125, 125-150 cm; frutilla 0-15, 15-25 y 25-40 cm; frijol y chiltoma 0-20 y 20-40 cm. A cada dato de humedad se le asociaron los datos de textura (contenido de arena, limo y arcilla), y densidad aparente (Dap) del suelo en la profundidad de medición, y los índices espectrales Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI), Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado (MSAVI2) e Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI), calculados a partir de un apilado de imágenes del mes anterior a la fecha de medición. El set de datos contiene 2364 registros, la variable objetivo es la humedad en porcentaje, medida por el



método gravimétrico. Los datos de textura y Dap se determinaron a través de extracciones de muestras en cada uno de los lotes; cuando no se dispuso de datos medidos de Dap, se estimaron mediante funciones de pedotransferencia (Rawls y Brakensiek 1982). Los índices espectrales se obtuvieron a través de la plataforma en la nube Google Earth Engine (GEE), mediante scripts desarrollados ad hoc. Se hizo un análisis de cada variable predictora en relación con la variable objetivo para observar cuáles de las variables están más relacionadas con la humedad y de qué forma. Cada punto representa los valores medidos de ambas variables para el set de datos completo. (Figura 6).

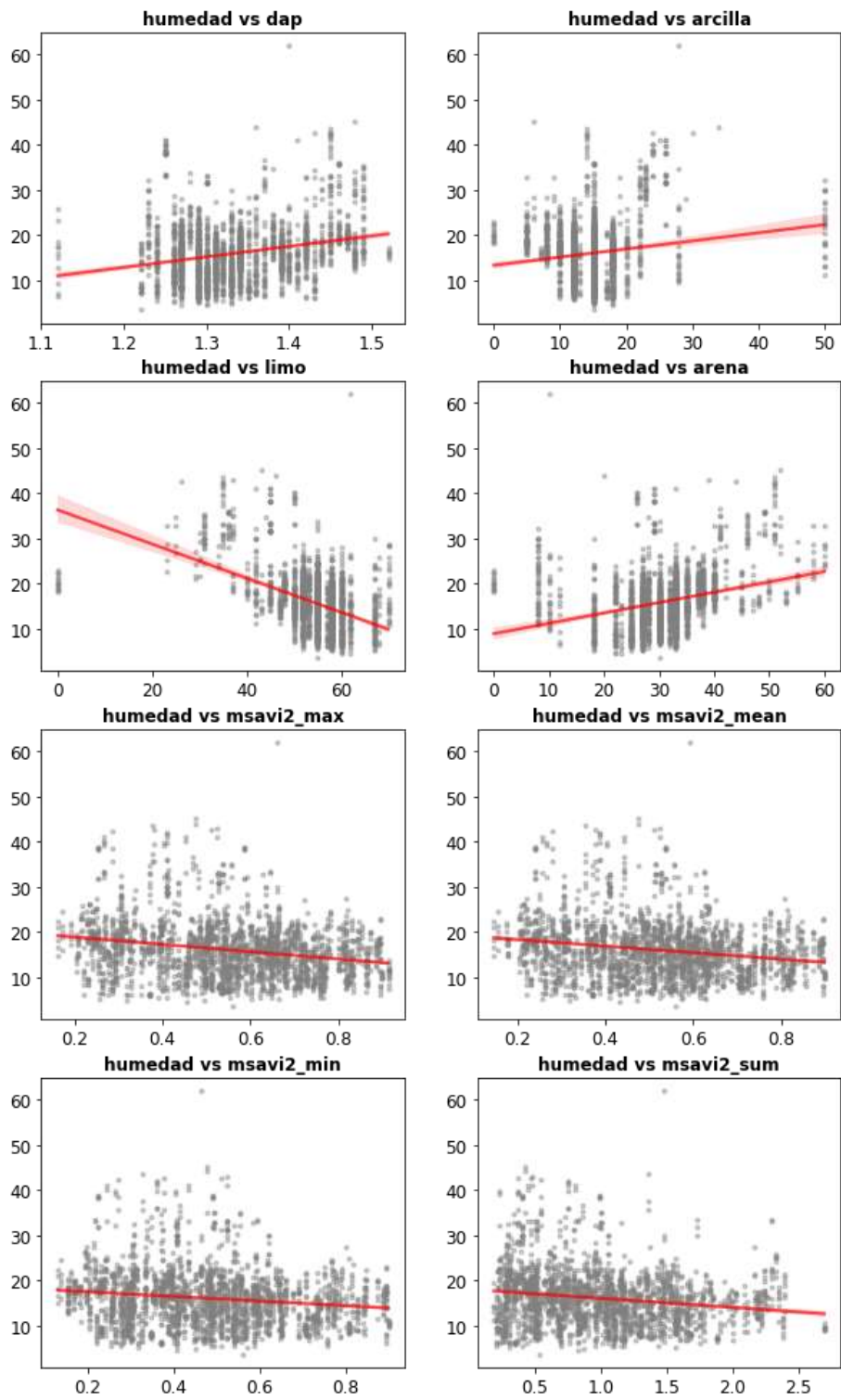


Figura 6. Relación de las variables predictoras con la humedad del suelo.

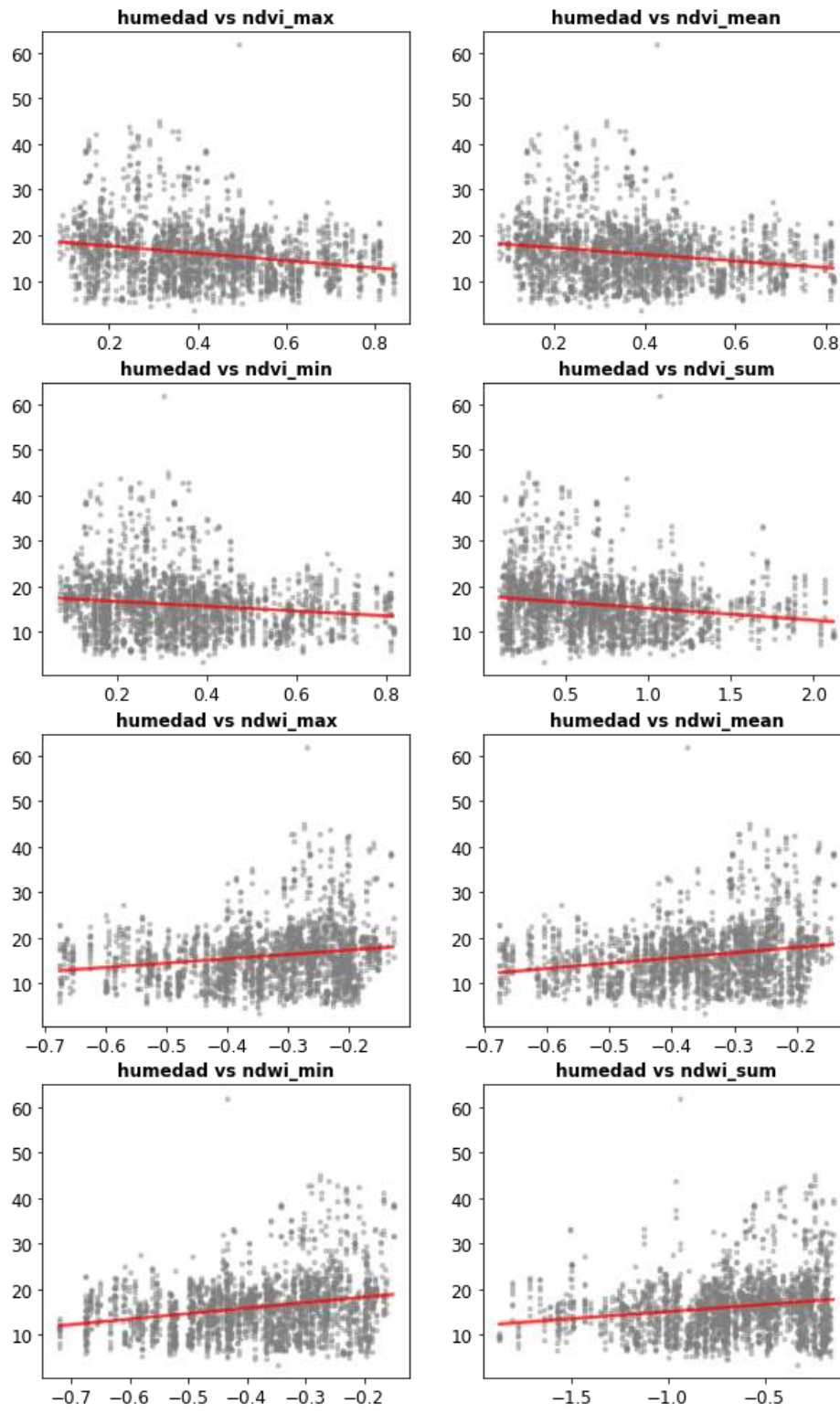



Figura 6 (cont). Relación de las variables predictoras con la humedad del suelo.



Utilizando las observaciones del set de datos se realizaron los siguientes pasos: a) se evaluó la capacidad predictiva de un modelo, para lo cual se dividieron los datos disponibles en un conjunto de entrenamiento y un conjunto de test. Se tomó el 75% de observaciones para el entrenamiento y el 25% para validación, de forma aleatoria-estratificada; b) se seleccionó el algoritmo Gradient Boosting Tree (GBT) para entrenar el modelo de estimación de humedad; c) se ajustaron los hiperparámetros del modelo GBT, para luego proceder a hacer el ajuste con los datos de entrenamiento; d) para evaluar un modelo final se hicieron las predicciones sobre las observaciones del conjunto test y se obtuvo un RMSE de 3,46%; e) se determinó la importancia de las variables por permutación, las seis predictoras más importantes son: ndwi_max, arcilla, limo, arena, msavi2_min y dap. Los resultados muestran que GBT tiene un muy buen desempeño para predecir la humedad de los suelos a partir de datos de textura, densidad aparente e índices espectrales.

El documento completo del Producto 4 está disponible en:

<https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/19037 - Producto 4 .pdf>

Resultado 2.2. Software para el cálculo del balance hídrico, operativo

El MDV del Resultado 2.2 es el Producto 5. El modelo desarrollado tiene como objetivo principal ayudar a la toma de decisiones en la gestión del agua, básicamente, definir los momentos de riego de los cultivos, de forma tal de que no se produzca disminución de rendimientos como consecuencia de estrés hídrico. Su finalidad es ser una herramienta para mejorar la eficiencia de riego y disminuir la brecha de rendimientos. El modelo realiza un balance de agua del suelo, mediante metodologías de cálculo tradicionales y/o con el apoyo de imágenes satelitales y productos derivados de satélites. Tiene un marco conceptual, componentes o módulos y algoritmos de cálculo. Está destinado a brindar servicio a productores, asesores técnicos y agentes de extensión, buscando un equilibrio entre el requerimiento de datos a ingresar, practicidad y calidad de la información generada. El modelo cuenta con cinco módulos de entrada de datos (lote, cultivo, suelo, clima, riego) y un módulo de cálculos (balance hídrico-programación del riego). A continuación, se describen los módulos, la información que se ingresa, las unidades y los procedimientos de cálculos.

Datos del lote

Se ingresan los siguientes datos:

Identificación del campo, Identificación del lote, Cultivo, Fecha de siembra, Método de riego, Tipo de explotación

Identificador del campo: es el nombre ingresado por el usuario para identificar el campo en el cual se encuentra el lote, Por ejemplo 'La María'

Identificación del lote: es el nombre ingresado por el usuario para identificar el lote, Por ejemplo 'Lote 2A'



Cultivo: inicialmente se podrá seleccionar un cultivo de un conjunto de cultivos que se monitorean en el marco del proyecto. Una vez escalado el proyecto, se podrán dar de alta otros cultivos.

Fecha de siembra: se ingresa en formato dd/mm/aaaa en el cuadro correspondiente.

Método de riego: se debe seleccionar el método de riego desde un conjunto de opciones: manto, surco, aspersión, goteo.

Tipo de explotación: se debe seleccionar el método de riego desde un conjunto de opciones: agrícola, agrícola-ganadera, lechera, citrícola y frutícola, hortícola.

Datos de cultivo

Se ingresan los siguientes datos:

Nombre del cultivo, Fecha de siembra o transplante, Profundidad del crecimiento de raíces, Duración de las etapas de crecimiento, Coeficiente de cultivo (Kc) inicial, máximo y final, Fracción de agotamiento crítico o permisible (p), Fecha de cosecha.

Nombre del cultivo: es la identificación del cultivo, que permite especificar alguna particularidad del cultivo. Por ejemplo: “algodón tardío” o “alfalfa de primavera-verano”.

Fecha de siembra o transplante: es la fecha de siembra o transplante del cultivo en el lote donde se hace el seguimiento. Se ingresa en formato dd/mm/aaaa en el cuadro correspondiente.

Profundidad del crecimiento de raíces: la profundidad inicial de las raíces se considera 0,20 metros (m) por defecto y la máxima profundidad se alcanza cuando se inicia la etapa de mediados de temporada.

Duración de las etapas de crecimiento: es la duración, expresada en días, de las cuatro etapas de crecimiento del cultivo: etapa inicial, etapa de desarrollo del cultivo, etapa de mediados de temporada y etapa final.

Coeficiente de cultivo (Kc) inicial, máximo y final: son los valores de Kc correspondientes a las cuatro etapas del cultivo: Kc inicial, Kc de desarrollo, Kc de mediados de temporada y Kc de fin de temporada.

Fracción de agotamiento crítico o permisible (p): es el contenido de humedad en el suelo a partir del cual ocurre estrés debido a que la disponibilidad de agua no es adecuada.

Datos de suelo

En este módulo se ingresan los siguientes datos.

- Textura
- Agua disponible total o agua útil (mm)
- Agua útil inicial (al momento de la siembra o plantación), en mm.

Datos de lluvia

Se ingresan datos diarios de lluvia, en mm. El modelo tiene la opción de acceder a los datos de lluvia directamente de estaciones meteorológicas automáticas, de forma remota y en tiempo real.

Datos de clima

En este módulo se calcula la evapotranspiración de referencia (ET_o) mediante la metodología FAO Penman-Monteith (FAO-PM, Allen et al 2006) a partir de datos meteorológicos de estaciones automáticas, que se acceden de manera remota en tiempo real, usando la ecuación de la Figura 8. El modelo también tiene la opción de ingresar directamente valores de ET_o medidos, estimados por FAO-PM, o por otros métodos.

Datos de riego

Se ingresan los riegos aplicados durante el ciclo del cultivo.

Cálculo del balance hídrico

El balance hídrico durante el ciclo del cultivo se calcula diariamente, usando la información de los módulos de clima, suelo, cultivo y riegos, para estimar el agua disponible sobre el umbral de riego. Cuando este valor se acerca a 0, se dispara la alarma de riego, para que el contenido de humedad no caiga por debajo del umbral. La dosis de riego a aplicar son los mm necesarios para llevar el contenido hídrico del suelo desde el umbral hasta capacidad de campo (lámina neta). Específicamente, el procedimiento de balance diario se hace con la Ecuación 1.

$$\Theta_{ur}(i) = AU (i-1) + P(i) - ET_c aj(i) - ES(i) \quad (1)$$

Donde

$\Theta_{ur}(i)$ contenido de humedad sobre el umbral de riego en la zona radicular al final del día i [mm],

AU ($i-1$) agua útil en la zona radicular al final del día anterior

P(i) precipitación en el día i [mm],

ET_c (i) evapotranspiración del cultivo en el día i [mm],

ES (i) escurrimiento superficial en el día i [mm],

También es posible ingresar datos de humedad de suelo medidos *in situ*, para verificar los cálculos del modelo y corregir, de ser necesario, el contenido de agua sobre el umbral de riego. Cuando se ingresa un valor de humedad medido (expresado en mm), el balance se retoma a partir de este dato y no a partir de AU ($i-1$).

El software estará completamente operativo entre los meses de diciembre de 2023 y enero de 2024. Previamente a su publicación, se deberá contar con las autorizaciones y avales de FONTAGRO, para cumplir con los requisitos del Manual de Operaciones y del Manual de Comunicación y Gestión del Conocimiento.

El documento completo del Producto 5 está disponible en:

https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/19037_Producto_5.pdf

Resultado 2.3. Aplicación de telefonía móvil y sitio web del SAR, operativos

Los MDV del Resultado 2.3 son los Productos 6 y 7. Las plataformas estarán completamente operativas entre diciembre de 2023 y enero de 2024. El sitio web y la *app* del SAR tienen como objetivo principal ayudar al productor a establecer la programación del riego, esto es, definir cuándo y cuánto regar. La recomendación se basa en información de cultivo, suelo, clima y contenido de humedad del suelo. Tienen un diseño sencillo y amigable, de forma tal que con una navegación simple se puede ingresar datos o acceder a la información. El estado hídrico del cultivo se muestra gráficamente a través de figuras que indican la situación siguiendo los colores de un semáforo. Cuando se indica color verde, el contenido de humedad del suelo es adecuado; cuando es color rojo, la humedad del suelo no es adecuada y el cultivo sufre estrés hídrico. El color amarillo es de advertencia, indicando que en los próximos días habría que regar, ya que la humedad del suelo se está acercando al umbral de riego. La versión del SAR para uso a escala de distrito de riego lamentablemente no pudo concretarse, por el tiempo que insumió el desarrollo de la versión a escala predial. Previamente a la publicación de las plataformas, se deberá contar con los avales de FONTAGRO, para cumplir con los requisitos del Manual de Operaciones y del Manual de Comunicación y Gestión del Conocimiento. A modo de ejemplo, en las Figuras 7a y 7b se presentan dos pantallas de la *app*: pantalla para la selección y/o delimitación del lote a monitorear y menú principal y secundario, respectivamente.



Figura 7a. Pantalla para la selección y/o delimitación del lote a monitorear (interfaz provisoria, sujeta a modificaciones según normativas de FONTAGRO).



Figura 7b. Menú principal y secundario de la *app* (interfaz provisoria, sujeta a modificaciones según normativas de FONTAGRO).

Los documentos completos de los productos 6 y 7 están disponibles en:

<https://www.fontagro.org/new/uploads/adjuntos/Proy. FONTAGRO AgTech 19037. Nota técnica Producto 6 final.pdf>

<https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/17245-19037 - Producto 7.pdf>

COMPONENTE 3. IMPLEMENTACIÓN, IMPACTO Y ESCALAMIENTO EL SAR.

Resultado 3.1. SAR en funcionamiento

El MDV del Resultado 3.1 es el Producto 8. Se realizaron pruebas iniciales del funcionamiento de las plataformas del SAR en predios de las áreas piloto y se cuantificó el impacto preliminar de su uso. El principal impacto del uso del SAR es el aumento del rendimiento de los cultivos debido a un mejor uso del agua (programaciones de riego ajustadas a las necesidades de agua). Los rendimientos aumentaron entre un 22% y un 68%, según el cultivo. Asociado a los mayores rendimientos, podría lograrse un aumento en los ingresos de los agricultores, que varía entre 580 y 41.000 USD.ha⁻¹, también dependiendo del cultivo. A escala nacional, el impacto económico asociado al uso de un SAR varía, según los cultivos, entre 1.318.200 y 128.000.000 de USD. Cincuenta y cinco hectáreas (ha) han adoptado las innovaciones de manera directa, en etapa experimental. En una primera etapa de escalamiento, pueden alcanzarse 5.040 ha. La Tabla 6 muestra los rendimientos medios de los cultivos en las áreas piloto del proyecto, los rendimientos logrados en los predios experimentales y el aumento de rendimientos.

Tabla 6. Rendimientos medios, rendimientos alcanzados mediante la aplicación del SAR e incremento de los rendimientos de los cultivos en las áreas piloto del proyecto.

Cultivo	Rendimientos medios (t.ha ⁻¹)	Rendimientos alcanzados (t.ha ⁻¹)	Incremento de rendimientos (t.ha ⁻¹)	Incremento de rendimientos (%)
Alfalfa (A)	15	20	5	33
Algodón (A)	3	5	2	67
Pimiento (U)	19	32	13	68
Frutilla (U)	19,7	30	10,3	52
Frijol (N)	1,33	1,62	0,29	22
Tomate (N)	37	59,8	22,8	62
Pimiento (N)	20	32,5	12,5	63

A: Argentina; U: Uruguay; N: Nicaragua

t: toneladas

ha: hectárea

MS: materia seca

Para alfalfa: t MS.ha⁻¹.año⁻¹

La Tabla 6 indica que las brechas de rendimientos son significativas. Lograr un uso más eficiente del agua de riego es un factor determinante para reducir las. La Tabla 7 muestra el incremento de ingresos asociados al aumento de rendimientos.

Tabla 7. Incremento de ingresos asociado al aumento de rendimientos.

Cultivo	Incremento de ingresos (USD.ha ⁻¹)
Alfalfa (A)	1.200
Algodón (A)	1.600
Pimiento (U)	16.900
Frutilla (U)	41.000
Frijol (N)	580
Tomate (N)	31.100
Pimiento (N)	22.900

Alfalfa: USD.ha⁻¹.año⁻¹

Para consolidar el uso del SAR en su etapa de escalamiento, se hacen las siguientes recomendaciones: tener en cuenta las diferentes condiciones productivas y de acceso a la información por parte de los agricultores, identificadas durante la ejecución del proyecto; generar un mayor grado de confianza con el productor para que, después de la interacción inicial con los técnicos, pueda continuar trabajando sin el apoyo continuo de las instituciones. Acompañar el trabajo en las áreas piloto durante dos o tres temporadas posteriores a la finalización del proyecto permitirá potenciar el uso del SAR y fomentar su adopción por los productores.

El documento completo del Producto 8 está disponible en:

[https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/AgTech_19037 - Producto 8.pdf](https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/AgTech_19037_-_Producto_8.pdf)

Resultado 3.2. Bases para el escalamiento del proyecto, establecidas.

El MDV del Resultado 3.2 es el Producto 9. Se presentó la estrategia general de un modelo de

negocios, cuyo objetivo es apoyar el escalamiento del SAR. Un modelo de negocios incluye, entre otros, los siguientes ítems: explicar claramente los servicios que brindan las innovaciones, sus características principales y qué ventajas competitivas tienen respecto de otras herramientas similares; identificación de potenciales clientes (análisis de mercados); estrategia de marketing; qué opciones se plantean para generar ingresos; explorar las posibilidades de financiamiento; estrategias de alianzas y actualización del producto. Para el SAR, el modelo de negocios apunta a generar ingresos suficientes para mantener en funcionamiento y actualizadas las plataformas, sin buscar ánimo de lucro por su uso, fomentando la inclusión de los agricultores a la digitalización para la toma de decisiones sobre el manejo del agua. En este marco, la captación de fondos para dar sustentabilidad y escalar el SAR provendrá de diversas fuentes: instituciones donantes, agencias gubernamentales y trabajo colaborativo con asociaciones de agricultores y consorcios de regantes. En la Figura 8 se presenta el modelo CANVAS aplicado al SAR, constituyendo una primera aproximación cualitativa de su modelo de negocios.

<p>8) Socios Claves</p> <p>Agricultores con riego. Asociaciones de productores. Consorcios de regantes. Organismos públicos nacionales y provinciales. Asesores del sector privado. Universidades.</p>	<p>7) Actividades claves</p> <p>Promoción y difusión del SAR.</p> <p>Programa de capacitaciones, orientado a los diferentes tipos de usuarios.</p> <p>Ajustes del SAR, en función de los intercambios con los usuarios.</p> <p>Evaluación y seguimiento de la adopción e impacto.</p>	<p>1) Propuesta de valor</p> <p>Servicio de alarma de riego (SAR), cuyas plataformas son un sitio web y una App de telefonía móvil, de fácil accesibilidad e interpretación de la información. Su desarrollo conceptual permite el uso en diferentes cultivos y sistemas de riego. El SAR se desarrolló teniendo en cuenta las particularidades de la Agricultura Familiar (pequeños predios, diversidad de cultivos)</p>	<p>4) Relación con los clientes</p> <p>Atención personal ante requerimiento.</p> <p>Sitio web.</p> <p>Aplicación de telefonía móvil.</p> <p>Servicios de mensajería de telefonía móvil.</p> <p>Interacción en las plataformas (ingreso de datos por parte de los usuarios).</p>	<p>2) Segmento de cliente</p> <p>Productores agrícolas con riego.</p> <p>Organismos públicos encargados de la gestión de sistemas de riego.</p> <p>Asesores privados.</p>
<p>9) Estructura de costo</p> <p>CF: Pago de renta y servicios</p> <p>CV: Salarios eventuales y servicios</p>	<p>5) Fuente de ingresos</p> <p>En una primera etapa de escalamiento y consolidación: donantes, agencias gubernamentales que apoyan las soluciones <u>AgTech</u>, trabajo colaborativo con asociaciones de productores y consorcios de regantes.</p>	<p>3) Canales</p> <p>Sitios web y redes sociales de las instituciones participantes del proyecto SAR y <u>TICs</u>.</p> <p>Canales de comunicación de asociaciones de productores y consorcios de regantes.</p>		

Figura 8. Propuesta del modelo CANVAS para el SAR.

El documento completo del Producto 9 está disponible en:

[https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/19037 - PRODUCTO 9 \(Apr\).pdf](https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/19037 - PRODUCTO 9 (Apr).pdf)

Resultado 3.3. Difusión de los resultados del proyecto, realizada

El MDV del Resultado 3.3 es el Producto 10, del cual se hicieron dos entregas, en las que se

informaron los productos del conocimiento logrados durante la ejecución del proyecto: informes y memorias de webinarios y talleres internacionales, artículos periodísticos, publicaciones y boletines de difusión en redes sociales y en sitios web de las instituciones participantes, informes de avances de tesis de posgrado, publicaciones con referato. Se puede acceder a los documentos completos del Producto 10 en:

[https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/Proy_FONTAGRO_AgTech_19037_Nota t %C3%A9cnica Producto 10 final Dic 2021.pdf](https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/Proy_FONTAGRO_AgTech_19037_Nota_t%C3%A9cnica_Producto_10_final_Dic_2021.pdf)

[https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/19037 - Producto 10 \(Apr\).pdf](https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/19037 - Producto 10 (Apr).pdf)

Indicadores Técnicos

En la Figura 9 se muestran los principales indicadores técnicos del proyecto.



Figura 9. Principales indicadores técnicos del proyecto.

En la Tabla 8 se presenta un detalle de indicadores, desglosados por categorías.

Tabla 8. Detalle de indicadores, desglosados por categorías.

Categoría	Indicador	Cantidad
Producción	Incremento de rendimiento de algodón (Argentina, %)	67
	Incremento de rendimiento de alfalfa (Argentina, %)	33
	Incremento de rendimiento de pimienta (Uruguay, %)	68
	Incremento de rendimiento de frutilla (Uruguay, %)	52
	Incremento de rendimiento de tomate (Nicaragua, %)	62
	Incremento de rendimiento de frijol (Nicaragua, %)	22
	Incremento de rendimiento de pimienta (Nicaragua, %)	63

Tabla 8 (cont.). Detalle de indicadores, desglosados por categorías.

Categoría	Indicador	Cantidad
Fortalecimiento de capacidades	Número de Informes técnicos y boletines	29
	Número personal público capacitado	43
	Número instituciones fortalecidas	6
	\$ Inversión I+D+I	459.005
	Artículos, presentaciones, publicaciones técnicas y otros productos de diseminación (número de visitas en webinarios)	2.157
	Talleres, cursos, días de campo, giras (número de talleres internos presenciales)	2
	Talleres, cursos, días de campo, giras (número de seminarios internacionales presenciales)	2
	Talleres, cursos, días de campo, giras (número de webinarios internacionales)	2
	Talleres, cursos, días de campo, giras (número de reuniones con productores)	53
	Artículos, presentaciones, publicaciones técnicas y otros productos de diseminación (número de ponencias en seminarios y webinarios internacionales)	17
	Artículos, presentaciones, publicaciones técnicas y otros productos de diseminación (número de videos)	2
	Artículos, presentaciones, publicaciones técnicas y otros productos de diseminación (notas en TV y radio)	4
	Socioeconómico	Número de diagnósticos de líneas de base
Beneficiarios (número de personas capacitadas)		194
Beneficiarios mujeres, jóvenes, pueblos originarios que participan de iniciativas)		36
Beneficiarios (número potencial de beneficiarios directos)		1.550
Superficie intervenida (área de influencia del proyecto)		5.040
Beneficios, ingresos económicos. Incremento en USD/ha. Algodón, Argentina		1.600
Beneficios, ingresos económicos. Incremento en USD/ha. Alfalfa, Argentina		1.200
Beneficios, ingresos económicos. Incremento en USD/ha. Pimiento, Uruguay		16.900
Beneficios, ingresos económicos. Incremento en USD/ha. Frutilla, Uruguay		41.000
Beneficios, ingresos económicos. Incremento en USD/ha. Tomate, Nicaragua		31.100
Beneficios, ingresos económicos. Incremento en USD/ha. Frijol, Nicaragua		580
Beneficios, ingresos económicos. Incremento en USD/ha. Chiltoma, Nicaragua		22.900



Hallazgos Destacados


Por lo observado en las áreas piloto del proyecto, el impacto de la mejora de las prácticas de riego (incremento de los rendimientos de los cultivos y de los ingresos) puede dividirse en dos grandes grupos, según la caracterización de los productores. Por un lado, los agricultores que cultivan para autoconsumo y (si los disponen), venden excedentes de producción en mercados locales. En este grupo, el principal impacto de mejorar las prácticas de riego sería aportar a la seguridad alimentaria de las familias e incrementar los excedentes para comercialización. Otro grupo es el de los agricultores que tienen un nivel de tecnificación medio y sus decisiones productivas están orientadas a los mercados locales y/o nacionales. Aquí, el principal impacto de un riego más eficiente sería el incremento de los rendimientos y los ingresos de los productores. Estas realidades diferentes, a las cuales puede sumarse el distinto grado de acceso a la información por parte de los agricultores, llevaron a hacer adaptaciones durante el desarrollo del SAR. Para que una plataforma de asesoramiento de riego sea exitosa y haya una verdadera adopción, se necesita generar confianza con los productores, proceso que no siempre se cumple acabadamente.

Se identificaron temas no directamente abordados en el proyecto, pero sí estrechamente relacionados, en los que sería necesario dar mayor apoyo a los productores, tales como: diseño, operación y mantenimiento de sistemas de riego, conocimiento de la cantidad y calidad del agua que disponen y usan, la evaluación del funcionamiento de los sistemas de riego, la importancia de usar la información climática para la toma de decisiones.

Historias en el campo

Los agricultores destacaron la importancia de contar con estaciones meteorológicas que brindan información cercana a sus fincas. No solamente para usos más directamente relacionados al proyecto (estimación de las necesidades de agua de los cultivos), sino también otros, tales como: estimar, de acuerdo a las tendencias de las variables meteorológicas, si se darán condiciones predisponentes para la aparición de insectos, plagas o enfermedades; definir el momento de corte de pasturas para ensilado o enfardado, según la humedad atmosférica; definir el momento adecuado de aplicación de fitosanitarios, de acuerdo a la intensidad y dirección del viento.

Las recorridas y reuniones en las áreas piloto mostraron la necesidad de potenciar los sistemas de extensión y transferencia de los INIAs sobre numerosos aspectos relacionados al riego. Los agricultores mencionaron la necesidad de que los organismos responsables de la administración del riego inicien un proceso de modernización (tanto en la infraestructura como en su gestión), que permita acompañar las innovaciones que se desarrollan en el proyecto, que se enfocan en el manejo del riego en la parcela. También se identificó como necesario el apoyo que los INIAs puedan dar a la realización de gestiones ante otros organismos, básicamente los organismos nacionales o provinciales responsables de la gestión del riego. El interés en el proyecto



demostrado por los agricultores en las reuniones realizadas en las áreas piloto estimula a las instituciones participantes a continuar con esta línea de trabajo. Es interesante destacar tres frases expresadas por agricultores: “en nuestra comunidad, esperamos proyectos que nos ayuden a usar mejor el agua con misma la ansiedad con que los novios se esperan en el altar antes de la boda” (Nicaragua); “el buen riego es solución de muchos problemas, pero si riegas mal, es *el* problema” (Argentina); “el uso de sensores de humedad del suelo ayuda a mejorar nuestro trabajo, somos más conscientes de la cantidad de agua que estamos aplicando” (Uruguay).

Respecto de casos exitosos del uso del SAR, se logró una cuantificación preliminar de su impacto. Tal como se indica en las Tablas 6 y 7, el incremento de los rendimientos y de los ingresos, asociados al mejor uso del agua, son significativos.

Discusión

La discusión de los resultados obtenidos se refiere al Componente 2, ya que en él se desarrollaron las actividades esenciales de investigación e innovación del proyecto, específicamente las actividades 2.1 “Calibrar y validar datos de humedad de suelo obtenidos mediante sensores de campo y remotos” y 2.2 “Calibrar y validar un modelo de cálculo de balance hídrico”.

Ajuste de datos de humedad de suelo obtenidos por sensores de campo y remotos

Los sensores dieléctricos o de capacitancia estiman la permitividad dieléctrica aparente (ϵ_b) de un volumen de suelo, la cual depende principalmente de su contenido hídrico, pero está determinada también por otras propiedades de los suelos, tales como la salinidad, textura y contenido de materia orgánica. La influencia de estos factores depende de la frecuencia del campo electromagnético que generan los sensores y puede ser importante en aquellos que trabajan a frecuencias comprendidas entre 1 a 200 MHz (Schilardi et al 2015), rango en el cual opera los sensores Decagon Modelo Teros I10 (70 MHz), que se usaron en el proyecto. Los sensores tienen una ecuación de fabricación para estimar el contenido hídrico de los suelos a partir de la ϵ_b . En general las diferencias entre la humedad gravimétrica y la humedad determinada por este tipo de sensores varían entre un 10% y 15%, por lo que hay necesidad de calibrarlos para disminuir los errores de medición. La calibración y validación de sensores es un trabajo laborioso, que, en general, hay que hacer para cada sensor individualmente, para cada tipo de suelo e, incluso, para cada horizonte. Es necesario hacer una calibración fina de los sensores cuando se necesita hacer balances hídricos precisos, tarea esencialmente ligada a experimentos de investigación sobre las necesidades de agua de los cultivos. Cuando se requiere hacer un seguimiento de la humedad del suelo para tomar decisiones prácticas de riego en un cultivo comercial (objetivo central del SAR), sería más recomendable concentrar esfuerzos en estimar la capacidad de campo y el umbral de riego con la información que brindan los sensores, basando la toma de decisiones de riego en esos valores relativos (Schilardi et al 2015). Es también




muy importante su correcta instalación, siguiendo las recomendaciones del fabricante, para no generar errores mayores al propio error asociado a la ecuación de calibración de fábrica del sensor (Marano et al 2012). Los valores medios de los indicadores R^2 (0,757), RMSE (0,020) y NMRSE (5,28%) mostraron que los sensores Decagon Modelo Teros I10 brindaron datos precisos, a los fines del objetivo del proyecto, sin necesidad de cambiar los parámetros de la ecuación de calibración de fábrica.

Respecto de los sensores remotos y su aplicación en el manejo del riego, en el proyecto se introduce un enfoque basado en el aprendizaje automático para ajustar modelos que permitan predecir la humedad de los suelos a partir de datos de sensores remotos ópticos y datos de campo medidos *in situ*. La teledetección ofrece la posibilidad de realizar mediciones periódicas de la humedad del suelo. Los enfoques actuales pertenecen a dos categorías principales: los basados en la teledetección activa o pasiva por microondas y los basados en la teledetección óptica (radiación de onda corta y radiación térmica). Más allá de los enfoques de modelización más tradicionales, el aprendizaje automático o *machine learning* (ML) ofrece algunos enfoques alternativos. Debido a la gran complejidad de los modelos físicos, la popularidad del ML para la estimación basada en teledetección de parámetros biofísicos ha crecido significativamente en la última década (Ali 2015). Estos métodos presentan dos ventajas significativas: a) permiten la construcción de modelos de estimación más objetivos, basados exclusivamente en datos, independientes de los supuestos necesarios y b) permiten la combinación de datos de diferentes fuentes (como la combinación de datos ópticos, de microondas, características de suelos), aprovechando su relación con una variable objetivo.

Las tecnologías de sensores remotos en el rango de las microondas han demostrado tener el potencial de detectar y monitorear cambios relativos al contenido de humedad de una superficie a tiempos regulares y en condiciones independientes del clima y la luz solar (Solorza 2013). De allí que numerosos estudios se desarrollan utilizando, de manera complementaria, diferentes productos: SMAP - Soil Moisture Active and Passive y Sentinel-1 (Lievens et al 2017); Sentinel 1 con índices de vegetación derivados de sensores remotos ópticos para cuantificar el efecto de la condición de la vegetación en la estimación de humedad de suelo (Qiu et al 2019); Sentinel 1A, Sentinel 2A, SMAP (Lizarazo y Mancera 2017). A todos los productos disponibles, se suman los productos SAOCOM (Misión del Satélite Argentino de Observación CON Microonda), impulsada por la CONAE y el INTA, cuyo objetivo principal es estimar la humedad en el suelo.

La mayoría de los algoritmos basados en microondas se basan en el mismo principio, utilizar las propiedades dieléctricas del agua y su efecto sobre la radiación de microondas reflejada (Ulaby et al 1978). Existen muchos enfoques diferentes para la teledetección óptica, que aprovechan la relación entre la reflectancia de la superficie y los cambios en los índices de vegetación o la temperatura de la superficie (Zhang y Zhou 2016). Las ventajas de las microondas son su baja sensibilidad a las condiciones atmosféricas, la iluminación solar y las nubes, y el hecho de que existe una relación física directa entre el contenido de humedad del suelo y la energía emitida y



reflejada (Ulaby et al., 1978). Sin embargo, las mediciones también se ven influidas por el contenido de agua de la vegetación y la estructura y rugosidad de la superficie, que pueden ser difíciles de estimar. Para las estimaciones basadas en la teledetección óptica existen muchos enfoques diferentes, que se distinguen por la frecuencia temporal de los productos. Las principales ventajas de estos métodos son los numerosos satélites ópticos existentes y la gran disponibilidad de datos en diferentes resoluciones espaciales y espectrales. Los métodos basados en la luz visible y el infrarrojo cercano suelen aprovechar las propiedades de reflectancia de la superficie del suelo desnudo para el que los estudios han mostrado una correlación negativa de la reflectancia en las bandas de absorción de agua y el contenido de humedad del suelo. Debido a esta dependencia, varios índices de sequía, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) o el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), pueden servir como aproximación. Las imágenes Sentinel-2, distribuidas por la Agencia Espacial Europea (ESA) son ampliamente utilizadas por ser de libre distribución y por su resolución espacial, temporal y espectral. La resolución espacial es la unidad mínima de información incluida en la imagen (píxel), mientras que la resolución temporal se refiere a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre, Sentinel 2 tiene un tiempo de revisita de cinco días. La resolución espectral es el número de bandas en la que el sensor puede registrar la energía que se refleja desde la superficie. Estas características, las convierte en una opción muy interesante para el seguimiento de los cultivos, especialmente, en lotes agrícolas de dimensiones pequeñas. Los resultados iniciales muestran que el algoritmo Gradient Boosting Tree (GBT) tiene un buen desempeño para predecir la humedad de los suelos a partir de datos de textura, densidad aparente e índices espectrales. Se obtuvo un RMSE de 3,46% y las seis variables predictoras más importantes, determinadas por permutación fueron: ndwi_sum, arena, arcilla, limo, msavi2_min, ndwi_min.

Estudio de las características del software de balance hídrico

El software del SAR es un modelo simplificado de balance hídrico que tiene como objetivo principal ayudar a la toma de decisiones en la gestión del agua, básicamente, definir los momentos de riego de los cultivos, de forma tal de que no se produzca disminución de rendimientos como consecuencia de estrés hídrico. Las relaciones agua-rendimiento son, habitualmente, difíciles de predecir, ya que están determinadas por factores específicos locales. Para evaluar las eficiencias de las prácticas de riego, optimizar su programación (cuándo y cuánto regar) o establecer estrategias de riego deficitario, se debe tener un adecuado conocimiento de las relaciones suelo-agua-planta-atmósfera y, también, de las relaciones entre disponibilidad de agua, producción de biomasa y rendimiento de los cultivos.

Un enfoque para evaluar el uso y la productividad del agua en la agricultura se basa en el uso de modelos de simulación. Los modelos son una representación simplificada de la realidad y su objetivo es simular el funcionamiento de un sistema determinado, a través de un conjunto de ecuaciones. En el caso de los modelos agrícolas, su función principal es estimar la producción de



los cultivos en función del clima, el suelo y el manejo tecnológico. En las últimas décadas se ha acelerado el conocimiento de los procesos fisiológicos que explican la relación entre el agua y los rendimientos; a su vez, la disponibilidad y precisión de instrumentos de medición (tanto de campo como de laboratorio) y el acceso a productos derivados de satélites, se han incrementado notoriamente. La concurrencia de estos factores ha estimulado el uso de los modelos de simulación, con fines productivos, académicos, de investigación y extensión. La decisión sobre cuál modelo usar dependerá de los análisis requeridos, de los objetivos de investigación y de la disponibilidad de datos. Entre los modelos de mayor difusión se mencionan: CERES (Ritchie et al. 1985); el sistema de soporte de decisiones DSSAT (Jones et al. 2003); COTCROP (Brown et al. 1985), OZCOT (Hearn 1984), GOSSYM (Baker et al. 1983), APSIM (Wang E. et al. 2002) y CropSyst (Stockle et al. 2003). Estos modelos en general requieren información sobre parámetros de los cultivos que no es sencillo obtener (por ejemplo, coeficientes genéticos, grados-día para definir las etapas fenológicas). CROPWAT (Smith et al 1998) y AquaCrop (Steduto et al 2009) son modelos que se enfocan en la relación agua-rendimientos. CROPWAT es un modelo simplificado, que utiliza funciones empíricas, mientras que AquaCrop basa la relación entre el desarrollo y rendimiento de los cultivos con la disponibilidad de agua en el comportamiento conservador de la biomasa (B) producida por unidad de agua transpirada por el cultivo (Tr). De los modelos mencionados, CROPWAT es el que tiene más puntos en común con el software desarrollado en el proyecto.

Conclusiones

Componente 1

Los resultados comprometidos para este componente se cumplieron según lo previsto. Se caracterizaron las áreas piloto, se fortalecieron las redes de información agrometeorológica y se desarrolló la infraestructura del SAR.

Componente 2

Los resultados se alcanzaron de acuerdo a lo comprometido. Se analizó el ajuste de los datos de humedad de suelo obtenidos por sensores de campo y remotos y se definieron las características del software de balance hídrico. Las TICs del SAR comenzaron a aplicarse en las áreas piloto y estarán totalmente operativas entre diciembre de 2023 y enero de 2024, para luego iniciar su escalamiento. En este componente se concretaron las principales innovaciones del proyecto:

- a) El SAR, que permite al usuario establecer programaciones de riego, esto es, definir cuándo y cuánto regar. Las plataformas son un sitio web y una aplicación para telefonía móvil.
- b) El uso de imágenes satelitales para la estimación del contenido de agua del suelo, mediante el algoritmo Gradient Boosting Tree (GBT), que será una importante herramienta de apoyo para el ajuste de las estimaciones del balance hídrico del software.

Componente 3

Los resultados comprometidos para este componente se cumplieron según lo previsto. Se elaboró un modelo de negocios basado en la metodología CANVAS, base para el plan de escalamiento del SAR. Se cuantificó de manera preliminar el impacto del uso del SAR en las fincas donde se hizo el seguimiento de los cultivos. Se difundieron los resultados del proyecto por diversos medios.

Recomendaciones

Las recomendaciones se refieren a los Hallazgos.


Iniciar o fortalecer acciones de investigación, extensión y transferencia de tecnologías sobre el manejo del riego en el marco de la cartera de proyectos de las instituciones participantes y elaborar perfiles de proyectos para financiamiento externo, que aborden los aspectos mencionados.

Las diferentes condiciones productivas y de acceso a la información por parte de los agricultores deben tenerse en consideración durante el desarrollo y posterior uso de herramientas como el SAR.

Se requiere generar un adecuado grado de confianza con el productor para que, después de la interacción inicial con los técnicos, pueda continuar trabajando sin el apoyo continuo de las instituciones. Acompañar el trabajo en las áreas piloto durante dos o tres temporadas posteriores a la finalización del proyecto permitirá consolidar el uso del SAR y fomentar su adopción por los productores. La continuidad de su uso permitirá ajustar las recomendaciones que se realizan, por tratarse de diversos cultivos y condiciones climáticas muy variables entre los países.

Referencias Bibliográficas

- Abanto-Rodríguez, Carlos; Wellington Farias Araújo; Pollyana Cardoso Chagas; Edvan Alves Chagas; João Lopes Monteiro N.; Raphael Da Silva Siqueira; Samara Martins Barbosa; Valdinar Ferreira Melo y Miguel A. Maffei Valero (2020). "Calibración de sensores de reflectometría de dominio de frecuencia para estimar la humedad en un suelo Geric Xanthic Ferrasol". *Bioagro* 32(2): 123-130. 2020.
- Ali, I, F. Greifeneder, J. Stamenkovic, M. Neumann, C. Notarnicola (2015). "Review of Machine Learning Approaches for Biomass and Soil Moisture Retrievals from Remote Sensing Data". *Remote Sens.* 2015, 7, 16398–16421.
- Allen, R.G. (2011). "Skin layer evaporation to account for small precipitation events-An enhancement to the FAO-56 evaporation model". *Agricultural Water Management*, 99(1): 8-18.
- Allen, R. G.; L. S. Pereira; D. Raes; M. Smith (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. FAO.
- Altobelli, F., Lall, U., Dalla Marta, A., Caracciolo, F., Cicia, G., D'Urso, G., & Del Giudice, T. (2018). "Willingness of farmers to pay for satellite-based irrigation advisory services: a southern Italy experience". *The Journal of Agricultural Science*, 156(5), 723-730. Doi:10.1017/S0021859618000588.
- Angella, G. (2016). *Sistema de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina. Brecha de rendimientos y productividad del agua en los cultivos de maíz y algodón*. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba. 155 páginas. Editor: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. Córdoba, España.
- Angella, G.; C. Frías; R. Salgado (2016). *Conceptos básicos de las relaciones agua-suelo-planta*. INTA Ediciones. Colección Divulgación. ISSN: 1850-4086. Nº 93.
- Angueira C.; D. Prieto; J. López; G. Barraza (2007). *Sistema de Información Geográfica de Santiago del Estero*. SigSE V. 2.0. CD. ISBN 987-521-170-2. INTA.
- Baker, D.N.; J.N. Larnbert and J.M. McKinion (1983). *GOSSYM: A simulator of cotton growth and yield*. Tech. Bull. 1089. South Carolina Agric. Exp. Stn., Clemson.
- Bausch, W., C. Neale (1987). *Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept*. Transactions of the ASAE 30, 703–709.
- Brown, L.G.; J.W. Jones; J.D. Hesketh; J.D. Hartsog; F.D. Whisler and F.S. Harris (1985). *COTCROP: Computer simulation of growth and yield*. Information Bull. No. 69. Agric. Forest. Exp. Stn., Mississippi State, MS.
- Calera A., I. Campos y J. Garrido-Rubio (2016). *Determinación de las necesidades de agua y de riego mediante estaciones meteorológicas y series temporales de imágenes multiespectrales. Jornada técnica de innovación en gestión del regadío mediante redes agroclimáticas, teledetección y sistemas de información*. CENTER. Recuperado de:

- 
- https://www.mapa.gob.es/images/es/caleraaccesoasecuenciastemporales2_tcm30-131718.pdf
Caumo, M.; A. Gioria y O. Santillán (2014). *El Área de Riego del Río Dulce y la actividad agrícola de subsistencia*. Revista Trazos Universitarios. IISN 1853-6425. Facultad de Ciencias de la Educación, Universidad Católica de Santiago del Estero.
Recuperado de: <http://revistatrazos.ucse.edu.ar/index.php/download/el-area-de-riego-del-rio-dulce-y-la-actividad-agricola-de-subsistencia/?wpdmdl=397>.
- Enciso, J.; D. Porter and X. Périès (2007). *Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego*. Texas A&M AgriLife Extension Service. B-6194S 08/07. Recuperado de: <http://baen.tamu.edu/wp-content/uploads/sites/24/2017/01/E-618S-Irrigation-Monitoring-with-Soil-Water-Sensors.-Spanish-Version.pdf>
- FAO (2015). *Estudio del potencial de ampliación de riego en Argentina*. ISBN 978-92-5-308995-6. Buenos Aires, Argentina. FAO.
- FAO (2014). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. Roma, Italia.
- FAO (2014b). *Agricultura Familiar en América Latina y el Caribe: Recomendaciones de Políticas*. Roma, Italia.
- Greifeneder, F., C. Notarnicola, W. Wagner (2021). “A Machine Learning-Based Approach for Surface Soil Moisture Estimations with Google Earth Engine”. *Remote Sens.* 2021, 13, 2099. <https://doi.org/10.3390/rs13112099>.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). “Reference Crop Evapotranspiration from Temperature”. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2),96–99. Recuperado de: <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Harvard Humanitarian Initiative (2021). *KoBoToolbox Data Collection Tools for Challenging Environments*. Recuperado de: www.kobotoolbox.org .
- Hearn, A.B.; G.A. Constable (1984). “Irrigation for crops in a sub-humid environment. Evaluation of irrigation strategies for cotton”. *Irrig. Sci.* 5:75–94.
- Heilman, J., W. Heilman y D. Moore (1982). “Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance”. *Agronomy Journal*, 74: 967-971.
- INDEC (2015). *Encuesta Nacional sobre Acceso y Uso de Tecnologías de la Información y la Comunicación (ENTIC)*. Ministerio de Economía, Argentina.
- INIDE-MAGFOR (2013). *IV Censo Nacional Agropecuario*. Instituto Nacional de Información de Desarrollo (INIDE) y Ministerio Agropecuario y Forestal (MAGFOR). Managua, Nicaragua.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC), República Argentina (2010). *Censo Nacional de Población, hogares y Viviendas 2010*. Recuperado de: <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC), República Argentina (2018). *Censo Nacional Agropecuario 2018*. Recuperado de: <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-3-8-87>.
- Instituto Nacional de Estadísticas, República Oriental del Uruguay (2011). *Censo Nacional 2011*. Recuperado de <https://www.ine.gub.uy/censos-2011>
- Intendencia Municipal de Canelones. Recuperado de:

- https://www.imcanelones.gub.uy/sites/default/files/pagina_sitio/archivos_adjuntos/a6-iae_aprob_prev.pdf.
- Intendencia Municipal de San José. Recuperado de:
https://ods.gub.uy/images/SAN_JOSE_-_Informe_Localizacion_ODS.pdf
- Jones, J.; G. Hoogenboom; C.H. Porter; K.J. Boote; W.D. Batchelor; L.A. Hunt; P.W. Wilkens; U. Singh; A.J. Gijssman; J.T. Ritchie (2003). "The DSSAT cropping system model". *Europ. J. Agronomy* 18 (2003) 235/265.
- Lievens, H., R. Reichle, Q. Liu, G. De Lannoy, R. Dunbar, S. Kim & W. Wagner (2017). "Joint Sentinel-1 and SMAP data assimilation to improve soil moisture estimates". *Geophysical Research Letters*, 44(12), 6145–6153. Recuperado de: <https://doi.org/10.1002/2017GL073904>
- Lizarazo, I., & R. Mancera (2017). *Humedad del suelo a partir de datos obtenidos mediante teledetección. Uso de técnicas de regresión lineal múltiple para obtener una propiedad de interés en la zona de estudio*: Recuperado de: https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/324020_6826d946a9e04a59905e5db23aa0b6ca.html
Consultado 8/10/2019
- Lorite, I.J., García-Vila, M., Carmona, MA. (2012). "Assessment of the Irrigation Advisory Services' Recommendations and Farmers' Irrigation Management: A Case Study in Southern Spain". *Water Resour Manage* 26, 2397–2419.
<https://doi.org/10.1007/s11269-012-0023-3>
- Marano, R.; F. Ledesma; G. Camussi e I. Carnevale (2012). "Uso de sondas FDR para balance de agua en el suelo: calibración y aplicación". XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Martin, Edward C.; Muñoz, C. (2010). *Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego. ¿Cuándo?* Arizona Cooperative Extension. College of Agriculture, University of Arizona (Tucson, AZ). 2010. Descargado el 7/12/2022. Item License <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.
Recuperado de:
<http://hdl.handle.net/10150/625275>
- Mateos L., M. González-Dugo, L. Testi, F. Villalobos (2013). "Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation". *Agricultural Water Management*, Volume 125, 2013, Pages 81-91, ISSN 0378-3774, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.005>.
- Ministerio Agropecuario (2017). *Mapa Nacional de Riego*. Ministerio Agropecuario de Nicaragua. Recuperado de:
https://www.fontagro.org/new/uploads/adjuntos/Proy_FONTAGRO_RG-T3387-P002_-_ATN-RF-17245-RG2022-SAR_y_TICs-Memoria_taller_Nicaragua_Sept._20221.p
- Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes. Uruguay (1979). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay; clasificación de las unidades de suelo*. Montevideo, MAP. v.3, 452 p.
- Municipalidad de El Sauce (2021). Ficha municipal. Recuperado de:
file:///C:/Users/Investigacion_RIII/Downloads/FICHA%20MUNICIPAL%20Nombre%20del%20Mu

[nicipio%20EL%20SAUCE%20Nombre%20del%20....pdf.](#)

Neale, C., W. Bausch, D. Heermann (1989). *Development of reflectance based crop coefficients for corn*. Transactions of the ASAE 32, 1891–1899.

Obschatko, E., Foti, M, Román, M. (2007). *De los pequeños productores en la República Argentina: importancia en la producción agropecuaria y en el empleo en base al Censo Nacional Agropecuario 2002*. 2^{da} Edición revisada y ampliada. SAGPyA. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 127 p.+CDROM. ISBN 978-987-9184-54-7. Buenos Aires, Argentina.

Open Source Geospatial Content Management System (2021). Recuperado de: <https://geonode.org/>.

Palacios-Vélez, E.; Julio Enrique Palacios-Sánchez, Luis Alberto Palacios-Sánchez (2011). *Agricultura de riego asistida con satélites*. Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería Hidráulica en México, vol. II, núm. 2, abril-junio de 2011, pp. 69-81.

PostGIS Spatial and Geographic Objects for PostgreSQL. Recuperado de: <https://postgis.net>.

Revelo Luna, D., J. Megía Manzano, B. Montoya Bonilla y J. Hoyos García (2020). “Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*)”. *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 38, núm. 2, pp. 298-312, Fundación Universidad del Norte.

Qiu J, W. Crow, W. Wagner & T. Zhao (2019). “Effect of vegetation index choice on soil moisture retrievals via the synergistic use of synthetic aperture radar and optical remote sensing”. *Int J Appl Earth Obs Geoinf.*;80:47-57. doi:10.1016/J.JAG.2019.03.015.

Rawls, N.J y D. L. Brakensiek (1982). Estimating soil water retention from soil properties. *Journal of Irrigation and Drainage* Vol 108, Nro. 1r 2.

Ritchie, J.T., D.C. Godwin; S. Otter-Nacke (1985). *CERES-Wheat. A simulation model of wheat growth and development*. Texas A&M Univ. Press, College Station.

Schilardi, C; Rearte, E.; Martín, L.; Morábito, J. (2015). “Calibración a campo de sensores FDR. Limitaciones y potencialidades”. *Jornadas de Riego y Fertirriego*. Mendoza Argentina. Recuperado de:


https://www.researchgate.net/publication/309513454_CALIBRACION_A_CAMPO_DE_SENSORES_FDR_LIMITACIONES_Y_POTENCIALIDADES

Sganga F., C. Cabrera, M. González, S. Rodríguez (2014). *Producción familiar agropecuaria uruguaya y sus productores familiares a partir de los datos del CGA 2011 y el registro de productores familiares*. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, República Oriental del Uruguay.

Silva, B.M., G.C. Oliveira, M.E. Serafim, J.J. Silva Júnior, A. Colombo y J.M. I. Lima (2012). “Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro”. *Pesq. Agropec. Bras.* 47(2): 277-286.

Smith, M. “CROPWAT” (1999). *Programa de Ordenador para Planificar y Manejar el Riego*. Estudio FAO de Riego y Drenaje N° 46. Roma, Italia.

Solorza, R. (2013). *Estimación de la humedad superficial del suelo mediante el uso combinado de modelos electromagnéticos y el enfoque bayesiano. Estudio exploratorio en imágenes*

- 
- SARAT. Facultad de Matemática, Astronomía y Física y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich. Tesis de Magister en Aplicaciones Espaciales de alerta y respuesta temprana a emergencias – Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Steduto, P.; D. Raes; T. Hsiao; E. Fereres; L. Heng; G. Izzi; J. Hoogeveen (2009). “AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions”. *Options Méditerranées*, Series A, No. 80.285-292.
- Stockle, C.; M. Donatelli; R. Nelson (2003). “CropSyst, a cropping systems simulation model”. *European Journal of Agronomy*. Volume 18, Issues 3-4, January 2003, pages 289-307.
- Tapsuwan, S.; Johannes Hunink, Francisco Alcon, Aakfe N. Mertens-Palomares and Alain Baille (2015). “Assessing the design of a model-based irrigation advisory bulletin: the importance of end-user participation”. *Irrig. and Drain*. 64: 228–240. Published online 29 November 2014 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/ird.1887.
- Ulaby, F., P. Batlivala, M. Dobson (1978). “Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture, and Soil Texture: Part I-Bare Soil”. *IEEE Trans. Geosci. Electron*. 1978, 16, 286–295.
- Universidad Nacional Autónoma de México. Autores varios (2022). *Manual de Práctica de Desarrollo Rural. Diagnóstico Rural*. Recuperado de: https://fmvz.unam.mx/fmvz/licenciatura/coepa/archivos/Manuales/24_DESARROLLO_RURAL.pdf.
- Unver, O.; Melvyn Kay, Konda Chavva, Amali Abraham Amali, Eva Pek, Maher Salma (2020). “Development for water, food and nutrition in a competitive environment-How NGOs and CSOs are reshaping traditional farmer irrigation advisory services”. *Irrig. and Drain*. 2021;70:431-447. DOI: 10.1002/ird.2444.
- Vera, C.; Baez, J.; Douglas, M.; Emmanuel, C.B.; Marengo, J.; Meitin, J.; Nicolini, M.; Nogues-Paegle, J.; Paegle, J.; Penalba, O.; Salio, P.; Saulo, C.; Silva Dias, M.A.; Silva Dias, P.; Zipser, E. (2006). "The South American low-level jet experiment" (2006) *Bulletin of the American Meteorological Society*. 87(1):63-77. Recuperado de: http://hdl.handle.net/20.500.12110/paper_00030007_v87_n1_p63_Vera
- Vervelde, B. (2018). “Irrigation Performance Assessment in the Argentinean Province of Santiago del Estero”. Tesis de Grado. Wageningen University & Research (Países Bajos). Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/331651960_Irrigation_Performance_Assessment_in_the_Argentinian_province_of_Santiago_del_Estero
- Vuolo, F.; Guido D’Urso, Carlo De Michele, Biagio Bianchi, Michael Cutting (2015). “Satellite-based irrigation advisory services: A common tool for different experiences from Europe to Australia”. *Agricultural Water Management* 147 (2015) 82-95.
- Wang E.; Robertson M.J.; Hammer G.L.; Carberry P.S.; Holzworth D.; Meinke H.; Chapman S.C.; Hargreaves J.N.G.; Huth N.I.; McLean G. (2002). “Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM”. *European Journal of Agronomy* 18, 121–140.
- WMO (2018). *Guide to meteorological instruments and methods of observation No. 8*. World



Meteorological Organization (WMO). ISBN 978-92-63-10008-5. Geneva, Switzerland.
Zhang, D.; G. Zhou (2016). "Estimation of Soil Moisture from Optical and Thermal Remote Sensing: A Review". *Sensors* 2016, 16, 1308.

Instituciones participantes



Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria



Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria
URUGUAY



Instituto Nicaragüense de
Tecnología Agropecuaria



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



INSTITUTO DE AGRICULTURA
SOSTENIBLE IAS



WAGENINGEN UR



KILIMO

Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



www.fontagro.org

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org