



## Descripción pilotos tecnológicos establecidos en Chile, Argentina, Colombia y Uruguay. Diseño y metodología de trabajo, señalando las tecnologías utilizadas y los protocolos de toma de datos.

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

2023





Códigos JEL: Q16

ISBN:

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

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

Copyright © 2022 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial- SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Esta publicación puede solicitarse a:

**FONTAGRO**

Correo electrónico: [FONTAGRO@FONTAGRO.org](mailto:FONTAGRO@FONTAGRO.org)

[www.FONTAGRO.org](http://www.FONTAGRO.org)



# Tabla de Contenidos

## Índice.

Resumen.....	13
Introducción .....	14
1. Validación de nuevas tecnologías a escala Predial/Parcela.....	15
1.1 Validación de nuevas tecnologías en el riego en Chile: Manejo eficiente del riego con información satelital. Claudio Balbontín N., Cornelio Contreras S. INIA Intihuasi.....	15
1.1.1 Introducción.....	15
1.1.2 Marco conceptual para el manejo del riego.....	16
1.1.3 Materiales y métodos .....	17
1.1.4 Marco conceptual-tecnológico utilizado para el monitoreo de las condiciones ambientales y la definición y control del riego.....	23
1.1.5. Monitoreo escala PLANTA .....	24
1.1.6 Estimación de la productividad del agua a escala de parcela. ....	29
1.2 Validación nuevas tecnologías en el riego en Argentina: Manejo eficiente del riego con información satelital. Carlos Puertas, Fernando González, Roberto Martínez, Ayelén Montenegro – INTA. ....	31
1.2.1 Validación de nuevas tecnologías para la determinación de las necesidades de riego en cultivo de vides. Piloto Junín, Mendoza. ....	31
1.2.1.1 Introducción.....	31
1.2.1.2 Marco conceptual para el manejo del riego.....	31
1.2.1.3 Materiales y métodos .....	32
1.2.1.4 Marco conceptual-tecnológico utilizado para el monitoreo de las condiciones ambientales y la definición y control del riego.....	35
1.2.1.5 Monitoreo escala PLANTA .....	35
1.2.1.6 Estimación de la productividad del agua a escala de parcela. ....	40
1.2.2 Validación de nuevas tecnologías para la determinación de las necesidades de riego en cultivo de tomates para la industria. Piloto San Juan.....	40
1.2.2.1 Introducción.....	41
1.2.2.2 Marco conceptual para el manejo del riego.....	41
1.2.2.3 Materiales y métodos .....	41



1.2.2.4 Marco conceptual-tecnológico utilizado para el monitoreo de las condiciones ambientales y la definición y control del riego.....	43
1.2.2.5 Monitoreo escala PLANTA .....	43
1.2.2.6 Estimación de la productividad del agua a escala de parcela. ....	45
1.2.3 Validación de nuevas tecnologías para la determinación de las necesidades de riego en cultivo de maíz para la industria. Piloto Río Negro, Patagonia Norte. ....	46
1.2.3.1 Introducción.....	46
1.2.3.2 Marco conceptual para el manejo del riego.....	46
1.2.3.3 Materiales y Métodos.....	47
1.2.3.4 Marco conceptual-tecnológico utilizado para el monitoreo de las condiciones ambientales y la definición y control del riego.....	48
1.2.3.5 Monitoreo a escala de PLANTA .....	49
1.2.3.6 Estimación de la productividad del agua a escala de parcela. ....	52
1.3 Validación nuevas tecnologías en el riego en Colombia: Manejo eficiente del riego con información satelital.....	53
1.3.1 Validación de nuevas tecnologías para la determinación de las necesidades de riego en un conjunto de cultivos en el Piloto Distrito de riego Roldanillo, La Unión y Toro RUT. ..	53
1.3.1.2 Marco conceptual para el manejo del riego.....	53
1.3.1.4 Marco conceptual-tecnológico utilizado para el monitoreo de las condiciones ambientales y la definición y control del riego.....	61
1.3.1.5 Monitoreo escala PLANTA. ....	62
1.3.1.6 Estimación de la productividad del agua a escala de parcela. ....	67
1.3.2. Validación de nuevas tecnologías para la determinación de las necesidades de riego en lima ácida, Piloto Centro de investigación Palmira, Agrosavia.....	68
1.3.2.2 Marco conceptual para el manejo del riego.....	68
1.3.2.1. Materiales y Métodos.....	68
1.3.2.4 Marco conceptual-tecnológico utilizado para el monitoreo de las condiciones ambientales y la definición y control del riego.....	72
1.3.2.6 Estimación de la productividad del agua a escala de parcela. ....	74
1.4 Validación nuevas tecnologías en el riego en Uruguay: Manejo eficiente del riego con información satelital.....	75
1.4.1 Validación de nuevas tecnologías para la determinación de las necesidades de riego en pasturas, maíz y soja en El Junco, Uruguay. Claudio García y Álvaro Otero.....	75



.....	75
1.4.1.1 Introducción.....	75
1.4.1.2 Marco conceptual para el manejo del riego.....	75
1.4.1.3 Materiales y métodos.....	75
1.4.1.4 Marco conceptual-tecnológico utilizado para el monitoreo de las condiciones ambientales y la definición y control del riego.....	80
1.4.1.6 Estimación de la productividad del agua a escala de parcela.....	82
2. Validación de nuevas tecnologías a escala de Cuenca: Balance de agua en el suelo asistido por teledetección.....	83
2.1 Empleo de la teledetección para la monitorización y contabilidad de los recursos hídricos sobre extensas superficies regables. Contextualización.....	83
2.2 Metodología de trabajo en cuenca.....	85
2.3 Diseño experimental.....	87
2.4 Presentación del modelo y productos obtenidos.....	88
2.5 Intercambio de información de entrada al modelo.....	89
2.6 Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección.....	89
2.7 Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua.....	90
3. Plataforma Agrícola Satelital: PLAS FONTAGRO.....	91
3.1 Sistema de consulta on line.....	91
3.2 Gráficas temporales.....	94
3.3 Monitoreo de los cultivos.....	95
3.4 Guía Rápida de descripción de herramientas para consulta de la Plataforma Satelital.....	97
Referencias Bibliográficas.....	99
Instituciones participantes.....	102



## Índice de figuras.

Figura 1. Diagrama del marco conceptual del cálculo del consumo hídrico de los cultivos.....	16
Figura 2. Evolución del comportamiento del coeficiente de cultivo (lisimetría) y del IV-NDVI para trigo y maíz (adaptado de Wright, J.L. in 1983). .....	17
Figura 3. Ubicación parcela piloto Pan de Azúcar y vista general de los cultivos.....	18
Figura 4. Infraestructura para el riego en parcela Pan de Azúcar.....	18
Figura 5. Plataforma telemétrica para el riego (DropControl, Waseconn).....	19
Figura 6. Series de suelo en la parcela piloto tecnológico. ....	19
Figura 7. Perfiles de suelo en calicata modal del suelo en piloto tecnológico. ....	20
Figura 8. Análisis de laboratorio físico y químico del suelo de la parcela piloto PEPA. ....	21
Figura 9. Distritos agroclimáticos zona del piloto Pan de Azúcar PEPA (Santibáñez, 2017).....	22
Figura 10. Distribución anual promedio periodo 2012-2023 de la evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) y las lluvias en la parcela piloto Pan de Azúcar. ....	23
Figura 11. Promedios de evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) y lluvia en la parcela piloto. ...	24
Figura 12. Ejemplo de la Plataforma Satelital PLAS – FONTAGRO y la descripción gráfica del desarrollo de un cultivo.....	25
Figura 13. Ejemplo de imágenes del índice de vegetación NDVI desplegada con una escala de colores que permite diferenciar niveles del NDVI y su distribución espacial sobre la parcela de un cultivo.....	26
Figura 14. Selección de goteros y evaluación coeficiente de uniformidad y precipitación real del equipo de riego en parcela piloto. ....	26
Figura 15. Datalogger Zentra, pluviómetro de gotero y caudalímetro utilizados para el monitoreo del riego.....	27
Figura 16. Sondas de capacitancia (mod. Teros 10, Decagon Devices) utilizadas para el monitoreo continuo de la humedad en el suelo.....	28
Figura 17. Red de estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) en la región de Coquimbo y estación disponible en la parcela piloto.....	28

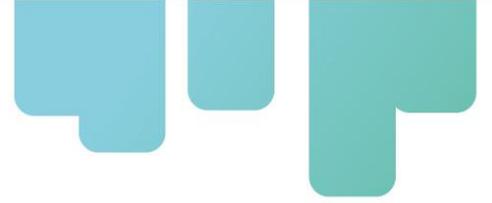


Figura 18. Cultivos anuales monitoreados para el ajuste del riego de precisión. ....	29
Figura 19. Ubicación piloto tecnológico Junín-Mendoza. ....	32
Figura 20. Curva de retención hídrica del suelo en parcela piloto Junín-Mendoza.....	34
Figura 21. Distribución anual promedio periodo 2012-2021 de la evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) y del periodo 1982-2010 de las lluvias en Junín, Mendoza. ....	35
Figura 22. Cultivo de vid monitoreado. Junín, Mendoza. ....	35
Figura 23. Evolución del $k_{cb}$ estimado a partir de los valores de NDVI para la parcela de estudio. ....	36
Figura 24. Evolución del potencial hídrico de tallo (PHT) del cultivo de vid en el ciclo 2021-2022. ....	36
Figura 25. Resumen hidráulico del avance y receso del agua de riego en el evento evaluado. (WinSRFR v.5.1.1) .....	37
Figura 26. Evolución del contenido de humedad de suelo promedio en 90 cm de profundidad, expresados como lámina de agua equivalente en mm. CC (capacidad de campo), UR (umbral de riego teórico), PMP (punto de marchitez permanente), HG (humedad gravimétrica), Sensor (sensor FDR). Barras azules indican eventos de riego en mm. ....	38
Figura 27. Estación meteorológica. ....	39
Figura 28. Monitoreo de cultivo con valores de NDVI para el ciclo 2021-2022. ....	40
Figura 29. Ubicación piloto tecnológico en el departamento de Pocito, San Juan. ....	42
Figura 30. Distribución anual promedio periodo 1969-2010 de la evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) y del periodo 1991-2020 de las lluvias en San Juan. ....	43
Figura 31. Cultivo de tomate monitoreado. Departamento de Pocito, San Juan.....	43
Figura 32. Monitoreo de cultivo de tomate con valores de NDVI entre el 01-01-2021 y 21-12-2021.....	45
Figura 33. Ubicación de los valles de Negro Muerto, Guardia Mitre y zona de riego del partido de Patagones.....	47
Figura 34. Cultivo de maíz monitoreado. Villa Regina, Provincia de Río Negro. ....	49



Figura 35. Colocación de sensores durante el primer año de estudio en el pivot 16.....	50
Figura 36. Cultivo de maíz monitoreado con plataforma PLAS-FONTAGRO. ....	51
Figura 37. Monitoreo del Kc del cultivo de maíz con la plataforma PLAS-FONTAGRO. ....	52
Figura 38. Ubicación piloto distrito de riego RUT. ....	54
Figura 39. Clases texturales presentes en el Distrito RUT. Fuente información cartográfica IGAC-CVC, (2004).....	55
Figura 40. Precipitación y evapotranspiración acumuladas. ....	58
Figura 41. Perfil transversal. Fuente ASORUT (2018) .....	58
Figura 42. Esquema del D.RUT y sus principales obras. Fuente ASORUT (2018).....	59
Figura 43. Esquema de los componentes de la infraestructura de riego. Fuente ASORUT (2018). .....	59
Figura 44. Distribución de áreas cultivadas en el D. RUT. Fuente (ASORUT, 2018).....	61
Figura 45. Algunos cultivos monitoreados en el Distrito RUT. ....	62
Figura 46. Instalación estaciones de humedad del suelo en el sitio experimental. ....	63
Figura 47. Esquema de red de estaciones de registro instalado en el piloto tecnológico del D.RUT.....	64
Figura 48. Sensor de humedad del suelo. ....	64
Figura 49. Ubicación cultivos y EMAs. Fuente información cartográfica IGAC-CVC, (2004). ....	66
Figura 50. Monitoreo al desarrollo del fruto .....	67
Figura 51. Ubicación parcela piloto en el C.I. Palmira – AGROSAVIA. ....	69
Figura 52. Registro de precipitaciones año 2021, 2022 y promedio histórico en el C.I. Palmira – Agrosavia. (Fuente: Estación IDEAM- 26075010). ....	70
Figura 53. Infraestructura de riego en sector piloto en C.I. Palmira – Agrosavia. ....	71
Figura 54. Detalle de anillo de goteo en cultivo de lima ácida Tahití (Foto: Liliana Ríos). ....	71
Figura 55. Heterogeneidad en la emisión de los goteros. Foto: Marysol Cano.....	72
Figura 56. Imágenes del equipamiento utilizado en el seguimiento ambiental de la parcela piloto. ....	72



Figura 57. Equipamiento para seguimiento al crecimiento del fruto. ....	74
Figura 58. Evaluación de conductancia estomática con porometría. ....	74
Figura 59. Ubicación parcela piloto “El Junco”. ....	76
Figura 60. Unidades de suelo en la parcela piloto tecnológico. ....	76
Figura 61. Precipitación y evapotranspiración media mensual (1984-2011) .....	79
Figura 62. Evolución de la precipitación y la evapotranspiración en la parcela piloto tecnológico durante las dos temporadas evaluadas .....	79
Figura 63. Pastura monitoreada en El Junco, Colonia, Uruguay. ....	80
Figura 64. Esquema de la evaluación a campo del avance y receso del agua en las parcelas del piloto tecnológico. Fuente: Bourdin et al., 2015 .....	80
Figura 65. Curvas de tiempos de avance y receso del agua, resultante de la evaluación a campo. ....	81
Figura 66. Sondas FDR (Decagon) utilizadas para el monitoreo continuo de la humedad en el suelo. ....	82
Figura 67. Estación meteorológica automática (EMA) en la parcela piloto tecnológico “El Junco”. ....	82
Figura 68. Cultivos monitoreados para el ajuste del riego de precisión. ....	82
Figura 69. Esquema conceptual del modelo HidroMORE basado en la teledetección para estimar espacial y temporalmente distribuidas las NIR (Garrido-Rubio, 2021). ....	86
Figura 70. Página web de acceso a la Plataforma Agrícola Satelital en la región de Coquimbo ( <a href="https://www.agrisatwebgis.com/app/es/spider/map?group=PLAS-FONTAGRO">https://www.agrisatwebgis.com/app/es/spider/map?group=PLAS-FONTAGRO</a> ).....	91
Figura 71. Plataforma Satelital para consulta en sitios piloto (Capa Open Street Map). ....	92
Figura 72. Plataforma Satelital para consulta en sitios piloto (Capa Bing Aerial).....	92
Figura 73. Visualización de imagen NDVI en la Plataforma Satelital en rangos de colores para una fecha determinada. Los colores permiten identificar diferencias de vigor de los cultivos y/o cobertura de suelo desnudo en el terreno. ....	93
Figura 74. Visualización de nubes en la Plataforma Satelital a partir de una imagen composición	



pseudocolor RGB. ....	94
Figura 75. Despliegue gráfico del NDVI en la Plataforma Satelital, señalando sus curvas temporales e identificación de la variabilidad espacial del cultivo. ....	95
Figura 76. Ejemplo de evolución del índice de vegetación NDVI en un parrón de uva de mesa var. Flame Seedless, ubicado en la ciudad de Vicuña y registrado por el satélite Sentinel 2. ....	96
Figura 77. Interfaz de usuario de la Plataforma Satelital.....	97



### Índice de cuadros.

Cuadro 1. Variables meteorológicas en el distrito agroclimático La Serena (Santibáñez, 2017).	22
Cuadro 2. Características de las imágenes satelitales disponibles para consulta en la Plataforma PLAS FONTAGRO.	25
Cuadro 3. Ejemplo de evaluación CU y precipitación del equipo de riego en parcela experimental.	27
Cuadro 4. Caracterización físico-química de los suelos de la parcela utilizada.	33
Cuadro 5. Valores medios mensuales para la estación meteorológica del Servicio Meteorológico	34
Cuadro 6. Valores medios mensuales para la estación meteorológica del Servicio Meteorológico	42
Cuadro 7. Capacidad de campo extractada de la serie de humedad del suelo	56
Cuadro 8. Química de suelos de las fincas piloto del D.RUT	56
Cuadro 9. Dispositivos red de monitoreo.	62
Cuadro 10. Coordenadas red de monitoreo.	63
Cuadro 11. Profundidad de instalación de los sensores.	64
Cuadro 12. Protocolo de riego para el cultivo de cacao	65
Cuadro 13. Ubicación EMAs en el Distrito RUT	67
Cuadro 14. Ficha técnica cultivo lima ácida C.I. Palmira.	73
Cuadro 15. Promedio del contenido volumétrico de agua a las distintas tensiones evaluadas en laboratorio.	77
Cuadro 16. Variables meteorológicas promedio de 30 años.	78
Cuadro 17. Superficie en regadío, extracción de agua y tipo de sistema de riego por país estudiado (FAO, 2000).	83
Cuadro 18. Superficie total y cultivos principales desarrollados por cuencas de trabajo.	88
Cuadro 19. Descripción técnica de los productos generados por el balance de agua en el suelo asistido por teledetección.	88



Cuadro 20. Descripción técnica de los productos generados por el balance de agua en el suelo asistido por teledetección.....	89
Cuadro 21. Tipología de datos requeridos para la evaluación de la contabilidad de agua de riego asistida por teledetección. ....	90
Cuadro 22. Características de las imágenes satelitales utilizados en el estudio. ....	93



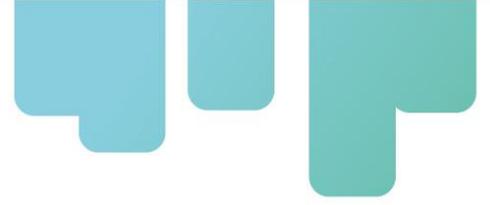
## Resumen

En el marco de la iniciativa **“Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia en la agricultura ALC-2030”**. Se establecieron pilotos altamente tecnificados en cultivos promisorios y de alto valor nutritivo que permitan a agricultores conocer nuevas tecnologías y el manejo adecuado del agua en la agricultura. Estos pilotos se implementaron en Chile, Argentina, Colombia y Uruguay. Estas tecnologías buscan ser aplicadas para el manejo optimizado de los sistemas de riego y de la eficiencia del agua a dos escalas: i) Parcela (intrapredial); ii) Cuenca (extrapredial). En ambas escalas se determinaron las necesidades hídricas de los cultivos, mediante el uso de nuevas tecnologías, como es el uso de la teledetección mediante el análisis de imágenes satelitales. A escala de parcela, además, se realizaron evaluaciones ecofisiológicas de los cultivos y de los procesos metabólicos primordiales para mantener alta productividad del cultivo. Y a nivel de cuenca las necesidades hídricas se obtuvieron mediante balance hídrico en el suelo, el cual fue modelado por HidroMore.

---

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

---



## Introducción

La gestión hídrica en América Latina requiere una constante implementación de mejoras en infraestructura como en modelos conceptuales que permitan a los usuarios caminar a un uso eficiente del recurso, en este contexto la iniciativa **“Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia en la agricultura ALC-2030”** ha establecido diferentes pilotos tecnológicos en los países ejecutores de esta propuesta. A continuación, entregamos en detalle el establecimiento de estos pilotos tecnológicos a escala de parcela y cuenca en Chile, Argentina, Colombia y Uruguay, donde se han incorporado diferentes tecnologías para optimizar el uso del recurso hídrico. Buscando validar el uso de diferentes tecnologías de precisión que tengan un impacto positivo en los usuarios, este artículo se enmarca en el componente 2, actividad 2.1 del proyecto.

Se detallará la validación de cada piloto tecnológico en escala predial y de cuenca, además de detallar las actividades realizadas y especificar las dos tecnologías transversales que se han desarrollado en todos los países.

## 1. Validación de nuevas tecnologías a escala Predial/Parcela

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



#### 1.1.1 Introducción

En el marco de la iniciativa **“Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia en la agricultura ALC-2030”**, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA Chile implementó un piloto tecnológico en la Parcela Experimental Pan de Azúcar, ubicada en la comuna de Coquimbo. El objetivo de este piloto tecnológico es la puesta en marcha y la validación de un paquete conceptual-tecnológico que permita a los agricultores de la región contar con herramientas modernas para el manejo optimizado del riego de sus parcelas.

La necesidad de ajustar el manejo del riego a escenarios de baja disponibilidad hídrica futura, exige el uso de marcos conceptuales robustos y tecnologías para la definición precisa del consumo hídrico de los cultivos. En la actualidad la disponibilidad de herramientas tecnológicas para el monitoreo del nivel de desarrollo de los cultivos, así como de las condiciones ambientales del sitio donde se desarrollan, permiten implementar metodologías con un alto nivel de precisión en la definición de las necesidades de riego. A partir de los resultados obtenidos en la parcela piloto se validó el paquete conceptual-tecnológico propuesto, así como su operatividad a partir de fuentes de información pública y abierta.

En el presente trabajo se describe la aplicación y validación de un paquete conceptual-tecnológico en la parcela piloto Pan de Azúcar, el cual incluye una metodología estandarizada para el manejo del riego conocida como **“coeficiente de cultivo - evapotranspiración de referencia”**, propuesta por FAO en su Manual N°56 (Allen et al., 1998) e innovaciones tecnológicas como es el uso de información satelital (imágenes del índice NDVI) para el monitoreo del desarrollo de los cultivos



como es el uso de sondas para el monitoreo del riego y la disponibilidad hídrica en el suelo. Este conjunto conceptual-tecnológico permitió definir una estrategia para el manejo del riego de los cultivos trabajados y para su uso de manera rutinaria y operativa por parte de los agricultores.

### 1.1.2 Marco conceptual para el manejo del riego

El marco conceptual para el manejo del riego es un elemento fundamental en el ámbito agrícola, ya que proporciona pautas cruciales para optimizar la producción y conservar los recursos hídricos de manera eficiente. En este contexto, el marco teórico aquí descrito es uniforme y consistente en todas las parcelas piloto establecidas en los países participantes. Esta transversalidad garantiza la implementación coherente de prácticas de riego, promoviendo así la sostenibilidad agrícola en toda la región y fortaleciendo la colaboración internacional.

En los trabajos de validación en la parcela piloto, la definición del consumo hídrico de los cultivos, así como de las necesidades de riego, son definidos utilizando la metodología conocida como “**coeficiente de cultivo - evapotranspiración de referencia**”, la cual está definida por FAO en su Manual N°56 (Allen *et al.*, 1998). Su operatividad en condiciones de campo se realiza de acuerdo al esquema mostrado en la **Error! Reference source not found.**

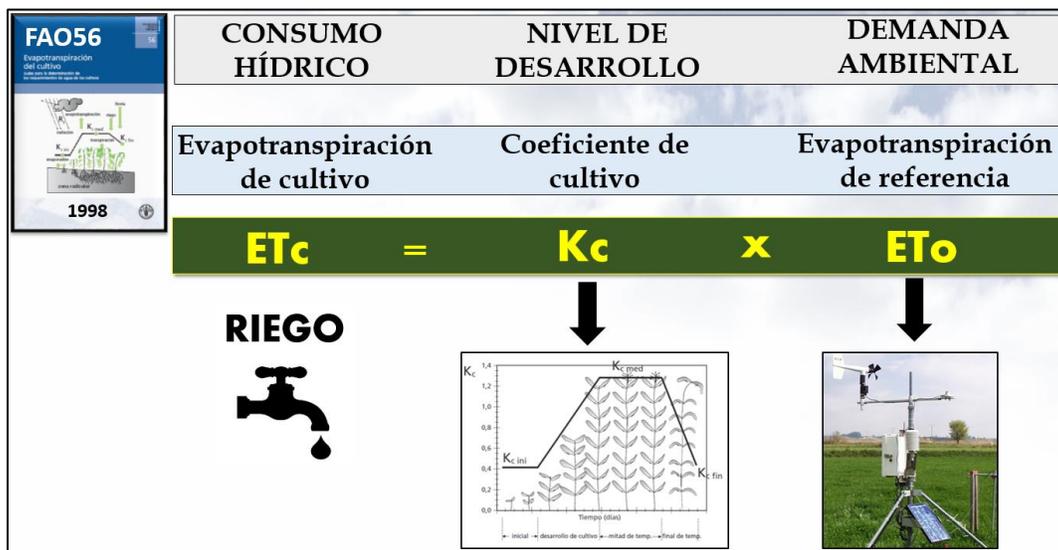


Figura 1. Diagrama del marco conceptual del cálculo del consumo hídrico de los cultivos.

De acuerdo a este marco conceptual, el monitoreo del nivel de desarrollo de los cultivos se realiza mediante el parámetro **coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>)**. Este parámetro representa la relación entre la tasa de transpiración y la demanda ambiental del sitio. Las principales características que influyen en sus valores son altura del cultivo (y su variación durante la temporada), el albedo, la cobertura vegetal del suelo (densidad de estomas, resistencia al flujo de vapor) y la evaporación directa desde el suelo.



En este proyecto, la línea de trabajo para definir el Kcb (coeficiente de cultivo basal) es el uso de series temporales del índice de vegetación satelital NDVI, estimado con imágenes multispectrales (Calera et al., 2005, Campos et al, 2010). La relación lineal existente entre el Kcb de una cubierta, análogo a un coeficiente de transpiración, y los índices de vegetación, como el Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado (NDVI), ha sido analizada para una amplia gama de cultivos. La alta relación entre el NDVI y el índice de área foliar (IAF) así como con la absorción de la radiación solar fotosintéticamente activa por parte de la cubierta vegetal (Calera et al., 2005) permite estimar el tamaño fotosintético relativo de la cubierta.

Adicionalmente, las series temporales de imágenes NDVI permiten describir la evolución temporal del coeficiente de cultivo a lo largo del ciclo de crecimiento de manera similar al parámetro Kcb, el cual varía a lo largo del ciclo de crecimiento y depende del desarrollo concreto de cada cubierta. En la **Error! Reference source not found.** se muestra la evolución del coeficiente de cultivo estimado con lisimetría de pesada y la evolución del IV NDVI en maíz y trigo.

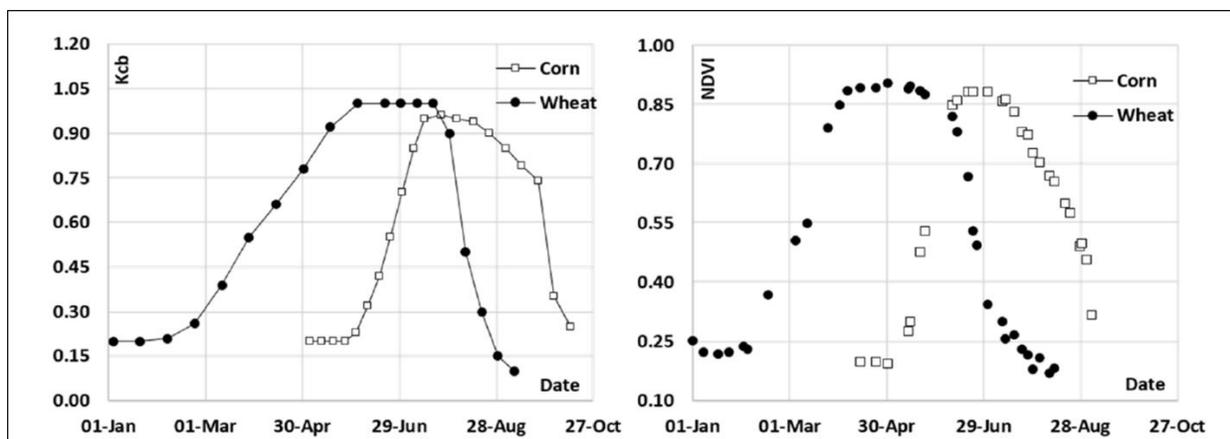


Figura 2. Evolución del comportamiento del coeficiente de cultivo (lisimetría) y del IV-NDVI para trigo y maíz (adaptado de Wright, J.L. in 1983).

### 1.1.3 Materiales y métodos

#### Área de estudio

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



Figura 3. Ubicación parcela piloto Pan de Azúcar y vista general de los cultivos.

Esta parcela tiene una superficie de 7 ha cultivables, en las cuales se realizan rotaciones de cultivos hortícolas y cultivos frutales estables. El suministro de agua de riego para la parcela se realiza por medio de un sistema de canales superficiales abiertos (Canal Bellavista), administrados por la Junta de Vigilancia del Río Elqui, donde se cuenta con 4 acciones. Para la acumulación de agua de riego, la parcela tiene un acumulador con capacidad para 5.000 m<sup>3</sup>, el cual es fundamental para aportar el riego en correcta oportunidad, dado el régimen de turnado de las entregas de agua.

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



Figura 4. Infraestructura para el riego en parcela Pan de Azúcar.

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

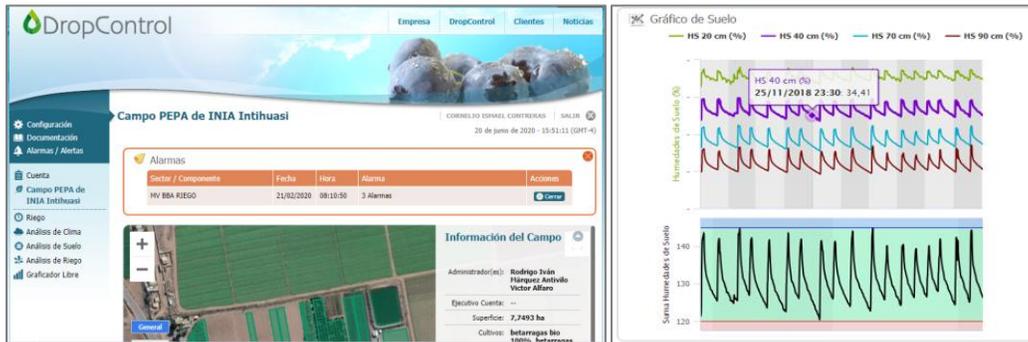


Figura 5. Plataforma telemétrica para el riego (DropControl, Waseconn).

### Características del suelo en la parcela piloto

El suelo de la parcela piloto está clasificado en tres series diferentes, con la mayor proporción dentro de la serie Xeres (**Error! Reference source not found.**), el cual en líneas generales es franco, profundo, sin la presencia de sales y sin limitantes para el desarrollo de las raíces de los cultivos.

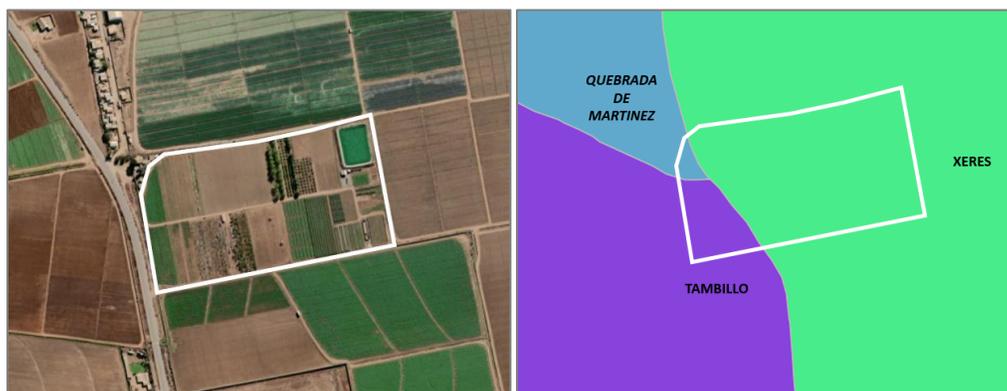


Figura 6. Series de suelo en la parcela piloto tecnológico.

De acuerdo a la descripción del perfil de suelo, se identifican 5 horizontes diferenciables, todos con textura franco arenoso a franco arcillo arenoso sin problemas de aireación y raíces hasta los 50 cm. En la **Error! Reference source not found.** se señala en detalle la descripción de los horizontes de suelo presentes en la parcela.

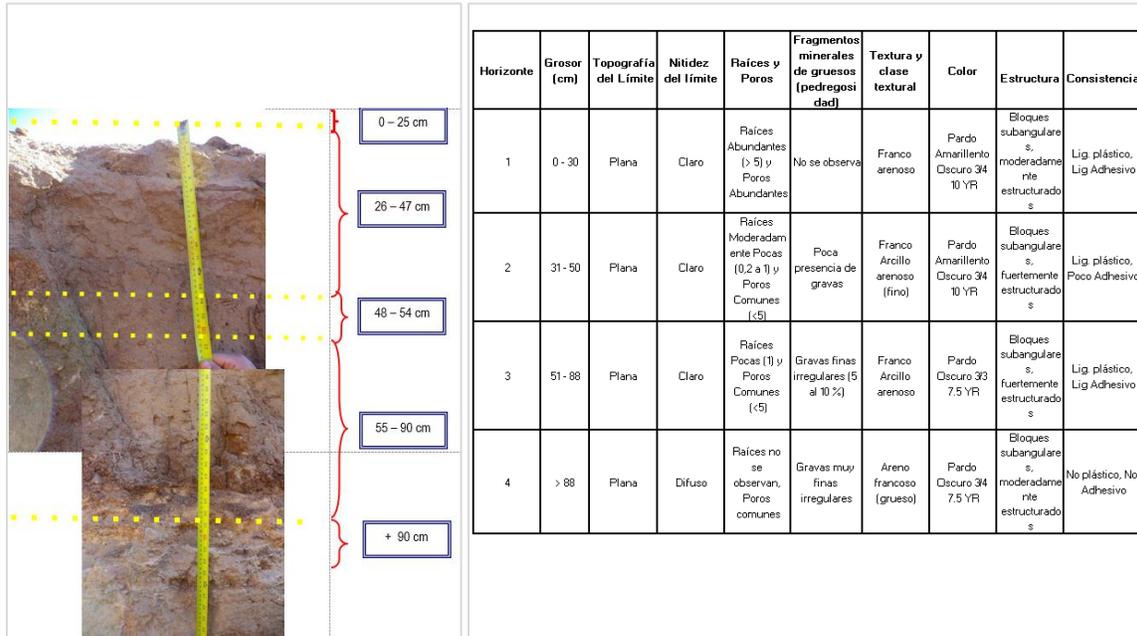


Figura 7. Perfiles de suelo en calicata modal del suelo en piloto tecnológico.

**Análisis físico del suelo:** el suelo superficial es ligeramente plástico con grados de compactación desde los 20 cm de profundidad, sin embargo, presenta condiciones favorables para el cultivo de especies con un sistema radicular superficial (hortalizas) mediante una buena preparación de suelo. Las contantes hídricas (fundamentales para el manejo del riego y la definición de la humedad aprovechable) son 11,8% para capacidad de campo (CC) y 4,9% para el punto de marchitez permanente (PMP) (**Error! Reference source not found.**).

**Análisis químico del suelo:** el análisis químico del suelo de la parcela señala un pH neutro, con una conductancia eléctrica levemente sobre el límite superior (leve a moderada salinidad), baja concentración de materia orgánica y baja concentración de sodio. En general se concluye que no presenta limitantes para el desarrollo de los cultivos (**Error! Reference source not found.**).

INFORME DE RESULTADOS - N° Orden: 173.023  
**ANALISIS SUELO**

Productor : Inia Intihuasi  
Predio : Pepa

Empresa : Inia-intihuasi  
Remite : Cornelio Contreras

Provincia : Elqui  
Comuna : Coquimbo  
Localidad : Pan De Azucar

Fecha muestreo : 23-11-2021 F.ingreso : 23-11-2021  
Fecha análisis : 23-11-2021 F.informe : 17-12-2021

Pag. 1/1

Identificación Cuartel :		Lechuga Escarola Atras	Lechuga Milanesa
Profundidad muestreo(cm) :			
N° de Laboratorio :		241380	241381
<b>Fertilidad</b>			
pH (agua, relación 1:2,5)	1:2,5	7,0 Neutro	7,1 Neutro
C.Eléctrica (en extracto)	dS/m	3,6 Lev.Salino	5,4 Mod.Salino
Materia orgánica	%	1,4 Bajo	1,3 Bajo
Nitrógeno disponible (N)	mg/kg	24 Medio	22 Medio
Fósforo disponible (P)	mg/kg	79 Alto	25 Adecuado
Potasio disponible (K)	mg/kg	152 Adecuado	145 Medio
<b>Microelementos disponibles</b>			
Hierro (Fe)	mg/kg	10,9 Adecuado	10,1 Adecuado
Manganeso (Mn)	mg/kg	25,7 Alto	22,2 Alto
Zinc (Zn)	mg/kg	8,5 Adecuado	7,3 Adecuado
Cobre (Cu)	mg/kg	7,4 Adecuado	5,9 Adecuado
Boro (B)	mg/kg	4,1 Alto	4,2 Alto
<b>Textura</b>			
Arena (2,00 - 0,05 mm)	%	51	59
Limo (0,05 - 0,002 mm)	%	26	20
Arcilla (< 0,002 mm)	%	23	21
Clase Textural		Fco.Arc.Arenosa	Fco.Arc.Arenosa
Densidad aparente (terción)	g/cc	1,75	1,78
Densidad real	g/cc	2,69	2,73
<b>Retención de humedad</b>			
0,3 bar (Capacidad de Campo)	%	11,8	9,8
15,0 bar (Pto.Marchitez Permanente)	%	4,9	4,7
Humedad aprovechable (peso)	%	6,9	5,1
<b>Espacio poroso</b>			
Porosidad total	%	35	35
Microporosidad	%	21	17
Macroporosidad	%	14	18

Equivalencias. C.Eléctrica: dS/m = mmhos/cm; Nutrientes: mg/kg = ppm; Cat.Intercambiables: cmol+/kg = meq/100g

*Figura 8. Análisis de laboratorio físico y químico del suelo de la parcela piloto PEPA.*



## Características del clima en la parcela piloto

La parcela piloto se encuentra dentro del *distrito agroclimático La Serena* el cual es del tipo desértico con influencia marina y régimen de humedad Xérico (BWnXe) (**Error! Reference source not found.**).



Figura 9. Distritos agroclimáticos zona del piloto Pan de Azúcar PEPA (Santibáñez, 2017).

La temperatura varía entre un máximo en enero de 23°C (máximo de 25 °C y mínimo de 20,3 °C dentro del distrito) y un mínimo de julio de 7,6 °C (máximo de 8,1 °C y mínimo de 6,2 °C dentro del distrito). Tiene en promedio 345 días consecutivos libres de heladas. En el año se registra un promedio de 0 heladas. El periodo de temperaturas favorables a la actividad vegetativa dura los 12 meses del año. Registra una acumulación anual de 1.621 días grado (base 10) y 100 horas de frío acumuladas hasta el 31 de Julio. La precipitación media es de 67 mm/año y el periodo seco dura 12 meses, con un déficit hídrico de 1.167 mm/año, por lo que el período húmedo dura 0 meses durante los cuales no se produce un excedente hídrico.

Cuadro 1. Variables meteorológicas en el distrito agroclimático La Serena (Santibáñez, 2017).

Variable	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
T. Max (°C)	26,3	25,8	24,2	22,2	20,1	18,6	18,1	18,2	19,5	21,5	23,8	25,6	22
T. Min (°C)	14,2	13,7	12,5	10,8	9,1	7,9	7,4	7,9	8,7	10,4	12,2	13,7	10,7
T. Med (°C)	19,3	18,9	17,5	15,8	14	12,7	12,2	12,4	13,5	15,3	17,2	18,8	15,6
Días grado (10-30°C)	280	266	226	173	119	90	81	85	107	158	216	263	2065
Dg. Acum. (10-30°C)	917	1183	1409	1582	1701	1792	1873	1958	2065	158	374	637	2065
Hrs. Frío (T<7.2°C)	0	0	0	0	9	34	48	35	15	1	0	0	142



Hf. (T<7.2°C)	Acum.													
		*	*	*	*	9	43	91	126	141	141	141	141	142
R. (cal/cm <sup>2</sup> día)	Solar													
		563	543	489	416	343	289	270	289	343	416	489	543	416
H. Relat. (%)		73	73	73	73	73	73	73	72	72	72	72	72	72
Precipit. (mm)	0	0	1	4	9	15	19	11	5	2	1	0		67
Evap. Pot. (mm)		163	157	142	121	100	84	79	84	100	121	142	157	1448
Def. Hidr. (mm)		163	157	140	117	91	69	60	74	95	119	141	157	1382
Exc. Hidr. (mm)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Heladas (T<0°C)		0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0,3

De acuerdo a los registros meteorológicos realizados por la estación EMA Pan de Azúcar ([www.agrometeorologia.cl](http://www.agrometeorologia.cl)) durante el periodo 2012 hasta 2023, la demanda ambiental (evapotranspiración de referencia, ETo) en la parcela piloto oscila entre 41 mm/mes en el mes de junio (invierno), hasta 142 mm/mes en el mes de enero (verano), con un total promedio acumulado de 1070 mm/año (**Error! Reference source not found.**).

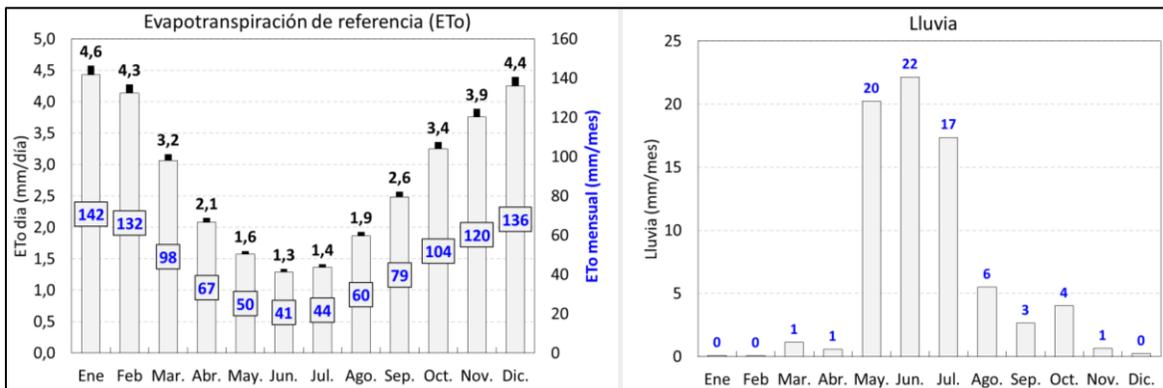


Figura 10. Distribución anual promedio periodo 2012-2023 de la evapotranspiración de referencia (ETo) y las lluvias en la parcela piloto Pan de Azúcar.

### 1.1.4 Marco conceptual-tecnológico utilizado para el monitoreo de las condiciones ambientales y la definición y control del riego.

Como se ha indicado, en este proyecto el marco conceptual implementado para el aumento de la eficiencia hídrica a escala intrapredial requiere el monitoreo de variables ambientales y cultivo, de manera de contar con información para la toma de decisiones en riego. En la **Error! Reference source not found.** se señala un diagrama donde se resume los niveles de monitoreo implementados en la parcela piloto Pan de Azúcar para las diversas escalas de análisis.

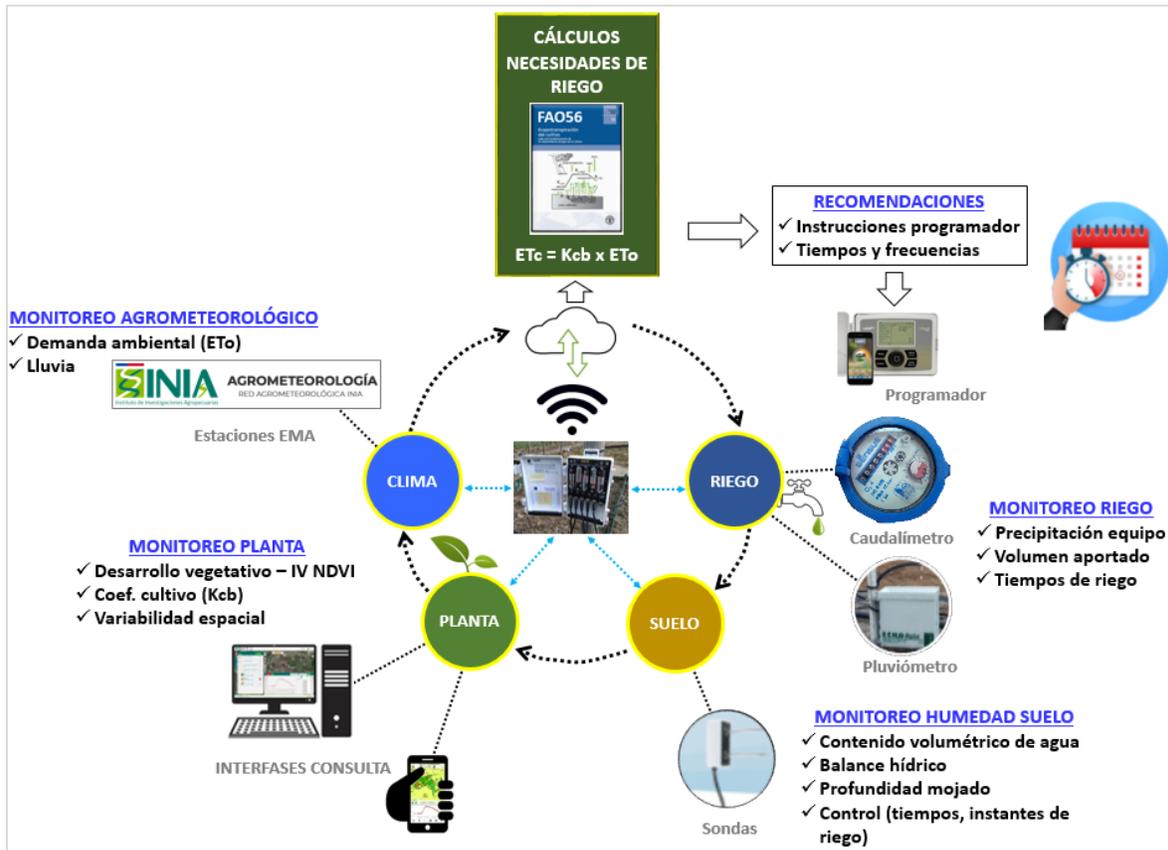


Figura 11. Promedios de evapotranspiración de referencia (ETo) y lluvia en la parcela piloto.

Como se señala en la figura, las diferentes escalas de monitoreo ocurren a nivel de clima (meteorología), planta, suelo y riego, los cuales finalmente confluyen en los cálculos de riego basados en la metodología descrita en FAO Manual N° 56 (Allen et al., 1998).

### 1.1.5. Monitoreo escala PLANTA

Para la consultar el nivel de desarrollo de los cultivos a través del índice de vegetación NDVI, se implementó la plataforma satelital PLAS FONTAGRO (<https://www.agrisatwebgis.com/app/es/agrisat/map>). La plataforma permite la consulta de series temporales de imágenes multispectrales de los satélites Sentinel 2A y 2B del programa Copernicus, de la Agencia Satelital Europea – ESA) y de la evolución temporal del índice de vegetación NDVI. Estos valores son transformados automáticamente a valores del coeficiente de cultivo (Kcb) y desplegada por medio de gráficos interactivos, permitiendo al usuario la definición de un rango de fechas para consultas y la descarga de los valores para su uso en la programación del riego.

En la **Error! Reference source not found.** se muestra la interfaz web de la plataforma PLAS FONTAGRO y la evolución temporal del índice de vegetación NDVI para una consulta en una



parcela piloto Pan de Azúcar. En el **Error! Reference source not found.** se señalan las características de las imágenes disponibles en la plataforma.



Figura 12. Ejemplo de la Plataforma Satelital PLAS – FONTAGRO y la descripción gráfica del desarrollo de un cultivo.

Cuadro 2. Características de las imágenes satelitales disponibles para consulta en la Plataforma PLAS FONTAGRO.

Programa Espacial	Satélite	Cobertura imagen (km)	Resolución temporal (días revisita)	Resolución espacial (metros)
Copernicus (ESA)	Sentinel 2 <sup>a</sup>	100 x 100	10 días	10
Copernicus (ESA)	Sentinel 2B	100 x 100	10 días	10

Adicionalmente, la Plataforma PLAS permite identificar y diferenciar niveles de desarrollo entre sectores del cultivo a través del agrupamiento de valores del índice NDVI en rangos. De este modo es posible establecer análisis de la variabilidad espacial de los cultivos (**Error! Reference source not found.**).

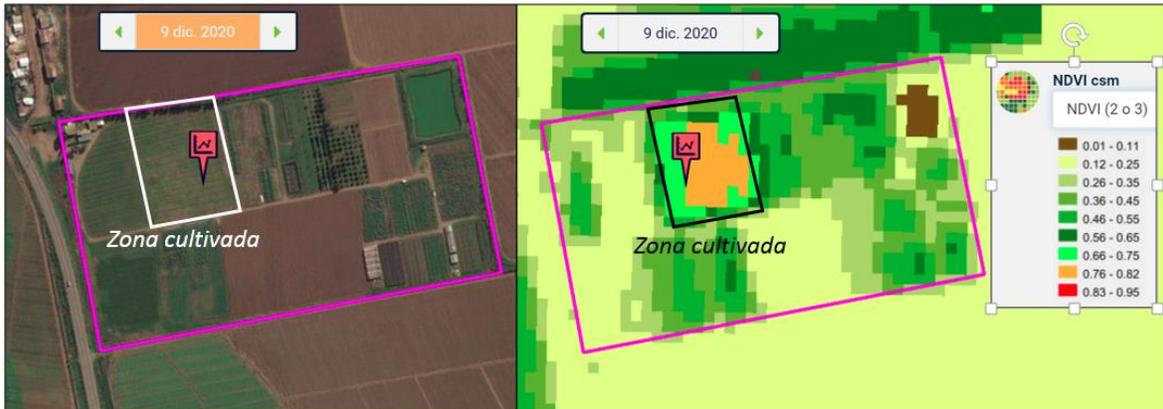


Figura 13. Ejemplo de imágenes del índice de vegetación NDVI desplegada con una escala de colores que permite diferenciar niveles del NDVI y su distribución espacial sobre la parcela de un cultivo.

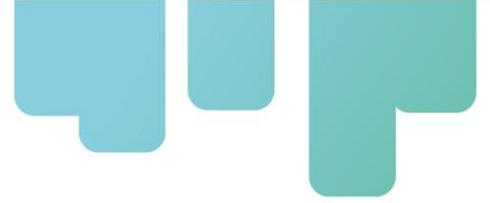
### Monitoreo Riego.

Este nivel de control es fundamental para que los cálculos teóricos de riego se traduzcan en aportes precisos de riego. Para esto, en primer lugar, se evalúa el desempeño del equipo de riego a través del cálculo de coeficiente de uniformidad (CU) y la precipitación efectiva del equipo de riego. El protocolo utilizado es la selección en cada sector o subsector de riego de 4 laterales de riego equidistantes entre sí (para sectores de superficies muy grandes se recomienda la medición de 6 laterales) y de cada lateral se seleccionan 4 emisores, uno en cada extremo del lateral y dos intermedios (**Error! Reference source not found.**). En los emisores seleccionados se recibe la descarga de agua en un periodo de tiempo definido.



Figura 14. Selección de goteros y evaluación coeficiente de uniformidad y precipitación real del equipo de riego en parcela piloto.

A partir de los registros de caudales recibidos de cada gotero evaluado, se elabora un ranking con máximos, mínimos y promedios del agua recibida. A partir de estos, se calcula el CU y la precipitación efectiva del equipo (**Error! Reference source not found.**). En este caso el valor del CU es muy bueno (94,4%) y la precipitación de 0,83 l/h, distinta de los indicado en el caudal nominal de catálogo que indicaba 1 l/h.



*Cuadro 3. Ejemplo de evaluación CU y precipitación del equipo de riego en parcela experimental.*

Punto muestreo	Volumen (ml)	Caudal	N°	Ranking (l/h)
1	13,50	0,81	1	0,90
2	13,25	0,80	2	0,90
3	13,25	0,80	3	0,87
4	13,00	0,78	4	0,87
5	13,50	0,81	5	0,87
6	13,00	0,78	6	0,86
7	13,25	0,80	7	0,84
8	13,00	0,78	8	0,84
9	14,25	0,86	9	0,81
10	14,00	0,84	10	0,81
11	15,00	0,90	11	0,80
12	15,00	0,90	12	0,80
13	14,50	0,87	13	0,80
14	14,50	0,87	14	0,78
15	14,00	0,84	15	0,78
16	14,50	0,87	16	0,78

Promedio general (todos)	Q100	0,83	l/h
Promedio 4 últimos gastos	Q25	0,78	l/h
<b>Coeficiente Uniformidad (%)</b>	<b><math>U=Q25 / Q100</math></b>	<b>94,4</b>	<b>%</b>
Calificación CU (eficiencia riego)	Diagnóstico	Bueno	

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



*Figura 15. Datalogger Zentra, pluviómetro de gotero y caudalímetro utilizados para el monitoreo.*

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



contenido volumétrico de humedad en el suelo (%/%).



Figura 16. Sondas de capacitancia (mod. Teros 10, Decagon Devices) utilizadas para el monitoreo continuo de la humedad en el suelo.

### Monitoreo meteorológico

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

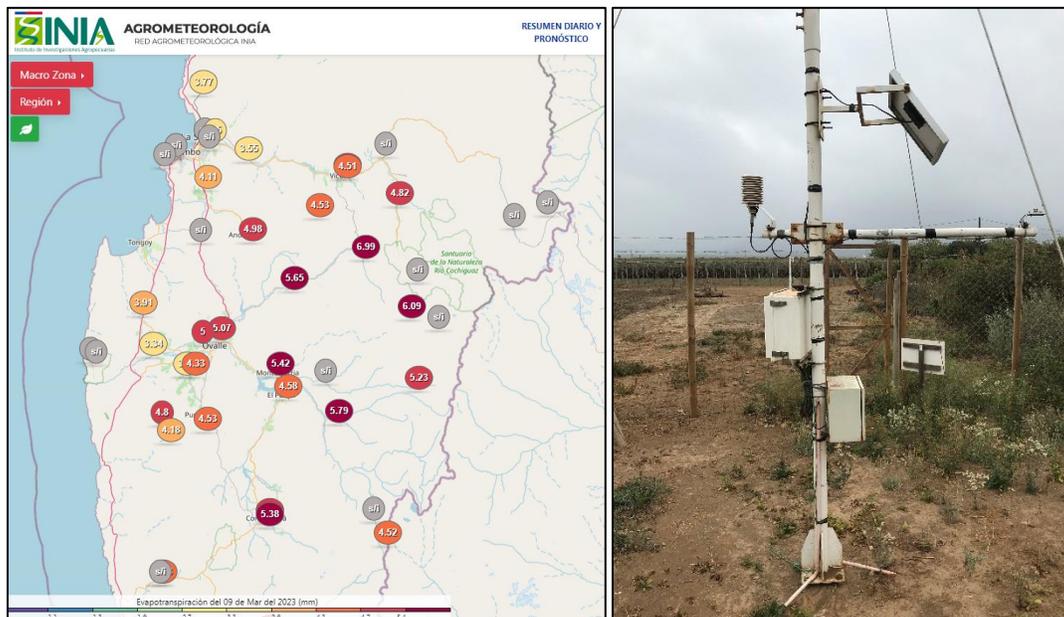
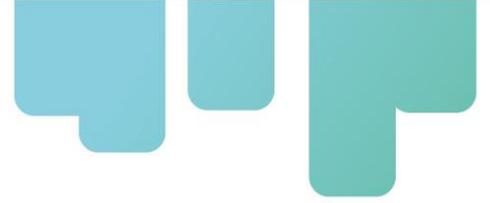


Figura 17. Red de estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) en la región de Coquimbo y estación disponible en la parcela piloto.

### Cultivos monitoreados

Durante el periodo analizado se han monitoreado y asesorado en el aporte preciso de riego (siguiendo la metodología comentada anteriormente) diversos cultivos, que tradicionalmente se



cultiva en la zona de la parcela piloto. Entre estos, se cuenta con el cultivo de papas, lechugas, habas y porotos (**Error! Reference source not found.**).



*Figura 18. Cultivos anuales monitoreados para el ajuste del riego de precisión.*

#### **1.1.6 Estimación de la productividad del agua a escala de parcela.**

Para estimar la productividad del agua, en todas las parcelas piloto establecidas en el proyecto, se calculó la cantidad total de agua utilizada en la parcela durante el ciclo de cultivo. Esto puede obtenerse a través de la medición de la cantidad de agua aplicada mediante el sistema de riego tanto por sondas como por las recomendaciones de riego realizadas localmente con la metodología antes descrita.

La productividad del agua en  $\text{kg}/\text{m}^3$  se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$\textit{Productividad del agua} = \frac{\text{Rendimiento de cultivos (kg)}}{\text{Cantidad total de agua utilizada (m}^3\text{)}}$$

El cálculo de la productividad del agua a escala de parcela tiene como propósito la optimización del uso del recurso hídrico en la agricultura. Con esta información los agricultores y los expertos en gestión hídrica pueden evaluar la eficiencia del riego y la productividad del sistema agrícola en cuestión. Este indicador permite tomar decisiones basadas en evidencia sobre la gestión del agua, permitiendo a los agricultores ajustar sus prácticas de riego para maximizar la producción de cultivos. Además, esta evaluación ayuda a identificar áreas donde se puede implementar



tecnología de riego más eficiente, prácticas de conservación del agua y estrategias de cultivo adaptadas al clima local, contribuyendo así a la sostenibilidad a largo plazo de la agricultura y a la seguridad alimentaria en un contexto de recursos hídricos limitados.



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

### **1.2.1 Validación de nuevas tecnologías para la determinación de las necesidades de riego en cultivo de vides. Piloto Junín, Mendoza.**



#### **1.2.1.1 Introducción**

En el marco del proyecto “Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia en la agricultura ALC-2030”, el Instituto Nacional de Tecnología agropecuaria (INTA) implementó un piloto tecnológico en el departamento de Junín, provincia de Mendoza. El objetivo de este fue caracterizar el balance hídrico de un viñedo regado en forma gravitacional con entrega de agua en forma discontinua (riego por turnado) a partir del sistema de distribución del Canal Constitución (10.000 ha) incluido en el Oasis irrigado por el Río Tunuyán (80.000 ha aprox.).

En esta parcela piloto, dada la imposibilidad de decidir el momento de aplicación del riego por parte del productor, se utilizó el paquete conceptual-tecnológico para caracterizar la temporada de riego mediante un balance hídrico de cultivo y evaluar la respuesta del mismo manejado bajo regímenes habituales en la zona de estudio.

#### **1.2.1.2 Marco conceptual para el manejo del riego**

El marco conceptual ha sido descrito en el punto 1.1.2, es transversal para todas las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia.

### 1.2.1.3 Materiales y métodos

#### Área de estudio.

El sitio de estudio fue una propiedad de vid cv. Moscatel de más de 30 años de edad ubicado en el departamento de Junín, Mendoza, Argentina ( $33^{\circ}8'28,04''$  S;  $68^{\circ}29'11,85''$  O) (Figura 19).

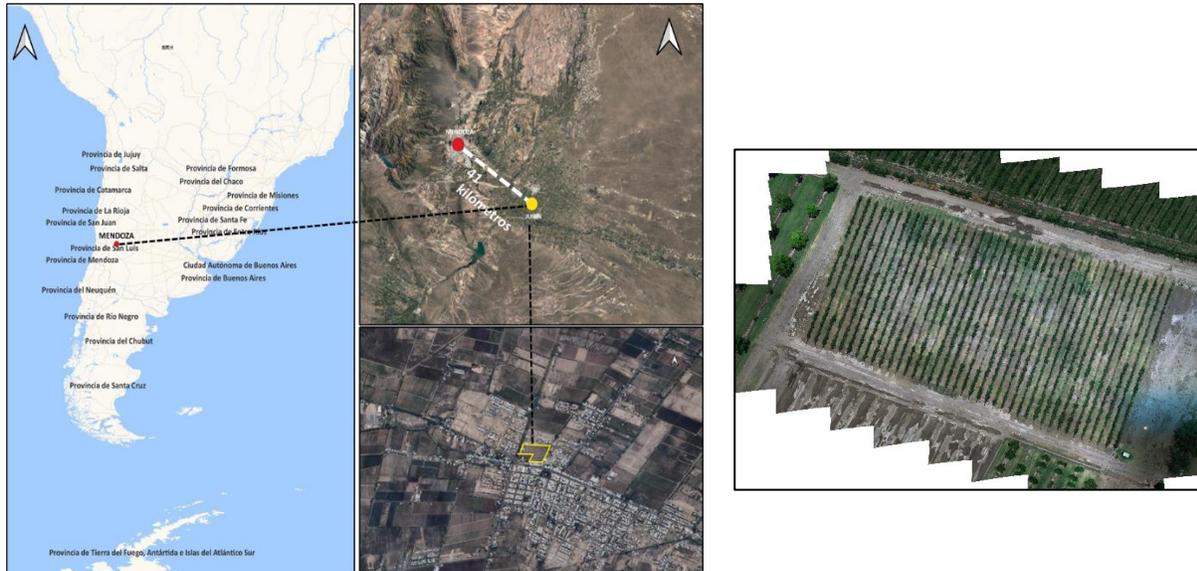


Figura 19. Ubicación piloto tecnológico Junín-Mendoza.

#### Características del suelo en parcela piloto.

##### Descripción del suelo:

El suelo predominante en la zona es Entisol Torrifuvent típico con texturas medias a gruesas, profundos sin presencia de napas freáticas cercanas. En la 4

se presentan los valores del análisis físico químico del suelo de la parcela. En la **Error! Reference source not found.** se presenta la curva de retención hídrica del suelo. Ambas determinaciones se realizaron en el laboratorio de suelos del INTA EEA Mendoza.4



Cuadro 4. Caracterización físico-química de los suelos de la parcela utilizada.

Muestra N°	12918	12919	12920
Cultivo	Vid	Vid	Vid
Varietal	Criolla/Torrentés	Criolla/Torrentés	Criolla/Torrentés
Cuartel	Cuartel 3	Cuartel 3	Cuartel 3
Profundidad [cm]:	0-50	50-100	100-150
<b>Salinidad Básica</b>			
Vol. de Sedimentación [cm <sup>3</sup> /g]	100	108	98
Calificación Textural	Franco	Franco-limoso	Franco
CEes [dS/m]	3,28	3,03	3,58
CEP [dS/m]	5,34	5,48	6,27
Sales probables [me/L]	43,79	44,94	51,4
Humedad de Saturación [g%g]	37,38	41,52	36,9
pH pasta	7,90	7,83	7,82
Cloruros [me/L]	18,82	10,46	12,86
Calcio [me/L] + Mg [me/L]	27,00	31,90	39,50
Sodio [me/L]	14,35	10,22	13,39
RAS	3,90	2,56	3,01
<b>Fertilidad Completa</b>			
P - H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 1:10 [mg/kg]	5,43	1,83	1,89
K int Ac-NH <sub>4</sub> pH 7 [mg/kg]	288	243	353
<b>Nivel de Fertilidad</b>			
Fósforo - H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Alto	Muy Bajo	Muy Bajo
Potasio	Alto	Alto	Alto

El suelo presenta una textura media con niveles de salinidad moderados. La fertilidad en nitrógeno fue baja para los tres niveles de profundidad (datos no mostrados), el nivel de fósforo es alto en el primer estrato, disminuyendo marcadamente en las mayores profundidades debido a su baja movilidad. El potasio por su parte, presenta altos niveles en el perfil completo de suelo, característica común en los suelos de la región.

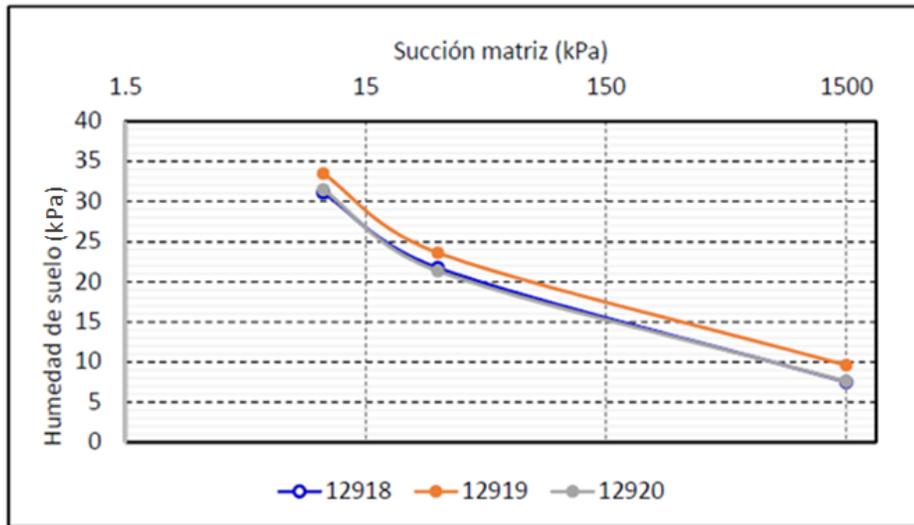


Figura 20. Curva de retención hídrica del suelo en parcela piloto Junín-Mendoza.

Respecto de la humedad aprovechable, esta fluctúa entre el 10% (mínima humedad) hasta valores cercanos al 35% (capacidad de campo)

**Características del clima en parcela piloto.**

El clima de la zona de estudio es desértico, con precipitaciones anuales medias del orden de los 240 mm, concentradas principalmente en la época estival (régimen monzónico).

Cuadro 5. Valores medios mensuales para la estación meteorológica del Servicio Meteorológico

Mes	T° media (°C)	T° max (°C)	T° min (°C)	HR (%)	Velocidad del Viento (km/h)	Pp (mm)	Frecuencia de días con Pp > 1 mm
Enero	24.6	32.4	17.8	56	2.0	45	6.3
Febrero	23.2	31.1	16.5	59	1.7	36	5
Marzo	20.5	28.1	14.8	66	1.7	43	4.4
Abril	15.6	23.5	10.1	70	1.4	16	2.6
Mayo	11.3	19.1	6.1	71	1.3	9	2.2
Junio	8	15.7	2.7	70	1.3	4	1.4
Julio	7.5	15.4	1.9	65	1.4	7	1.9
Agosto	10.2	18.6	4	57	1.6	6	1.6
Septiembre	13.3	21.5	6.8	55	1.9	12	2.7
Octubre	18	26	11	51	2.1	13	2.2
Noviembre	21.3	29.2	14	51	2.3	20	3.7
Diciembre	23.9	31.7	16.8	52	2.1	28	5.3

Respecto de la la ETo los meses de mayor demanda van desde noviembre a febrero, sin embargo, durante esos meses también se concentra la precipitación de lluvia.

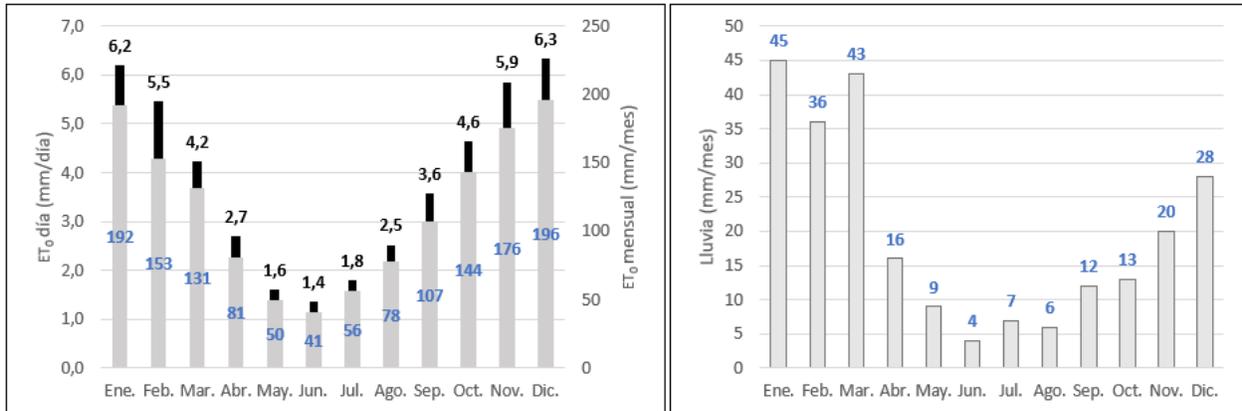


Figura 21. Distribución anual promedio periodo 2012-2021 de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>) y del periodo 1982-2010 de las lluvias en Junín, Mendoza.

#### 1.2.1.4 Marco conceptual-tecnológico utilizado para el monitoreo de las condiciones ambientales y la definición y control del riego.

El Marco conceptual es transversal para todas las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia y fue descrito en el punto 1.1.4.

#### 1.2.1.5 Monitoreo escala PLANTA



Figura 22. Cultivo de vid monitoreado. Junín, Mendoza.



Para la consultar el nivel de desarrollo del cultivo a través del índice de vegetación NDVI , se utilizó la plataforma satelital PLAS FONTAGRO (<https://www.agrisatwebgis.com/app/es/agrisat/map>).

En la 23 se muestra los valores de Kcb obtenidos a través de los valores de NDVI mediante la ecuación propuesta por Campos et al. (2010) que expresa:  $K_{cb}=1,44 \text{ NDVI}-0,1$ .

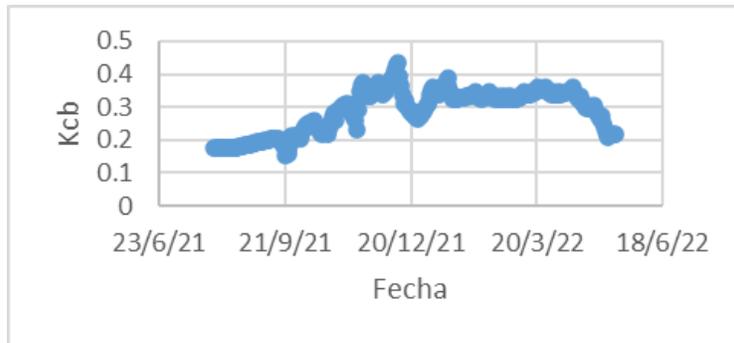


Figura 23. Evolución del  $k_{cb}$  estimado a partir de los valores de NDVI para la parcela de estudio.

El valor máximo alcanzado corresponde al mes de diciembre, siendo de 0,43. La caída abrupta registrada en forma posterior se debió en parte a la realización de la labor cultural de “despampanado” o “envoltura” de brotes sumada a la ocurrencia de una tormenta de granizo el día 11-12-2021. Esto ocasionó que los valores registrados, 15 días posterior al evento, alcanzaran un mínimo de 0,27.

Así también, se realizó el control del estado hídrico de cultivo en distintos momentos del ciclo (figura 24) a través de la medición del potencial hídrico de tallo según Shackel, et al. (2000). Esta medición pretendió detectar la presencia o ausencia de estrés hídrico en la planta en momentos críticos según el estado fenológico y la ocurrencia del riego.

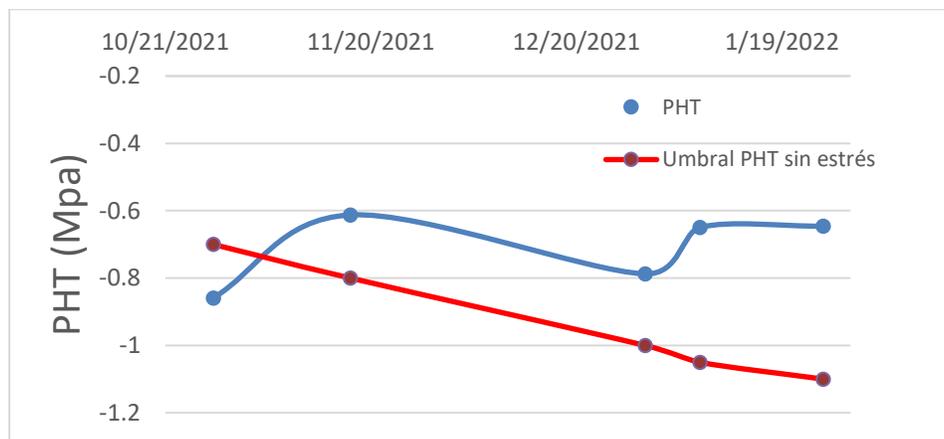


Figura 24. Evolución del potencial hídrico de tallo (PHT) del cultivo de vid en el ciclo 2021-2022.

## Monitoreo del riego

Para determinar el desempeño de riego se realizó una medición en la parcela de distintas variables al momento de la ocurrencia de un evento de riego (figura 25). Estas variables comprenden datos del cultivo (largo de hileras y distancia entre ellas), datos del suelo (pendiente, tasa de infiltración, humedad presenta pre y post riego) y del riego (caudal, tiempo de aplicación, tiempo de avance y receso de agua en la hilera). A partir de los datos obtenidos se utilizó el software de simulación WinSRFR (v 5.1.1) con el cual se obtuvieron los valores de eficiencia de aplicación, de la uniformidad de distribución y percolación profunda. A partir de este análisis se determinó que la lámina de aplicación media de agua en cada evento de riego era de 62 mm.

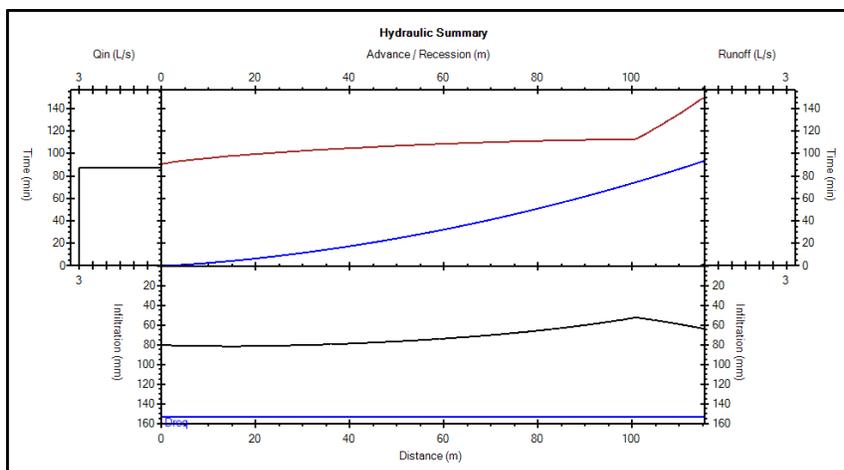


Figura 25. Resumen hidráulico del avance y receso del agua de riego en el evento evaluado. (WinSRFR v.5.1.1)

La humedad de suelo se evaluó mediante el muestreo gravimétrico antes y después del evento del riego y la utilización de sondas FDR (10HS, Decagon, USA). En la Figura 26 puede observarse la evolución de la humedad de suelo expresada como lámina de agua para el ciclo evaluado.

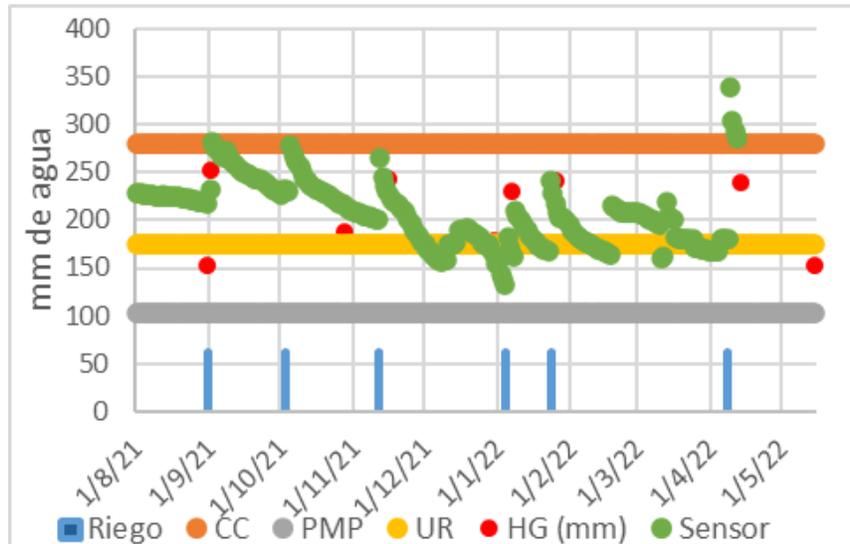


Figura 26. Evolución del contenido de humedad de suelo promedio en 90 cm de profundidad, expresados como lámina de agua equivalente en mm. CC (capacidad de campo), UR (umbral de riego teórico), PMP (punto de marchitez permanente), HG (humedad gravimétrica), Sensor (sensor FDR). Barras azules indican eventos de riego en mm.

En esta figura puede observarse que entre el 3° y 4° evento del riego transcurrieron 55 días y entre el 5° y 6° transcurrieron 76 días. Si bien estos intervalos prolongados entre dos riegos consecutivos pueden sugerir que las necesidades hídricas del cultivo respecto del total de sus necesidades no han sido cubiertas, los valores de potencial hídrico de tallo mostraron un nivel de hidratación mayor respecto de los valores referidos por Ojeda et al (2007) como umbral de estrés hídrico en plantas de vid. Esto permite inferir que el cultivo no estuvo sometido a estrés hídrico que pudiese afectar su rendimiento.

### Monitoreo meteorológico

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



Figura 27. Estación meteorológica.

### Cultivos monitoreados

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

La figura 28Error! Reference source not found. muestra la evolución temporal del desarrollo del cultivo de vid cv. Moscatel rosado conducido en espaldero bajo. La cantidad de imágenes satelitales disponibles en la plataforma permitió describir sin problemas las diferentes fases de desarrollo vegetativo del cultivo.





*Figura 28. Monitoreo de cultivo con valores de NDVI para el ciclo 2021-2022.*

#### **1.2.1.6 Estimación de la productividad del agua a escala de parcela.**

La estimación de la productividad del agua se detalló en el punto 1.1.6. La metodología es transversal para las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia.

#### **1.2.2 Validación de nuevas tecnologías para la determinación de las necesidades de riego en cultivo de tomates para la industria. Piloto San Juan.**



## Piloto tecnológico San Juan



### 1.2.2.1 Introducción.

En el marco del proyecto “Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia del uso del agua en la agricultura de ALC al 2030”, se determinaron las necesidades de riego del cultivo de tomate para industria, cultivar HM 7883, su comparación con el Kc determinado por la Asociación Tomate 2000 y su relación con la productividad del agua, en el departamento Pocito, provincia de San Juan.

### 1.2.2.2 Marco conceptual para el manejo del riego

El marco conceptual ha sido descrito en el punto 1.1.2, es transversal para todas las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia.

### 1.2.2.3 Materiales y métodos

**Área de estudio:** La parcela piloto se encuentra en el departamento Pocito, en el suroeste de la provincia de San Juan.

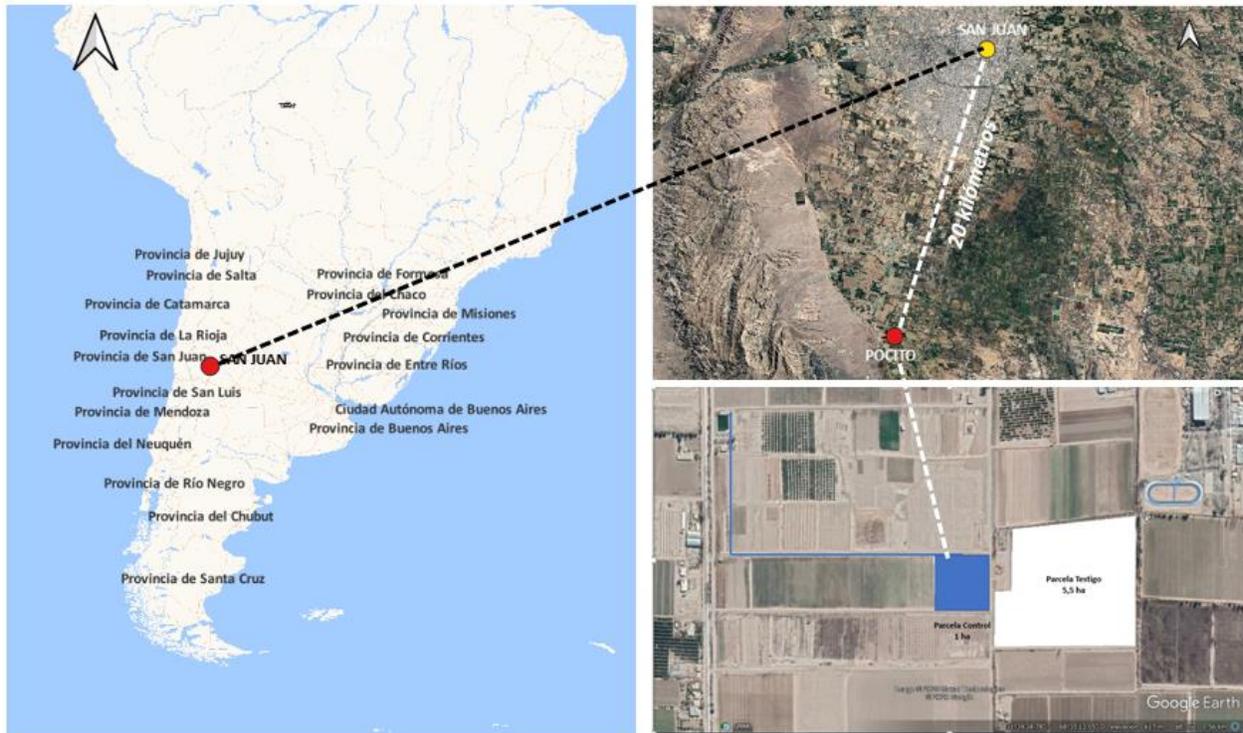
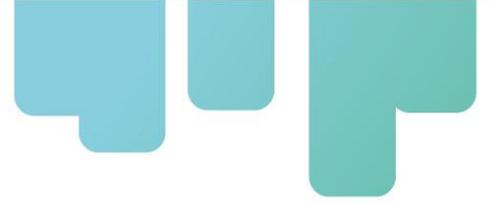


Figura 29. Ubicación piloto tecnológico en el departamento de Pocito, San Juan.

### Características del suelo parcela piloto.

Los datos de las características del suelo, en un perfil de profundidad de 1 metro serán entregados como resultado en el producto 5.

### Caracterización del clima en parcela piloto.

El clima del departamento de Pocito la zona de estudio es seco, con precipitaciones anuales medias del orden de los 90 mm, concentradas principalmente en la época estival (régimen monzónico).

Cuadro 6. Valores medios mensuales para la estación meteorológica del Servicio Meteorológico

Mes	T° media (°C)	T° max (°C)	T° min (°C)	HR (%)	Velocidad del Viento (km/h)	Pp (mm)	Frecuencia de días con Pp > 1 mm
Enero	27,3	35,1	19,8	43	15,3	17,4	2,8
Febrero	25,6	33,3	18,4	46,9	14,6	22,5	2,2
Marzo	22,8	30,5	16,1	52,6	13	10,8	1,9
Abril	17,3	25,3	10,9	57,3	11,5	4,6	0,9
Mayo	12,3	20,5	6	62,2	9,7	3,4	0,7
Junio	8,4	17,3	1,5	60,2	9,8	1,8	0,3
Julio	7,5	16,7	0,3	55,1	10,4	1,3	0,4
Agosto	10,7	20,3	2,7	45,5	11,7	2,6	0,4

Septiembre	14,9	23,8	6,6	40,8	13,7	3,7	0,8
Octubre	19,6	27,9	11,3	38,8	16,4	2,9	0,8
Noviembre	23,5	31,6	15	38,2	17,2	7,2	1,1
Diciembre	26,4	34,4	18	38,1	16,6	12,4	1,6

El periodo de mayor ETo es desde noviembre a febrero (Ibáñez, et al. 2016), periodo donde además se presenta la mayor concentración de lluvias (figura 30).

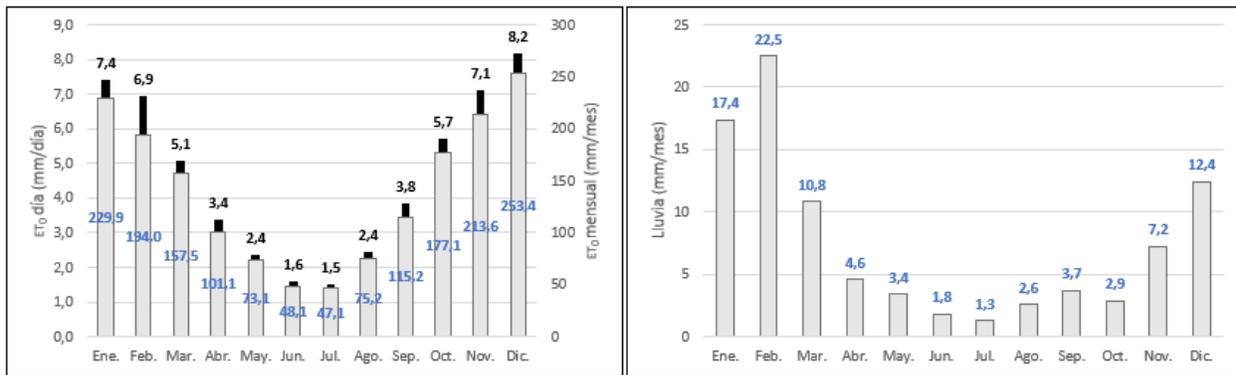


Figura 30. Distribución anual promedio periodo 1969-2010 de la evapotranspiración de referencia (ETo) y del periodo 1991-2020 de las lluvias en San Juan.

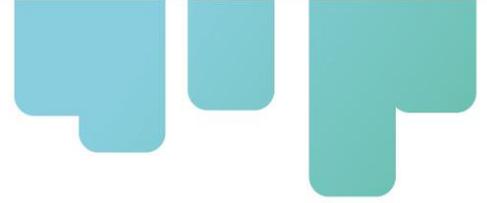
#### 1.2.2.4 Marco conceptual-tecnológico utilizado para el monitoreo de las condiciones ambientales y la definición y control del riego.

El Marco conceptual es transversal para todas las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia y fue descrito en el punto 1.1.4.

#### 1.2.2.5 Monitoreo escala PLANTA



Figura 31. Cultivo de tomate monitoreado. Departamento de Pocito, San Juan.



### **Monitoreo del riego**

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

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

Además, en el momento de la cosecha y sobre tres sectores de la subunidad evaluada (cabecera, medio y pie), se determinaron parámetros de calidad de frutos: calibre, concentración de sólidos solubles, prueba de rajado, pH, peso de 50 frutos.

### **Monitoreo meteorológico**

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

### **Cultivos monitoreados.**

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

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

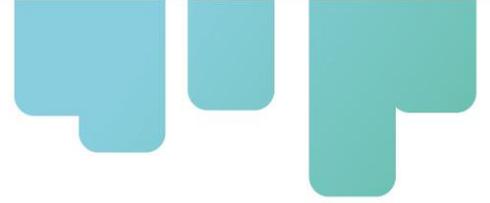
El monitoreo desarrollo del cultivo se realizó con el uso del índice de vegetación NDVI disponible en la plataforma PLAS, con el objetivo de establecer los valores de coeficiente de cultivo basal para las condiciones reales del predio, como ejemplo presentamos la figura 32.



Figura 32. Monitoreo de cultivo de tomate con valores de NDVI entre el 01-01-2021 y 21-12-2021.

#### 1.2.2.6 Estimación de la productividad del agua a escala de parcela.

La estimación de la productividad del agua se detalló en el punto 1.1.6. La metodología es transversal para las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia.



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



#### 1.2.3.1 Introducción

En el marco del proyecto “Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia en la agricultura ALC-2030”, el Instituto Nacional de Tecnología agropecuaria (INTA) implementó un piloto tecnológico en la provincia de Río Negro, Patagonia Norte.

Somos un grupo de trabajo multinstitucional con objetivos de trabajo en común, aumentar la eficiencia en el uso del agua a través del uso de marcos conceptuales y nuevas tecnologías de precisión aplicadas a los sistemas agropecuarios. Siendo los objetivos del proyecto FONTAGRO:

- Modernización del riego en los diferentes sistemas productivos.
- Disponer de información con alta resolución espacial y temporal.
- Transformar los sistemas de gestión tradicional del riego en sistemas de alta precisión.

Los integrantes son: Dr. Ing. Agr. Roberto Simón Martínez (INTA Valle Inferior y UNRN), Mg. Ing. Agr. Lucio Reinoso (UNRN), Mg. Ing. Agr. Evelyn Neffen (INTA Valle Inferior y UNRN), Mg. Lic. Ayelén Montenegro (INTA Alto Valle y Universidad Nacional del Comahue), Lic. Hernán Zelmer (INTA Valle Inferior y Universidad Nacional del Comahue), Mg. Ing. Agr. Enrique Muzi (INTA Valle Inferior y UNRN).

#### 1.2.3.2 Marco conceptual para el manejo del riego

El marco conceptual ha sido descrito en el punto 1.1.2, es transversal para todas las parcelas

piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia.

### 1.2.3.3 Materiales y Métodos

#### Área de estudio

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

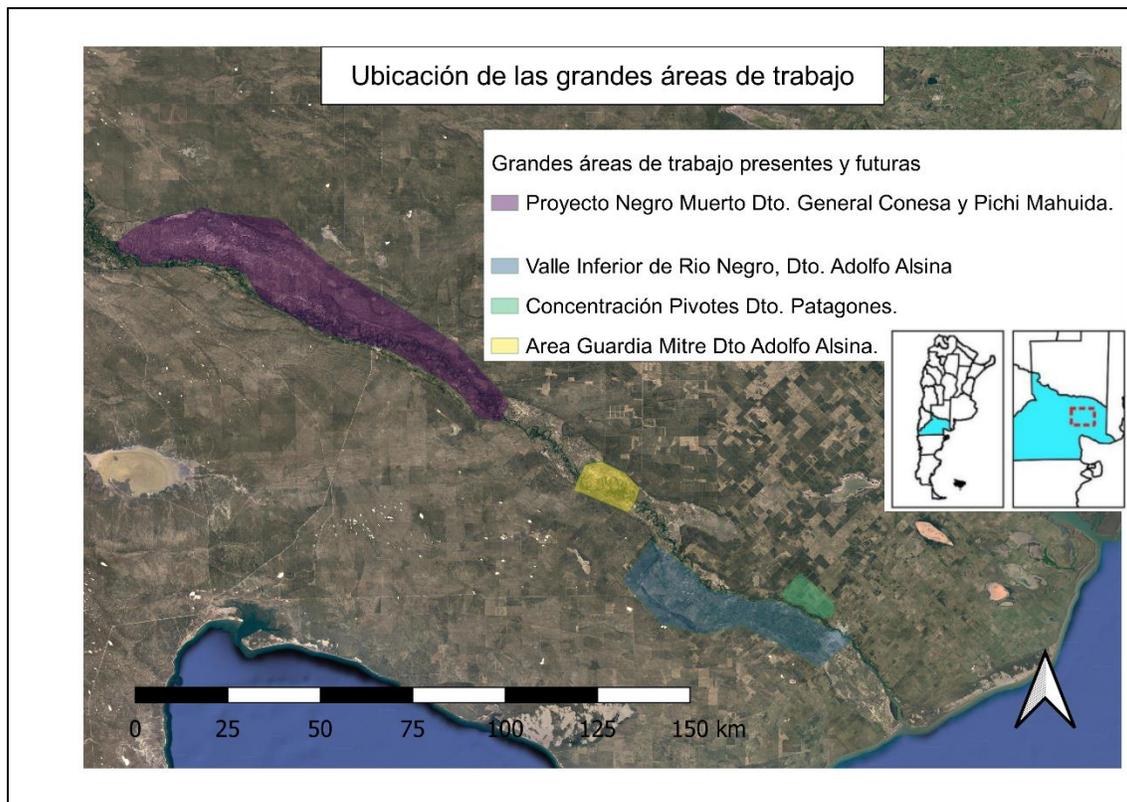
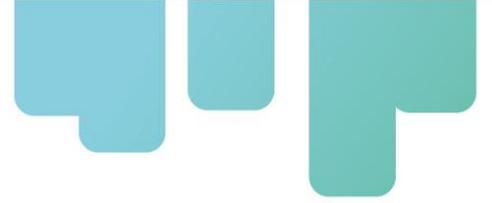


Figura 33. Ubicación de los valles de Negro Muerto, Guardia Mitre y zona de riego del partido de Patagones.

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

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

#### Características del suelo en la parcela piloto.



La parcela piloto se encuentra sobre suelos de origen aluvional y coluvional. Los pivotes se ubican sobre suelos poco desarrollados con contenido de materia orgánica entre 1 y 1,5%, sin mayores problemas de salinidad ni sodicidad. Gran parte de esta región conforma una región de desarrollo propuesta y período próximo a definición de obras por el Plan Nacional Agua Secretaria de Infraestructura y Políticas Hídricas (SlyPH, 2018).

Las características generales del relieve del valle es que conforma una vasta planicie de relieve llano a muy suavemente ondulado con pendiente baja, menor a 0,5 %, a excepción de los sectores contiguos a las áreas de barda, donde se presenta inclinado alcanzando hasta el 4%

#### **Características del clima en parcela piloto.**

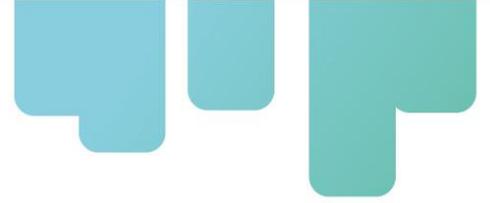
La ETo anual es del orden de los 1500 mm, el período libre de heladas de 200 días y la precipitación anual del orden de entre los 300 y 400 mm.

Por las características mencionadas de precipitación y ETo el riego es integral (prácticamente no se considera el aporte del agua de lluvia). Como consecuencia, la lámina anual a aplicar con riego es alta lo que se corresponde con una alta demanda de energía, lo que lleva a una incidencia muy importante del agua de riego en los costos de producción.

En el partido de Patagones no existe una red oficial de riego, solo en las terrazas más bajas y cercanas al río son regadas por bombeo pequeños establecimientos. La superficie de regada actualmente es superior a las 5000 ha con una evolución muy importante en los últimos 8 años. La calidad de agua de riego es de baja salinidad ( $CE < 0,24 \text{ dS / m}$ ) y un pH que varía entre los 7,5 y 8,5.

#### **1.2.3.4 Marco conceptual-tecnológico utilizado para el monitoreo de las condiciones ambientales y la definición y control del riego.**

El Marco conceptual es transversal para todas las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia y fue descrito en el punto 1.1.4.



### 1.2.3.5 Monitoreo a escala de PLANTA



*Figura 34. Cultivo de maíz monitoreado. Villa Regina, Provincia de Río Negro.*

#### **Monitoreo del riego**

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

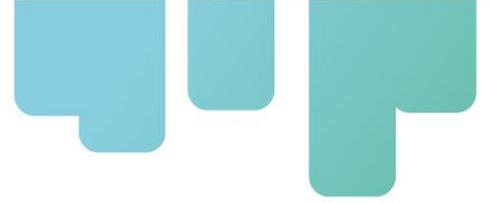
También se añadieron los índices de Humedad de Diferencia Normalizada y el índice de estrés hídrico (NMDI y MSI por sus siglas en inglés) para realizar un monitoreo espacial de la humedad del pivot, en relación a las lluvias y los riegos registrados. Estos datos fueron comparados con un seguimiento de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

Es importante destacar que no existió en los dos años un manejo específico del riego o diferencial, por lo tanto, se monitoreo el manejo por parte del establecimiento y se comparó con el manejo que hubiera sido recomendado (Figura 34).



Figura 35. Colocación de sensores durante el primer año de estudio en el pivot 16.

Con respecto al trabajo a través de GEE (<https://code.earthengine.google.com/>), es importante destacar que es una plataforma en línea que permite explorar, analizar y visualizar información geoespacial. Con GEE podemos acceder a una gran cantidad de datos satelitales y geográficos, y realizar análisis avanzados sin necesidad de descargar o procesar gran cantidad de información en la computadora, ya que trabaja en línea. El protocolo utilizado para GEE en la obtención del índice NDVI y su análisis en la temporada 2020-2021, para luego analizar datos de las subsiguientes temporadas, es el siguiente: 1) se detalla el periodo de interés para la colección de imágenes Sentinel: En GEE, las colecciones de imágenes contienen datos recopilados por satélites a lo largo del tiempo, para concentrar un período específico, se ajustó la colección de imágenes Sentinel para el intervalo en particular 15/10/2020 – 21/04/2021; 2) se establece un filtro de nube con 20% y con 5%: Cuando se trabajan con imágenes satelitales ópticas, es común que las nubes obstruyan la vista de la Tierra. Se probaron dos filtros para comparar resultados, excluyendo imágenes con más del 20% de su área cubierta por nubes y con más del 5% de cobertura de nubes. Esto aseguró que las imágenes que utilizaras estuvieran relativamente libres de nubosidad, mejorando la calidad del análisis; 3) Se establece un filtro de efecto borde: Al procesar imágenes, es importante considerar el efecto de los bordes, donde la calidad puede disminuir debido a la forma en que los sensores capturan la información. Al utilizar el filtro de efecto de borde, de ser necesario se incluye para eliminar los píxeles en los bordes de las imágenes que podrían no ser tan confiables o relevantes para tu análisis, ayudando a mantener una calidad consistente en todo el conjunto de datos; 4) Cálculo de Índices espectrales: Se realizaron scripts en GEE para el cálculo del NDVI, NDMI y MSI para el período analizado. El NDMI y MSI utilizan las bandas SWIR y NIR, ambas están asociadas al contenido de agua de las plantas y el suelo. El primero es un cociente de suma algebraica de las bandas. Adopta valores de entre - 1 y 1, siendo un potente indicador del estrés hídrico. Los valores negativos que se acercan a -1 indican la falta de agua, mientras que valores de 1 se asocian al anegamiento. Por lo tanto, cada valor intermedio corresponderá a una situación agronómica ligeramente diferente. El MSI se calcula como el cociente entre la banda SWIR y la NIR, adopta valores que van desde cero en adelante. Cuando dicho valor es ms alto indica falta de agua. El NDVI se calculó utilizando la diferencia entre la reflectividad del infrarrojo cercano (NIR) y la reflectividad del rojo (Red) en una imagen satelital o aérea. Y el valor de Kc se obtuvo a partir del mismo NDVI ( $Kc = 1.25 \cdot NDVI + 0.1$ ) según Calera *et al.*, 2014; 5) Resultados de salida expresados como valores promedio en el área de interés: después de aplicar los filtros y preparar las imágenes, se calcula el valor promedio de los píxeles en un área específica. Esto



puede ser útil para identificar tendencias y patrones en los datos. Para la elaboración de los mapas se trabajó desde QGIS para optar por diferentes visualizaciones y análisis espaciales, luego de exportar el archivo en formato GeoTIFF del ráster de cada índice en GEE.

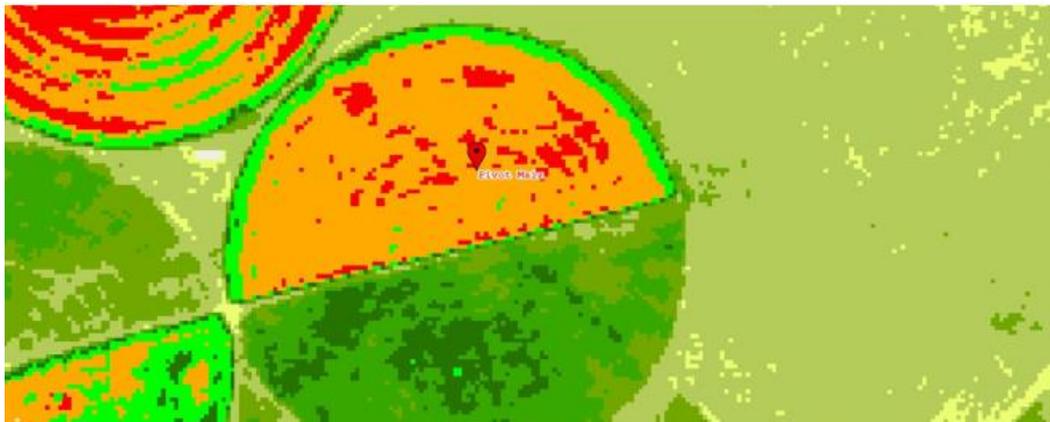
Los mapas obtenidos son herramientas de análisis para supervisar globalmente y en detalle (pixeles de 8-10 m) el cultivo y las condiciones de crecimiento y desarrollo de los cultivos.

### **Monitoreo meteorológico**

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

### **Cultivos monitoreados.**

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



*Figura 36. Cultivo de maíz monitoreado con plataforma PLAS-FONTAGRO.*

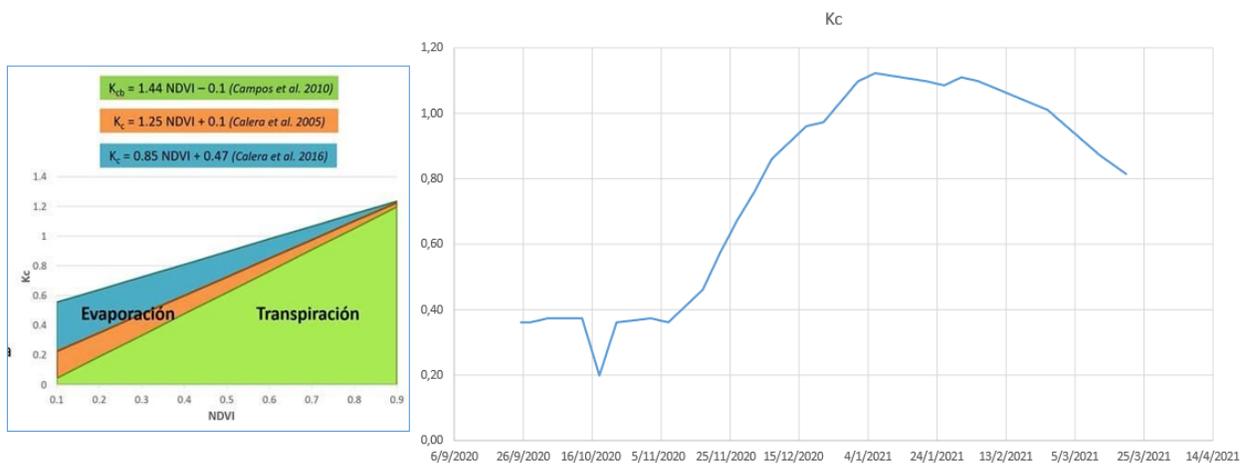
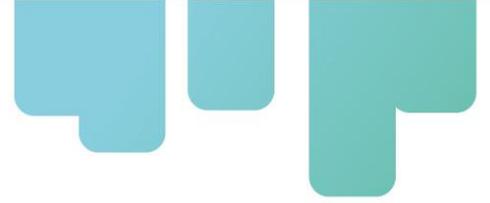


Figura 37. Monitoreo del Kc del cultivo de maíz con la plataforma PLAS-FONTAGRO.

### 1.2.3.6 Estimación de la productividad del agua a escala de parcela.

La estimación de la productividad del agua se detalló en el punto 1.1.6. La metodología es transversal para las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia.



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

#### 1.3.1 Validación de nuevas tecnologías para la determinación de las necesidades de riego en un conjunto de cultivos en el Piloto Distrito de riego Roldanillo, La Unión y Toro RUT.



##### 1.3.1.1 Introducción

Con el objetivo de mejorar el uso de los recursos hídricos a escala intra-predial (parcela), dentro del proyecto **“Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia del uso del agua en la agricultura de ALC al 2030”**, Agrosavia plantea la estrategia del establecimiento un balance hídrico sitio específico, utilizando herramientas tecnologías modernas para el monitoreo y manejo del riego intrapredial. Para esto se plantea el desarrollo de dos zonas piloto, ubicados en el Valle del Cauca, Colombia. El piloto que se describe se ubica en el Distrito de riego RUT (D.RUT) que ocupa los municipios de Roldanillo, La Unión y Toro, y cuenta con el apoyo de la asociación de usuarios del distrito de riego RUT - ASORUT.

##### 1.3.1.2 Marco conceptual para el manejo del riego

El marco conceptual ha sido descrito en el punto 1.1.2, es transversal para todas las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia.

### 1.3.1.3 Materiales y métodos

#### Área de estudio

El distrito de riego RUT – D.RUT, se ubica al norte del departamento del Valle del Cauca y ocupa la zona plana, delimitada entre la cordillera Occidental y el río Cauca, de los municipios Roldanillo, La Unión y Toro (Figura 38). La principal fuente hídrica del D. RUT es el río Cauca, más comparte el abastecimiento de la demanda hídrica agrícola, pecuaria y doméstica, con el acuífero del sector norte del departamento del Valle del Cauca.

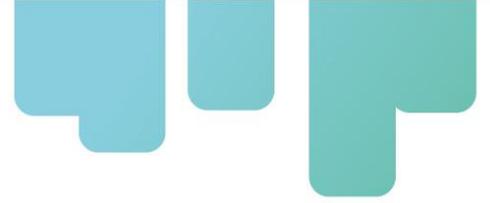


Figura 38. Ubicación piloto distrito de riego RUT.

#### Características del suelo de la parcela piloto.

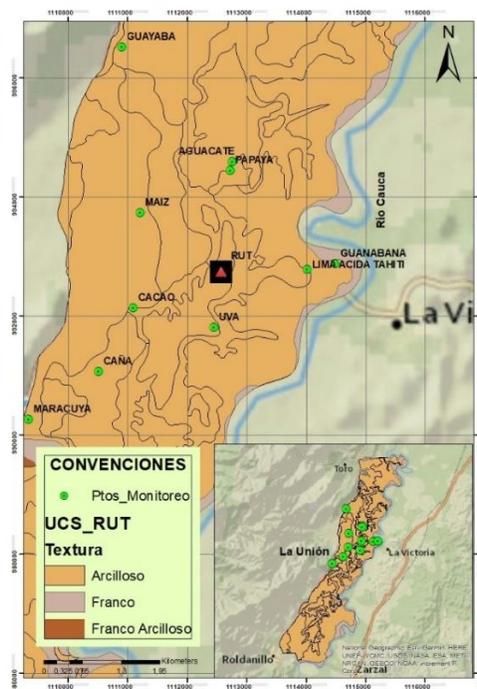
Respecto del ambiente productivo en el distrito, el distrito RUT se encuentran tres tipos de paisaje, abanicos y planos aluviales, diques naturales y bacines. Los abanicos y planos aluviales se ubican en una faja paralela a la cordillera Occidental, comprendida entre los diques antiguos del río Cauca y el pie de monte. La textura de esta franja va de pesado a liviano, con mucha variabilidad; generando un drenaje bueno cerca de la cordillera, regular, a medida que se aleja y llega a ser lento en la parte más baja de los abanicos. La pendiente varía entre 3-7 % cercanos al pie de monte. La mayor parte de estos suelos son profundos, con cordones de piedra y gravilla (IGAC-CVC, 2004).

Los suelos de diques naturales forman parte de la planicie de inundación del río Cauca. Están formados por materiales más gruesos. La textura varía de pesados a livianos y los drenajes de buenos hasta encharcados por aguas lluvias. La topografía es ligeramente ondulada y la pendiente no excede del 3%. La profundidad efectiva es limitada, en ocasiones, por la presencia de sales en horizontes inferiores (IGAC-CVC, 2004).



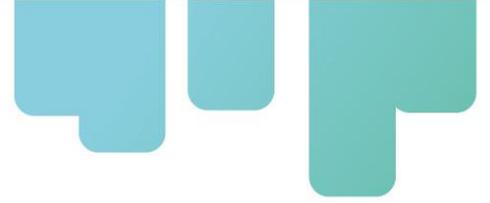
Los suelos de bacines son suelos muy pobremente drenados, con un micro relieve plano cóncavo y textura arcillosa en todo el perfil, lo cual origina un drenaje muy lento. El drenaje externo en algunos casos puede ser inundable por uno o varios meses durante el año, sin embargo, con los drenajes construidos, estos terrenos se han podido cultivar. Son suelos profundos, con una pendiente que no excede el 3% (IGAC-CVC, 2004).

**Textura y C:** Tal como se puede observar en la figura 39 clase textural de mayor predominancia en el distrito de riego RUT es la arcillosa, de importancia en la zona de estudio. La clase franca, se observa en la margen del río Cauca, dado el aporte de sedimentos de todo tipo sobre esta área.



*Figura 39. Clases texturales presentes en el Distrito RUT. Fuente información cartográfica IGAC-CVC, (2004).*

Los análisis de suelos hechos en los sitios experimentales corroboran la textura arcillosa para los suelos a la profundidad de las raíces. Otros de los parámetros físicos relevantes determinado, fue la capacidad de campo; información clave para definir el programa de riego. Los valores de capacidad de campo fueron determinados de dos maneras. La primera con análisis en laboratorio, desde la curva de retención de humedad. Estos resultados fueron descartados, ya que se consideraron muy altos, aún para esta condición de prevalencia de arcillas, partiendo del criterio de Israelsen & Hansen (1979), que, un suelo arcilloso tendría una capacidad de campo (CC) alrededor de 36% y punto de marchitez permanente (PMP) 17%.



Una mayor precisión, se obtuvo con el segundo método. Se extrajo el valor de CC desde la serie de humedad, entregada por los sensores de humedad del suelo, ubicados en la profundidad media de raíces. Esto se hizo extractando la moda de la serie de tiempo después de un evento de precipitación o riego que genere un proceso de drenaje instantáneo (cuadro 7 **Error! Reference source not found.**).

*Cuadro 7. Capacidad de campo extractada de la serie de humedad del suelo*

<b>Cultivo</b>	<b>CC (%)</b>
Aguacate	38
Cacao	34
Caña	44
Guanábana	40
Guayaba	36
Lima Tahití	48
Maracuyá	46
Maíz	50
Papaya	36
Vid	48

Cada serie, con 72 datos por día y tan extensa como el ciclo mismo del cultivo, presenta varias repeticiones de lo que se llamaría un “evento de secado”. Este evento presenta un máximo, es decir un estado de alta humedad, generado por un evento de riego o precipitación, el cual drena hasta alcanzar un período de humedad estable y un mínimo, este también tiende a ser estable, aquí, el suelo pierde humedad a una tasa muy baja. Cada “evento de secado” en cada serie y para cada especie, fue analizado de manera independiente. En la sección estable, alcanzada después del proceso de drenaje rápido, se determinó la moda, y esta fue asumida como la CC. Entendido que aún, bajo la estabilidad, la humedad a CC, puede variar, aunque sea de forma muy “ligera”, se tomaron los datos dentro del período “estable”, con (+/-)1% del valor de la moda.

**Química del suelo:** Respecto de la química, se hizo análisis para los suelos de las parcelas experimentales, mostrando un patrón muy característico **Error! Reference source not found.** Se presenta un déficit generalizado en el D.RUT de B, Fe, Mn y Zn; asimismo, un exceso de Cu, P, S Ca, K y Mg, tomando como referencia los niveles medios reportados por Osorio (2014), para suelos del trópico.

*Cuadro 8. Química de suelos de las fincas piloto del D.RUT*

<b>Parámetro</b>	<b>B</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Zn</b>	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>
	<b>(mg/kg)</b>								<b>(cmol/kg)</b>	
<b>Aguacate</b>	0,46	11,55	20,78	1,31	137,85	20,47	2,95	14,36	0,98	8,76
<b>Cacao</b>	0,36	22,5	53,23	6,66	104,85	6,57	2,33	14,54	0,72	8,23



<b>Caña</b>	0,43	8,78	8,13	1,09	8,41	92,37	<1	20,52	0,42	18,92
<b>Guanábana</b>	0,97	7,04	17,46	2,57	60,52	28,37	2,86	14,09	0,72	13,19
<b>Guayaba</b>	1	9,07	37,82	2,25	82,82	39,14	3,32	14,6	1,29	12,13
<b>Lima Tahití</b>	0,75	9,1	26,9	1,24	104,75	37,83	2,15	15,05	1,5	11,69
<b>Maracuyá</b>	2,64	18,55	34,67	2,61	435,86	44,48	7,49	14,42	1,43	6,56
<b>Maíz</b>	0,56	6,84	27,22	1,77	52,51	9,09	<1	22,37	1,11	14,54
<b>Papaya</b>	0,69	6,51	8,79	<1	59,19	45,14	1,33	17,66	1,07	10,83
<b>Vid</b>	1,06	11,05	15,64	1,33	137,1	27,06	6,23	15,94	1,36	13,21
<b>Nivel referencial*</b>	1	3	50	10	30	12	5	6	0,3	2,5
<b>Osorio (2014)</b>										

\*color rojo: déficit, color azul: exceso, color negro: adecuado.

Los altos valores de los nutrientes están, sobre todo, relacionados con el aporte que hace el agua de riego. Tal como se ha indicado, la principal fuente hídrica del distrito es el río Cauca. El distrito está ubicado en la zona norte del departamento del Valle del Cauca, una región principalmente agrícola, cuyo drenaje principal, también, es el río. Ahora bien, el distrito se ubica aguas debajo de la zona productora de caña y otros cultivos. La presencia de arcillas, el aporte de sales disueltas, en abundancia, acentúan el problema de drenaje, evidenciado con estos resultados. Aun así, y por desconocimiento del tópico, los productores fertilizan en exceso, caso de cultivos como papaya y maracuyá. Aun cuando se presentan altos contenidos de nutrientes necesarios para el cultivo, los excesos de algunos de ellos, caso Mg y Ca, puede estar inhabilitando la disponibilidad de otros. Tal como lo indica Castro et al., (2010) un suelo fértil no necesariamente es un suelo productivo, ya que, puede presentar desequilibrio iónico, que generan, además, limitantes para nutrición y la hidratación.

#### **Características del clima en parcela piloto.**

De acuerdo con ASORUT (2018), la zona cuenta con una temperatura media de 24° C y altitud de 930 msnm. El ciclo de la precipitación es bimodal, con una media anual de 1.015 mm; la evaporación anual fluctúa entre 1.500 y 1.700 mm; la humedad relativa promedio es del 72%. Lo anterior en condiciones medias. Sin embargo, en el período de ejecución del proyecto, la precipitación ha tenido un comportamiento diferencial atípico, con un exceso del 75% para el año 2021 y 51% para el 2022 (figura 40Error! Reference source not found.); entre enero y febrero del 2023 la excedencia ha sido del 22,3%.

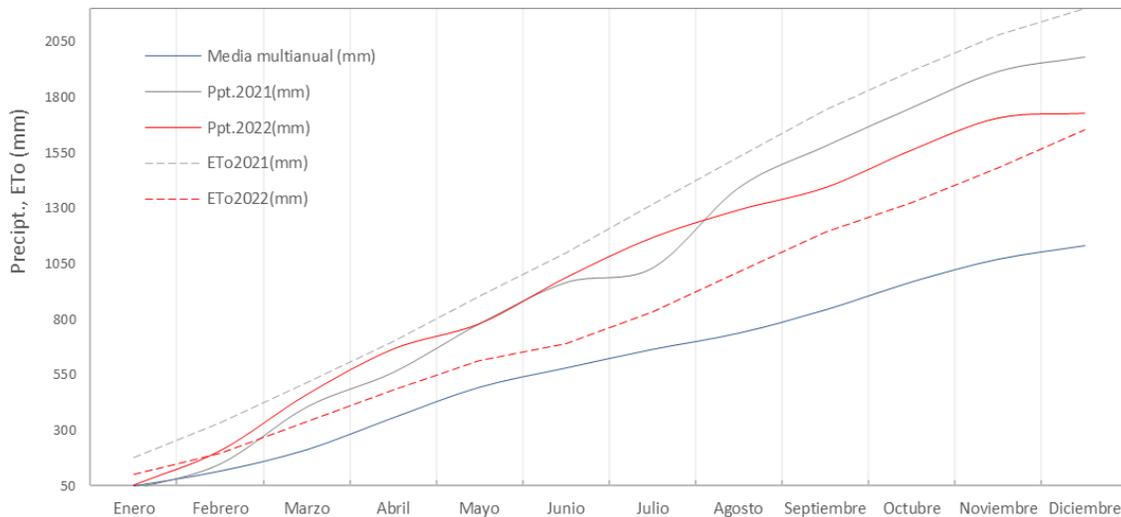


Figura 40. Precipitación y evapotranspiración acumuladas.

La zona es casi plana, con una ligera pendiente longitudinal ( $0,13 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$ ) en dirección Sur-Norte. La sección transversal del área tiene una forma cóncava con una pendiente de  $1,2 \text{ m} \cdot \text{km}^{-1}$  en la dirección del canal de drenaje principal (**Error! Reference source not found.**figura 41).

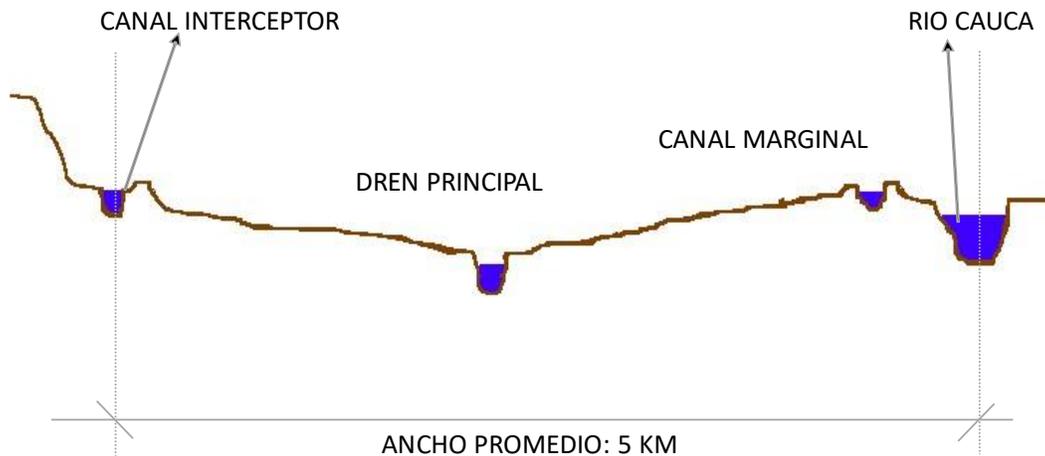


Figura 41. Perfil transversal. Fuente ASORUT (2018)

### Infraestructura hidráulica.

Según ASORUT (2018), el distrito posee cuatro captaciones principales a lo largo del río Cauca (figura 42), algunas con el doble propósito de riego y drenaje. Estación Tierra Blanca, ubicada en el extremo sur, en la margen izquierda del río Cauca, abastece los canales de riego, Marginal e Interceptor. Este punto tiene una capacidad de bombeo de  $6,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Estación La Candelaria, localizada a 18 km al Norte de la estación de Tierra Blanca; tiene la doble función de riego y drenaje (hacia el canal de drenaje principal). Tiene una capacidad total en la captación de 2,8

$m^3*s^{-1}$ . Estación La Cayetana, ubicada al Norte a 33 km de la estación Tierra Blanca. Cumple las funciones de riego (al canal Marginal) y drenaje (al río Cauca). La capacidad es de  $m^3*s^{-1}$ . Estación San Luis, ubicada sobre el canal Interceptor, drena a este canal con una capacidad de bombeo  $1,8 m^3*s^{-1}$ .



Figura 42. Esquema del D.RUT y sus principales obras. Fuente ASORUT (2018)

La infraestructura hidráulica principal está representada por el sistema de control de inundaciones, las redes de conducción de los sistemas de riego y drenaje, y los sistemas de bombeo. El distrito cuenta con El perfil transversal y los componentes físicos de la infraestructura de riego en el Distrito RUT se pueden apreciar en la **Error! Reference source not found. 43**. En general los componentes físicos de la infraestructura de riego contemplan captación, conducción, distribución y entrega predial.

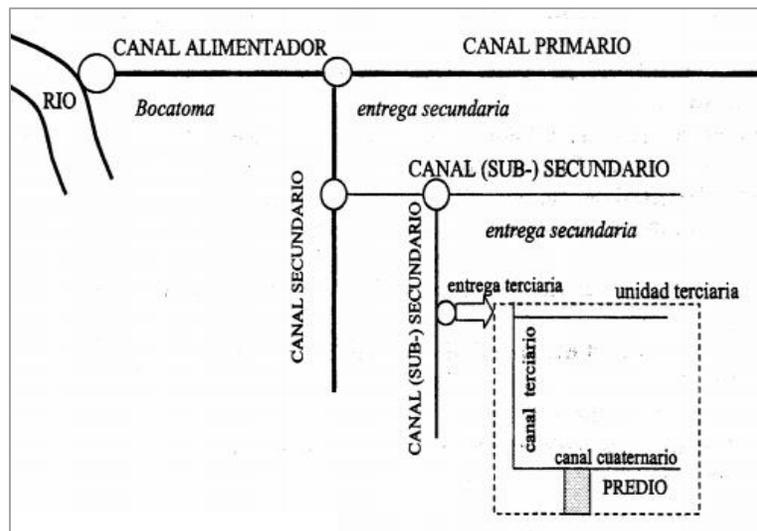
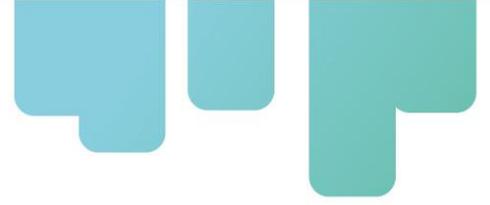


Figura 43. Esquema de los componentes de la infraestructura de riego. Fuente ASORUT (2018).



Previo al desarrollo hidráulico del distrito de riego RUT, el río Cauca y sus tributarios de la cordillera Occidental, desbordaban en la zona. De las 11.500ha, aproximadamente, 1.500ha permanecían inundadas, 3.500 parcialmente inundadas, 2.500 con alto grado de humedad, se usaban solo para pastos y 4.000 parcialmente dedicadas a la agricultura y ganadería (ASORUT, 2018). Con las obras del distrito, principalmente enfocadas al drenaje, la producción de alimentos se convirtió en la principal actividad y en la actualidad cuenta con 10.200ha de suelos altamente productivos. De esta área, 5,1ha pertenecen al cultivo de aguacate (*Persea americana*), 14,44ha a cacao (*Theobroma cacao* L.), 5.407,26ha a caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), 20,15ha a guanábana (*Anona muricata*), 477,32ha a guayaba (*Psidium guajaba*), 68,49ha a lima ácida Tahití (*Citrus latifolia* Tanaka), 1.739,19ha a maíz (*Zea mays*), 63,73ha maracuyá (*Passiflora edulis* f. *Flavicarpa*), 235,46ha a papaya (*Carica papaya*) y 391,3ha a Vid (*Vitis vinifera*); cultivos considerados dentro del piloto Colombia y que ocupan alrededor del 90% del área productiva del distrito. El resto del área corresponde a pastos y cultivos dispersos.

Respecto de la amplia cobertura actual del cultivo de la caña (figura 44), responde a las oportunidades de industrialización y comercio internacional que dio la llamada Apertura Económica de los años 90. Los usuarios desestimulados de la agricultura tradicional y por el incremento de los problemas fitosanitarios sobre cultivos del tipo semestral, encontraron en la dinámica del sector cañero una alternativa económica de alto rendimiento. Este cultivo posee unas altas demandas hídricas y manejo son diferentes a los cultivos tradicionales, condiciones para las cuales la infraestructura del distrito no fue diseñada. Este nuevo escenario ha provocado que la administración del distrito intensifique la inversión en infraestructura, acorde con la demanda; más el sistema productivo, especialmente, el manejo del agua, que se hace completamente por superficie, es ineficiente, generando grandes pérdidas para una gran área.

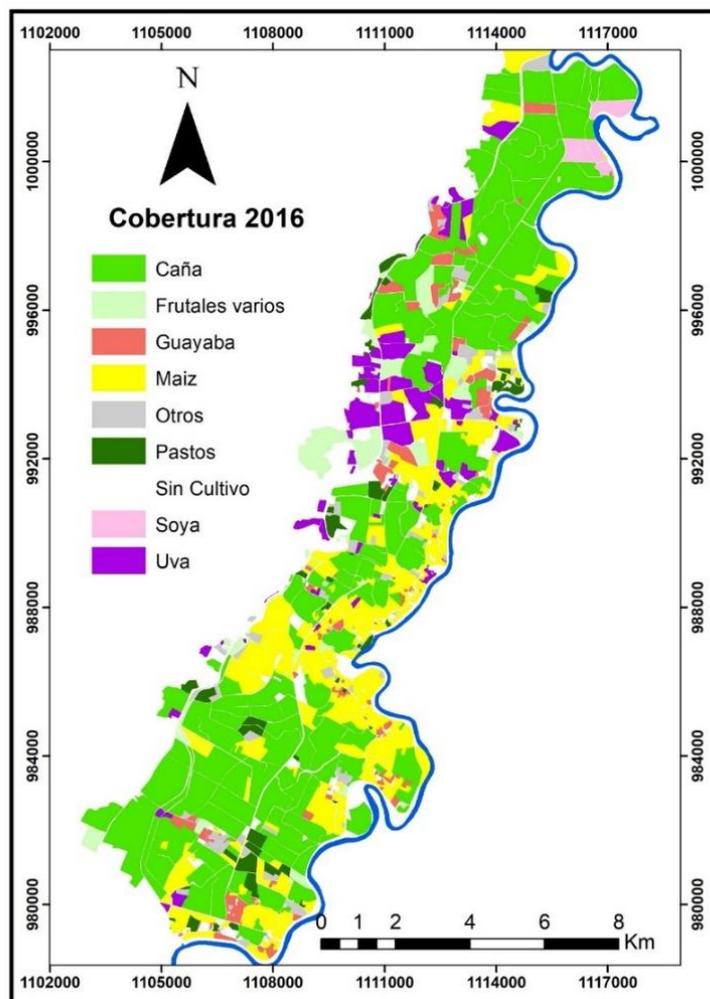


Figura 44. Distribución de áreas cultivadas en el D. RUT. Fuente (ASORUT, 2018).

#### 1.3.1.4 Marco conceptual-tecnológico utilizado para el monitoreo de las condiciones ambientales y la definición y control del riego.

El Marco conceptual es transversal para todas las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia y fue descrito en el punto 1.1.4.



### 1.3.1.5 Monitoreo escala PLANTA.



*Figura 45. Algunos cultivos monitoreados en el Distrito RUT.*

#### **Monitoreo riego.**

Tal como se indicó, el piloto del distrito de riego RUT, se desarrolla sobre 10 cultivos: aguacate, cacao, caña de azúcar, guanábana, guayaba, lima ácida Tahití, maíz, maracuyá, papaya y Vid. Para cada cultivo se seleccionó una finca representativa y dentro de un marco de influencia para la comunicación en red. Una red de monitoreo de la humedad del suelo fue ubicada alrededor del centro administrativo del distrito de riego RUT, donde se ubicó el nodo coordinador de la red. Dentro de la red hay diferentes dispositivos que capturan, almacenan y transmiten la información hasta un servidor donde la información está siempre disponible para los usuarios. En cada finca (cultivo priorizado) se instaló una estación con dos sensores capacitivos y un data logger (almacenador de datos) para medir y transmitir la humedad del suelo en tiempo real. Los equipos son custodiados por los productores y el equipo de la asociación de usuarios del distrito de riego RUT - ASORUT. En el cuadro 9 se relaciona el detalle de los componentes de la red y en el las coordenadas de los 10 nodos de suelo o estaciones en finca.

*Cuadro 9. Dispositivos red de monitoreo.*

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



*Cuadro 10. Coordenadas red de monitoreo.*

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

La red de monitoreo fue instalada en junio 2021. En la figura 46 se pueden observar detalles gráficos de la instalación de las torres de los nodos de humedad del suelo y en la figura 47, un esquema de la red. En cada sitio, junto a la antena transmisora (nodo de humedad del suelo) se instalaron dos sensores de humedad del suelo tipo capacitancia (**Error! Reference source not found.**) a una profundidad respectiva a cada cultivo. El registro de la humedad y transferencia de los datos se programó con un paso de 20 minutos. En el cuadro 11 se reportan las profundidades de los sensores.



*Figura 46. Instalación estaciones de humedad del suelo en el sitio experimental.*

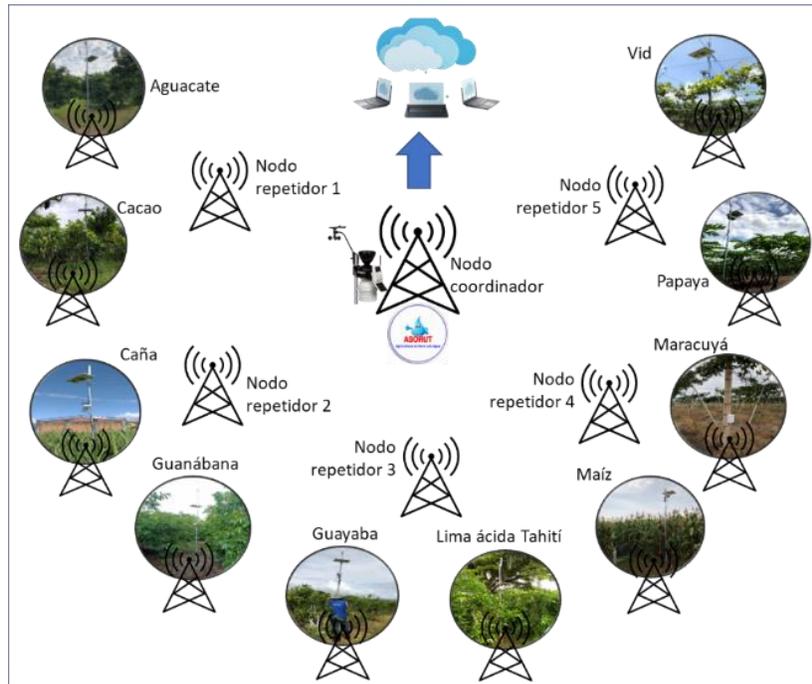


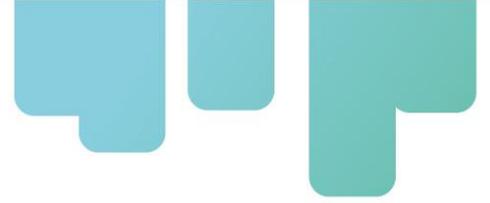
Figura 47. Esquema de red de estaciones de registro instalado en el piloto tecnológico del D.RUT.



Figura 48. Sensor de humedad del suelo.

Cuadro 11. Profundidad de instalación de los sensores.

<b>Cultivo</b>	<b>Profundidad (cm)</b>
Aguacate	30
Cacao	25
Caña	15
Guanábana	30
Guayaba	30
Lima ácida Tahití	30
Maíz	15
Maracuyá	20
Papaya	20
Vid	25



Por otra parte, monitoreamos el programa de riego, que se refiere a definir la frecuencia y el periodo de riego por cada cultivo, a partir de la información colectada en tiempo real con los sensores de capacitancia (Muangprathub, Boonnam, Kajornkasirat, Lekbangpong, Wanichsombat & Nillaor, 2019), esto es, la serie de humedad del suelo, registrada desde junio de 2021 hasta septiembre de 2022. Es preciso mencionar en este punto, que el programa de riego, que parece “fijo” solo pretende definir parámetros de partida para iniciar un programa tecnificado. La existencia de sensores en el sitio, y la posibilidad de consultar los datos directamente en la web, en tiempo real, gracias a la red IoT, permite aplicar el riego justo cuando la humedad desciende al 64% de la CC y dejar de regar cuando se ha alcanzado el 80% de CC (Luo & Zhou, 2006). En este caso, la frecuencia y el período están en función del aporte meteórico, subterráneo y del consumo, y pueden no tener un lapso fijo; por lo cual, la consulta del estado de humedad del suelo debe ser continuada. Este programa de riego, es el resultado de la fase diagnóstica que da paso a su validación para cumplir con la recomendación tecnológica.

Para llegar a una mayor aproximación del programa de riego (período / frecuencia), se hace seguimiento diario en horas de la mañana y de la tarde para validar el consumo, y así la aproximación al umbral de riego y dar la orden de regar. Este seguimiento durante la fase experimental permite informar a productores no vinculados a la red. Una hoja de cálculo permite verificar rápidamente sí regar o no (cuadro 12)

*Cuadro 12. Protocolo de riego para el cultivo de cacao*

<b>Especie</b>	Cacao						
<b>CC (%)</b>	34						
<b>Limite máx. riego 0,8CC</b>	27,2						
<b>Decisión de riego (0,64CC)</b>	21,76						
<b>Frecuencia0 (días)</b>	7						
<b>Período0 (horas)</b>	40 min						
<b>Fecha</b>	<b><math>\theta</math> (7:30:00)</b>	<b><math>\theta</math> (13:15:00)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Período</b>	<b>Decisión riego</b>	<b>Acción de riego</b>	<b>Observación</b>
10/10/2022	47,35	47,95			No riego	No	
11/10/2022	47,65	46,7			No riego	No	
12/10/2022	45,85	44,75			No riego	No	
13/10/2022	44,75	43,8			No riego	No	
14/10/2022	44,15	42,2			No riego	No	
15/10/2022	42,35	41,9			No riego	No	
16/10/2022	41,9	40,45			No riego	No	



17/10/2022	40,4	39,95			No riego	No	
13/11/2022	53,25	52,6			No riego	No	
...	...	...			...	...	
15/11/2022	50,85	50,5			No riego	No	
16/11/2022	53,1	51,3			No riego	No	
17/11/2022	51,15	51,3			No riego	No	
18/11/2022	52,6	53,55			No riego	No	
19/11/2022	52,3	51,3			No riego	No	
20/11/2022	51,3	51			No riego	No	

### Monitoreo meteorológico.

Dentro del D. RUT, se encuentran tres estaciones meteorológicas automáticas (EMA), con una mayor influencia para el sector experimental, de la estación del centro administrativo ASORUT (figura 40). Las variables entregadas por la EMAs, tienen una frecuencia diaria/horaria, miden la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), humedad relativa (%), precipitación (mm), radiación solar ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), Velocidad del viento ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). En la figura 49 se puede observar la ubicación de las estaciones respecto de los cultivos seleccionados y una foto del tipo de estación. En el cuadro 13 se relaciona la ubicación de las EMAs.

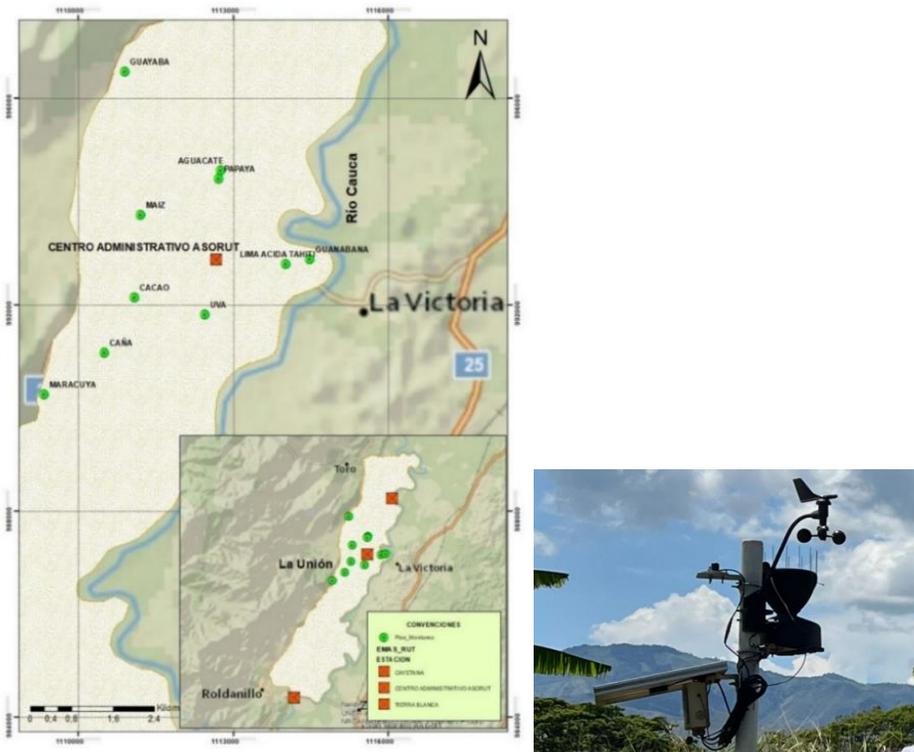
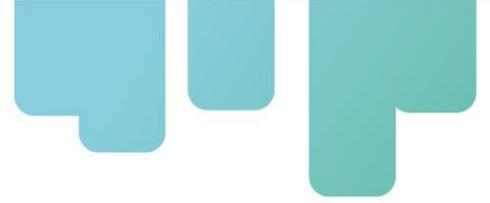


Figura 49. Ubicación cultivos y EMAs. Fuente información cartográfica IGAC-CVC, (2004).



*Cuadro 13. Ubicación EMAs en el Distrito RUT*

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

### **Cultivos monitoreados.**

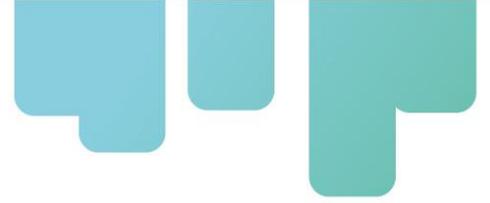
Para el caso del piloto del D.RUT, además del seguimiento de climático y de humedad del suelo, se hace monitoreo al desarrollo del fruto de forma manual, utilizando un calibrador electrónico marca Mitutoyo® (figura 50). Esta medición se hace con regularidad semanal, partiendo de fruto cuajado. Se cuantifica además la duración del ciclo productivo. Para el caso de los árboles frutales se hace seguimiento a 6 árboles (aguacate, cacao, guayaba, guanábana, lima ácida Tahití, papaya); para vides se monitorean 80 racimos; en maracuyá 400 frutos y para el caso de maíz y caña se monitorean 10 surcos de cultivo, con un tamaño de muestra de 3 metros en cada surco. El rendimiento en  $t \cdot ha^{-1}$ , ha sido cuantificado para cada huerto completo y de acuerdo con la duración del período de fructificación.



*Figura 50. Monitoreo al desarrollo del fruto*

### **1.3.1.6 Estimación de la productividad del agua a escala de parcela.**

La estimación de la productividad del agua se detalló en el punto 1.1.6. La metodología es transversal para las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia.



### **1.3.2. Validación de nuevas tecnologías para la determinación de las necesidades de riego en lima ácida, Piloto Centro de investigación Palmira, Agrosavia.**

#### **1.3.2.1 Introducción**

Con el objetivo de mejorar el uso de los recursos hídricos a escala intra-predial (parcela), dentro del proyecto *“Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia del uso del agua en la agricultura de ALC al 2030”*, Agrosavia plantea la estrategia del establecimiento un balance hídrico sitio específico, utilizando herramientas tecnologías modernas para el monitoreo y manejo del riego intrapredial. Para esto se plantea el desarrollo de dos zonas piloto, ubicados en el Valle del Cauca, Colombia. El piloto que se describe está emplazado en Centro de Investigación Palmira de AGROSAVIA donde se trabaja en el cultivo de lima ácida Tahití.

#### **1.3.2.2 Marco conceptual para el manejo del riego**

El marco conceptual ha sido descrito en el punto 1.1.2, es transversal para todas las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia.

#### **1.3.2.1. Materiales y Métodos**

##### **Área de estudio.**

Este piloto se encuentra en el Centro de investigación de La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia (3.515784N, -76.310642W, altitud 1001 msnm), en la ciudad de Palmira, Valle del Cauca. El clima en la localidad es bosque seco tropical, de acuerdo al sistema de clasificación bioclimática Holdridge (Dorado, Grajales y Ríos-Rojas, 2013). La condición ambiental media reporta una temperatura de 24°C, precipitación anual 1.032 mm, humedad relativa de 72%, brillo solar de 5,8 horas\*día<sup>-1</sup> y velocidad del viento 1,5 m\*s<sup>-1</sup>. En la figura 51 se presenta la ubicación de la parcela piloto.

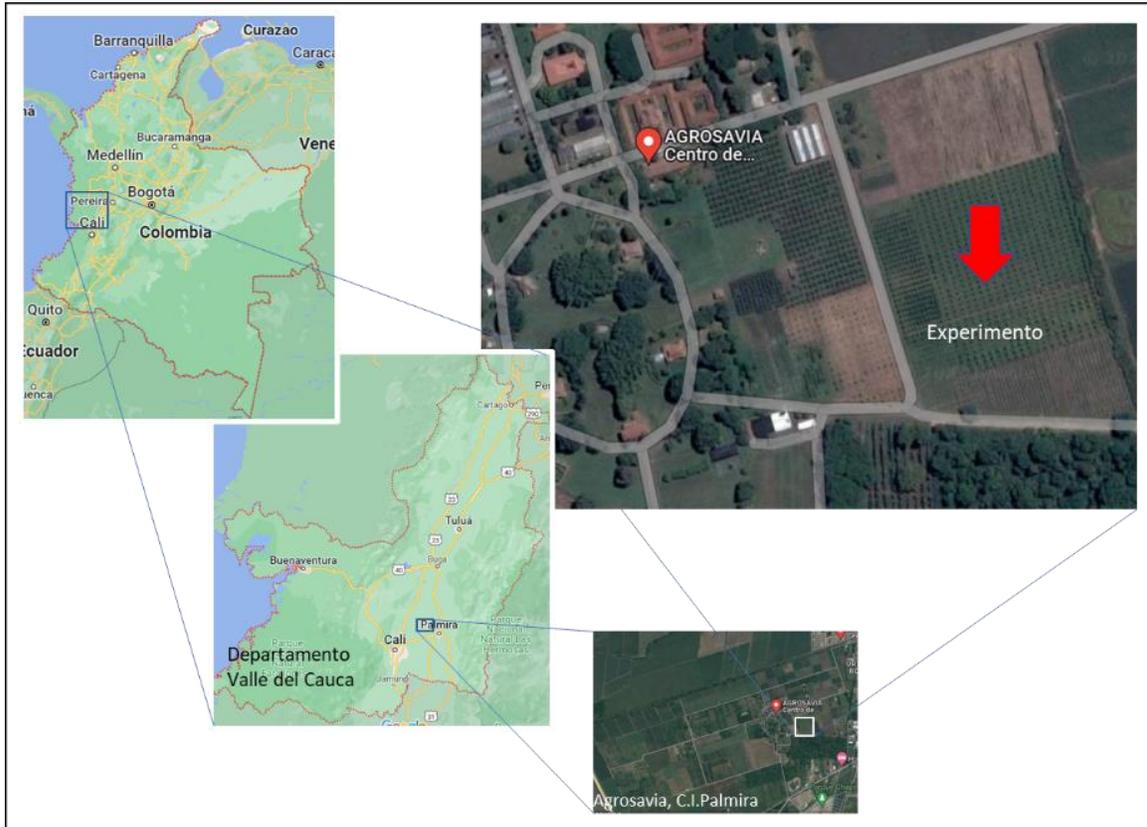


Figura 51. Ubicación parcela piloto en el C.I. Palmira – AGROSAVIA.

### Características del suelo en parcela piloto

El suelo en el cual se encuentra la parcela piloto en el C.I. Palmira, corresponde a la consociación Palmira-PLa (IGAC & CVC, 2004). Son suelos formados al pie de la cordillera occidental, planos y amplios. Son suelos desarrollados en aluviones mixtos, bien drenados, muy profundos, neutros y de fertilidad alta.

El uso actual es agricultura y el principal cultivo es la caña de azúcar. Los suelos presentan ligeras limitaciones para la agricultura dada la afección por sales y sodio en grado ligero. De acuerdo con el análisis de laboratorio, el suelo en los primeros 50 cm presenta una textura FAr (Franco-Arcillosa). El análisis también indica, que el suelo presenta compactación, con mayor grado en profundidad. Desde a serie de humedad del suelo, tomada con el sensor de capacitancia, el suelo posee una baja retención de humedad, con una CC de 22% y un PMP de 15%, en la zona con mayor presencia de raíces.

Este suelo posee una baja porosidad por lo que la densidad aparente ( $D_a$ ) es mayor a  $1,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Todo ello indica, que el suelo retiene poca agua en el tiempo y que, por tanto, con períodos de déficit prolongados el cultivo podría entrar en estrés rápidamente, lo cual se ha evidenciado en algunos momentos del período experimental. Desde el valor de CC se definió el programa de riego



para la parcela, tal como se informó en el piloto del D.RUT.

El análisis químico indica que el suelo es ligeramente ácido y no posee problemas de salinidad. En general no hay restricciones para la nutrición del cultivo. El P y el Fe se encuentran en niveles medios, siendo necesario suplirlos con fertilización.

### Características del clima en parcela piloto.

Esta zona de estudio se encuentra al Suroccidente del Valle geográfico del río Cauca, presentando un régimen pluviométrico bimodal. La precipitación del primer semestre equivale al 60% del total del año. Históricamente, el máximo de precipitación se presentaba en el mes de abril y un segundo máximo se ubicaba entre octubre-noviembre-diciembre. Así, las mayores necesidades de riego se presentaban en los meses junio-julio-agosto-septiembre. Sin embargo, para los años 2021 y 2022, el régimen de precipitaciones excedió la media mensual multianual en alrededor de un 22% (figura 52 **Error! Reference source not found.**). Este exceso, ha mantenido el contenido de humedad del suelo por sobre capacidad de campo, con lo cual no fue posible iniciar la evaluación del programa de riego en septiembre de 2022, tal como estaba programado.

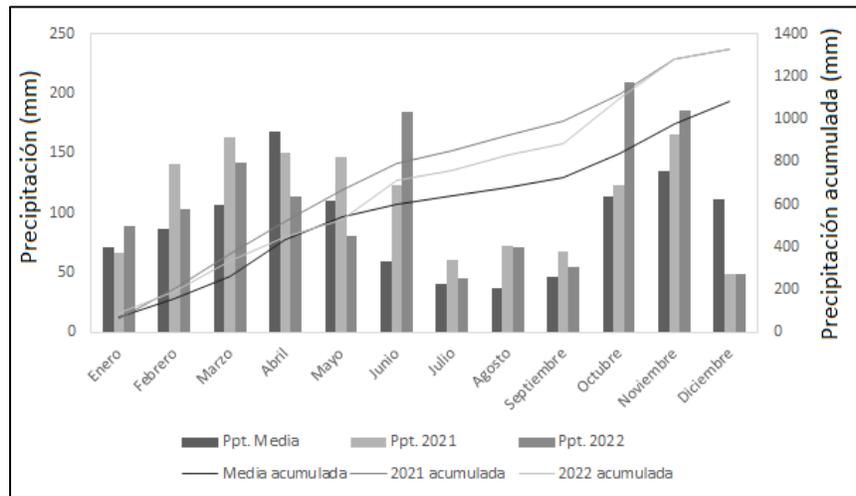


Figura 52. Registro de precipitaciones año 2021, 2022 y promedio histórico en el C.I. Palmira – Agrosavia. (Fuente: Estación IDEAM- 26075010).

### Fuente hídrica.

El riego complementario para el cultivo es suministrado desde un pozo superficial, tipo aljibe, con una profundidad de 12 m, con un nivel estático de 4,0 m y un nivel dinámico de 6,0 m; está ubicado a 200m del cultivo. El caudal ofertado es de 3 L\*s<sup>-1</sup>. El experimento comparte suministro de agua desde el pozo con un cultivo de guayaba y un invernadero. El pozo presenta abatimiento después de 4 horas de operación. En la figura 53 **Error! Reference source not found.** se relaciona el plano en planta del sitio experimental.

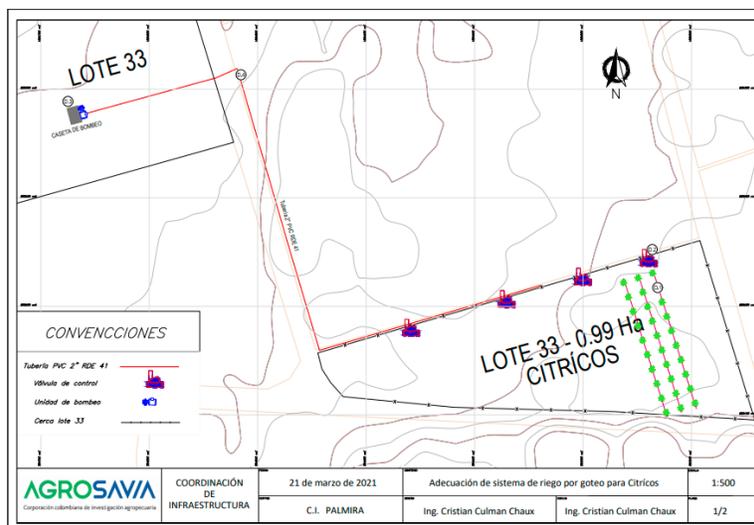


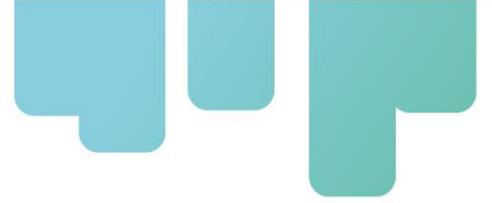
Figura 53. Infraestructura de riego en sector piloto en C.I. Palmira – Agrosavia.

El cultivo de lima ácida posee un sistema de riego por goteo abastecido por una motobomba. El sistema está dividido en cuatro módulos de riego, controlados por válvulas manuales. La red de distribución cuenta con una tubería PVC principal de 2" y laterales en PVC de 1,5", que derivan a un sistema de emisión en PE 16 mm, anillo cerrado de 1 m de diámetro (**Error! Reference source not found.** 54) con 8 goteros autocompensados con caudal de 4 L/h, para un caudal total nominal de 32 L/h\*árbol. La frecuencia de riego utilizada es de 1,5 días y el tiempo de riego es 1 a 1,5 horas. Este programa ha sido estandarizado según la  $ET_0$  de la localidad. En la **Error! Reference source not found.** se detalla un anillo de riego.



Figura 54. Detalle de anillo de goteo en cultivo de lima ácida Tahití (Foto: Liliana Ríos).

Para determinar el correcto funcionamiento del sistema de riego se realizó una prueba de aforo en una muestra representativa del huerto experimental con 22 árboles. Los resultados indicaron que el 80% de los árboles aforados presentan un caudal bajo el caudal nominal ( $32 \text{ L/h}^1 \cdot \text{árbol}^1$ ).



Lo anterior indica, que el riego en este cultivo no era homogéneo y que el huerto recibía menos del volumen programado para cada riego. El mal estado de los emisores era la principal razón para la variabilidad en la descarga (figura 55). Por esto se ejecutó la adecuación del sistema de riego para garantizar la homogeneidad en la aplicación de las láminas de riego.



*Figura 55. Heterogeneidad en la emisión de los goteros. Foto: Marysol Cano.*

#### **1.3.2.4 Marco conceptual-tecnológico utilizado para el monitoreo de las condiciones ambientales y la definición y control del riego.**

El Marco conceptual es transversal para todas las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia y fue descrito en el punto 1.1.4.

#### **1.3.2.5 Monitoreo escala PLANTA.**

##### **Monitoreo riego.**

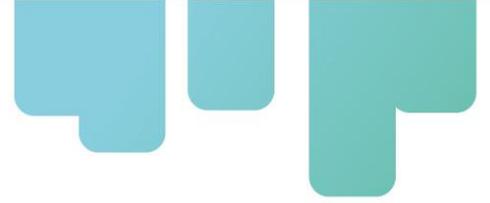
En el sitio del cultivo se instalaron dos sensores de humedad tipo capacitancia, acoplados a una estación meteorológica automática – EMA, ubicada al interior de la parcela experimental (figura 56). La estación entrega información con un paso de 20 minutos.



*Figura 56. Imágenes del equipamiento utilizado en el seguimiento ambiental de la parcela piloto.*

##### **Monitoreo meteorológico**

Como se menciona en las parcelas piloto anteriores, para completar la ecuación del cálculo del consumo hídrico o evapotranspiración de cultivo (ET<sub>c</sub>) se debe considerar la demanda ambiental de la parcela. Para esto se utiliza el parámetro **evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)**, el cual se



estima a partir de variables meteorológicas registradas por una estación agrometeorológica automática (EMA).

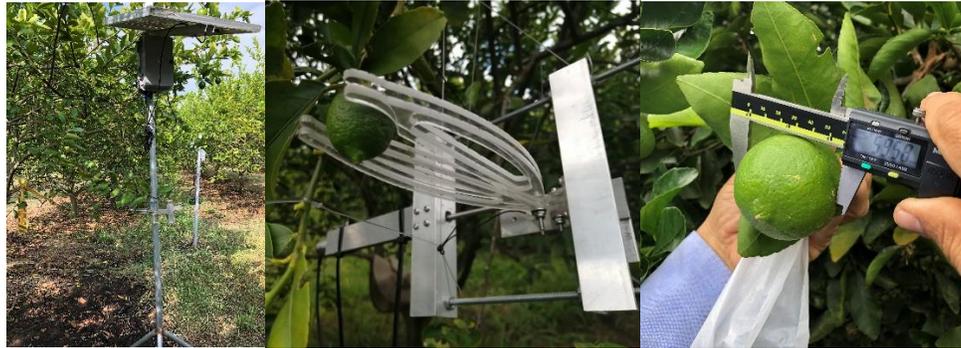
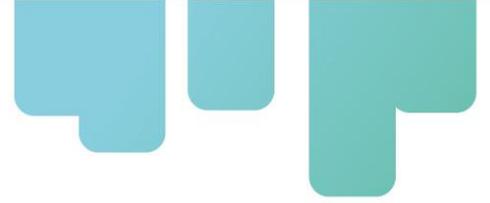
### **Cultivos monitoreados.**

El piloto se ha instalado en un cultivo de lima ácida Tahití (*Citrus latifolia* Tanaka) injertado sobre Citrumello CPB 4475 (*Citrus paradisi* 'pomelo Duncan' x *Poncirus trifoliata*) y limón Volkameriano (*Citrus Volkameriana*). Está ubicado en el lote 31 (según nomenclatura Agrosavia), en las coordenadas 3.512796N, -76.312071W, del centro de investigación Palmira – AGROSAVIA. El estado actual del uso del agua por el cultivo de lima ácida Tahití en la parcela piloto, así como las características del cultivo se detallan en el cuadro 14.

*Cuadro 14. Ficha técnica cultivo lima ácida C.I. Palmira.*

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

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



*Figura 57. Equipamiento para seguimiento al crecimiento del fruto.*

Para evaluar el estado hídrico interno de las plantas, se utilizó el parámetro conductancia estomática ( $G_s$ ), utilizando para esto un porómetro (SC-1 Leaf Porometer®, Meter Group, Inc., Decagon Devices, figura 58 **Error! Reference source not found.**). La  $G_s$  fue correlacionada con las variables climáticas, representadas en el déficit de presión de vapor (DPV, KPa). Este seguimiento se hace con regularidad quincenal, bajo el régimen hídrico practicado tradicionalmente en el cultivo. Cabe indicar que, durante la fase diagnóstica, el riego se definió con base en la reposición de la demanda ambiental, representado por la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ).



*Figura 58. Evaluación de conductancia estomática con porometría.*

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

### **1.3.2.6 Estimación de la productividad del agua a escala de parcela.**

La estimación de la productividad del agua se detalló en el punto 1.1.6. La metodología es transversal para las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia.

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

### 1.4.1 Validación de nuevas tecnologías para la determinación de las necesidades de riego en pasturas, maíz y soja en El Junco, Uruguay. Claudio García y Álvaro Otero



#### 1.4.1.1 Introducción

En el marco de la iniciativa **“Nuevas tecnologías para el aumento de la eficiencia en la agricultura ALC-2030”**, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA Uruguay implementó un piloto tecnológico en la Parcela Experimental “El Junco”, ubicado en el norte del país en el departamento de Salto. El objetivo de este piloto tecnológico es la puesta en marcha y la validación de un paquete conceptual-tecnológico que permita a los agricultores de la región contar con herramientas modernas para el manejo del riego dentro de sus predios.

#### 1.4.1.2 Marco conceptual para el manejo del riego

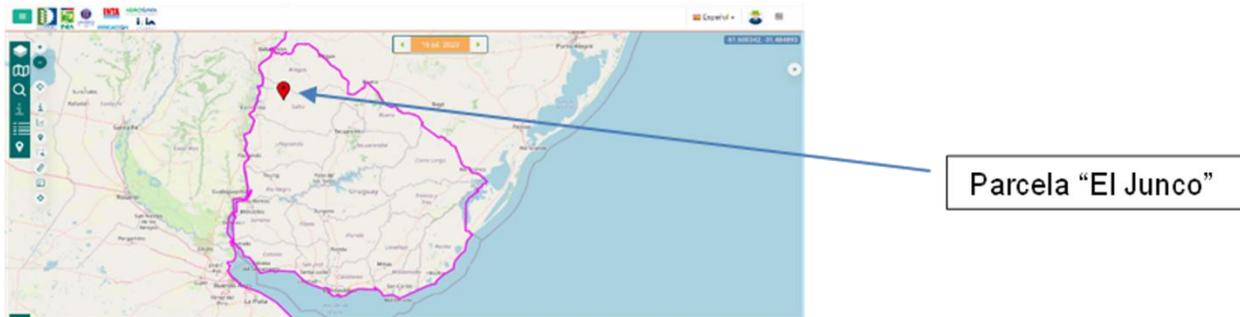
El Marco conceptual es transversal para todas las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia y fue descrito en el punto 1.1.4.

#### 1.4.1.3 Materiales y métodos

##### Área de estudio

El piloto tecnológico en riego se implementó en la Parcela Experimental “El Junco”, en Colonia Rubio, a 75 km aproximadamente de la ciudad de Salto. La zona en general tiene un sistema ganadero fundamentalmente con algunas empresas que hacen cultivos extensivos regados y en

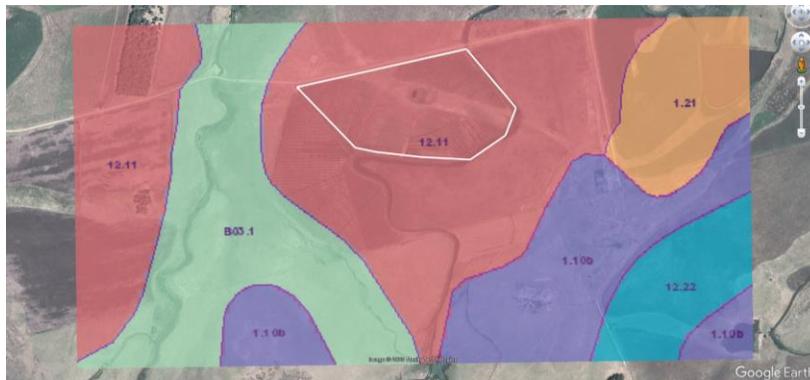
las zonas bajas producción de arroz, existe en la región una pequeña cuenca de productores de leche.



*Figura 59. Ubicación parcela piloto "El Junco".*

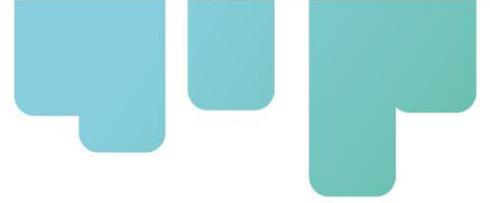
### **Características del suelo en la parcela piloto**

El suelo de la parcela piloto está clasificado como Vertisol Háptico, son suelos profundos (>70 cm de horizonte A), de fertilidad natural alta, con buen drenaje (figura 60 **Error! Reference source not found.**).



*Figura 60. Unidades de suelo en la parcela piloto tecnológico.*

El relieve es de lomadas suaves (1 a 3% de pendientes) con valles cóncavos asociados. Incluye también interfluvios ondulados convexos. Los suelos dominantes son Vertisoles Hápticos (Grumosoles) y Brunosoles Étricos Típicos (Praderas Negras mínimas). Como suelos asociados, ocupando las pendientes más fuertes, se encuentran Vertisoles Hápticos (Grumosoles), moderadamente profundos, Brunosoles Étricos Típicos moderadamente profundos (Praderas Negras superficiales) y superficiales (Regosoles) y Litosoles Étricos Melánicos (Litosoles Negros, a veces pardo rojizos). El uso actual es pastoril agrícola. En este grupo hay áreas donde se puede incentivar la agricultura, aunque los suelos presentan limitaciones. Se corresponde con la unidad Itapebí - Tres Árboles de la carta a escala 1:1.000.000 (D.S.F.). Se pueden mencionar como zonas



típicas los alrededores de Tomás Gomensoro, Itapebí, Laureles y Palomas. Índice de Productividad 162.

De acuerdo a la descripción del perfil de suelo, se identifican 2 horizontes bien contrastantes, 1 horizonte superior de alta fertilidad natural, negro con alto contenido de materia orgánica, bien drenado que va hasta los 70-80 cm de profundidad y luego el horizonte C (material madre). Por eso este tipo de suelo se define como Vertisol Háplico.

**Análisis físico del suelo:** Las contantes hídricas (fundamentales para el manejo del riego y la definición de la humedad aprovechable) fueron determinadas en el laboratorio de INIA Las Brujas a partir de muestras imperturbadas tomadas con anillos de 100cc (**Error! Reference source not found.** 15).

*Cuadro 15. Promedio del contenido volumétrico de agua a las distintas tensiones evaluadas en laboratorio.*

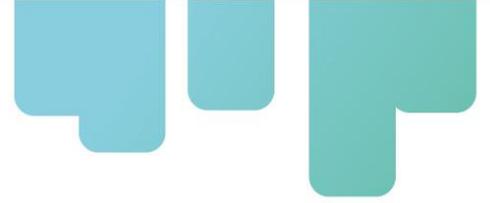
Identificación	Materia orgánica %	CIC meq/ 100g	Potasio meq/ 100g	Sodio meq/ 100g	Calcio meq/ 100g	Magnesio meq/ 100g	Ac Interc. (meq/ 100g)
El Junco Maku Microstar 0-20	4.7	33.72	0.50	0.28	25.50	7.36	0.08
El Junco Maku Microstar 20-40	4.2	37.34	0.62	0.31	28.40	7.90	0.11
El Junco Maku 0-20	4.9	31.10	0.48	0.28	23.10	7.14	0.09
El Junco Maku 20-40	4.3	35.02	0.61	0.31	25.90	8.13	0.07
El Junco Festuca vieja 0-20	5.0	37.67	0.61	0.34	27.00	9.64	0.08
El Junco Festuca vieja 20-40	4.8	39.11	0.65	0.31	28.20	9.84	0.11
El Junco Alfalfa 0-20	4.6	32.37	0.50	0.25	23.00	8.55	0.07
El Junco Alfalfa 20-40	4.8	36.99	0.54	0.30	26.10	9.98	0.07
El Junco Paspalum 0-20	4.3	36.81	0.56	0.39	28.00	7.80	0.06
El Junco Paspalum 20-40	4.3	38.17	0.63	0.31	29.20	7.98	0.05
El Junco Festuca nueva 0-20	4.5	37.33	0.60	0.25	25.60	10.79	0.09
El Junco Festuca nueva 20-40	3.7	40.56	0.64	0.34	27.40	12.13	0.05
El Junco TR 0-20	5.0	33.36	0.45	0.29	23.50	9.05	0.06
El Junco TR 20-40	4.3	37.55	0.54	0.33	26.10	10.48	0.10

Profundidad (cm)	Humedad Volumétrica (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> )		Humedad Volumétrica (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> )		Humedad Volumétrica (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> )	
	0-20	std*	20-40	std*	40-60	Std*
1	0.4110	0.0028	0.4325	0.0078	0.5370	0.0636
30	0.3930	0.0085	0.4050	0.0156	0.5085	0.0559
1000	0.3730	0.0085	0.3785	0.0177	0.4880	0.0523
5000	0.3210	0.0085	0.3165	0.0134	0.4405	0.0474
15000	0.3135	0.0092	0.3080	0.0141	0.4315	0.0460

\*std. desvío estándar

### Características del clima en la parcela piloto

La parcela piloto se encuentra en el noroeste del país, en la Colonia Rubio del departamento de Salto a más de 500 km del mar. En general son zonas bastante planas, donde la topografía no presenta fuertes pendientes. El país está clasificado según Koppen en "Caf" según los siguientes detalles: Templado, moderado, lluvioso; tipo "C"; Temperie húmeda; tipo "f" y Temperatura del



mes más cálido superior a 22°C; tipo “a”.

La temperatura varía entre un máximo promedio en enero de 26°C (máximo de 32 °C y mínimo de 20 °C) y temperaturas promedio mínimas en el mes de julio de 12 °C (máximo de 18 °C y mínimo de 8 °C). En el año se registra un promedio de 6 heladas, aunque este número puede variar entre años por diversos factores (**Error! Reference source not found.** 16). El periodo de temperaturas favorables a la actividad vegetativa dura los 12 meses del año. La precipitación media anual es de 1200 mm aproximadamente con una variación muy fuerte entre años y entre meses. No existe una estación seca, ni tampoco estación de lluvias, llueve todo el año en general, pero con una muy mala distribución interanual. En general los meses de fines de primavera y verano la demanda atmosférica es más alta que la cantidad de lluvias por lo que no se llegan a cubrir las necesidades hídricas de los cultivos.

*Cuadro 16. Variables meteorológicas promedio de 30 años.*

	T° media (°C)	Pp (mm)	Humedad (%)	Días de lluvia
Enero	26	116	60	6
Febrero	24,9	113	66	7
Marzo	22,6	126	71	6
Abril	19,4	155	72	6
Mayo	15,5	105	77	5
Junio	13,1	88	80	5
Julio	12,3	79	77	5
Agosto	14	90	74	5
Septiembre	15,9	94	71	6
Octubre	18,9	146	70	7
Noviembre	21,7	120	63	5
Diciembre	24,2	120	61	6

Fuente: <https://es.climate-data.org/americas-del-sur/uruguay/salto/salto-4008/>

En la figura 62 se presenta la evolución promedio mensual histórica de la precipitación total (mm) y la evapotranspiración estimada por la ecuación de FAO-PM 56 (Allen et al., 1998). Durante los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero las precipitaciones no son suficientes para cubrir la demanda atmosférica, provocando déficit todas las zafas. Sumado a esto los suelos en general en Uruguay son poco profundo lo que no favorece a que el perfil pueda suministrar esa cantidad de agua faltante, lo cual la única forma es el riego suplementario.

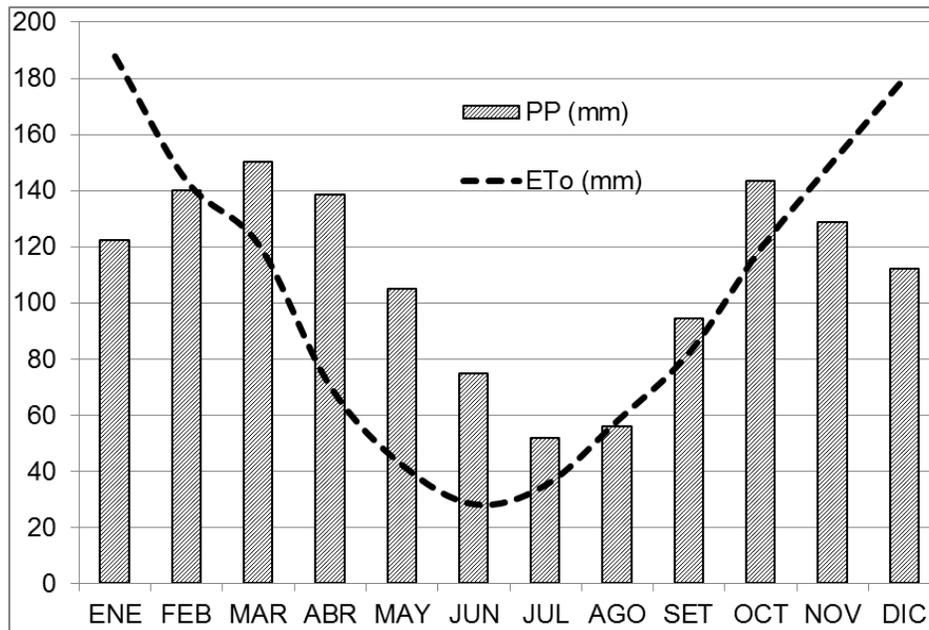


Figura 61. Precipitación y evapotranspiración media mensual (1984-2011)

De acuerdo a las figuras 62 y 63, en las que se presentan los datos de Lluvia y evapotranspiración (PM-FAO 56) en las dos temporadas de primavera verano (2021-22 y 2022-23) hubo que complementar con riego el agua de lluvia porque no fue suficiente para satisfacer la demanda atmosférica de cultivos y pasturas.

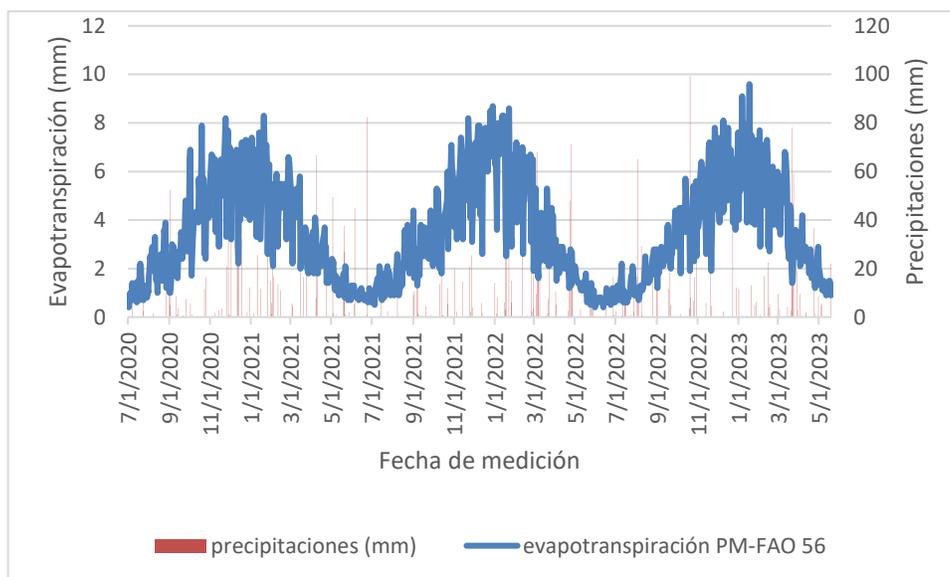


Figura 62. Evolución de la precipitación y la evapotranspiración en la parcela piloto tecnológico durante las dos temporadas evaluadas



#### 1.4.1.4 Marco conceptual-tecnológico utilizado para el monitoreo de las condiciones ambientales y la definición y control del riego.

El Marco conceptual es transversal para todas las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia y fue descrito en el punto 1.1.4.

#### 1.4.1.5 Monitoreo escala PLANTA



Figura 63. Pastura monitoreada en El Junco, Colonia, Uruguay.

#### Monitoreo Riego

El control del riego aplicado a las pasturas fue realizado a través de la evaluación de la eficiencia de aplicación y el coeficiente de distribución. Al ser riego por superficie que se realizó en las pasturas permanentes se trabajó con evaluaciones de avance y receso del agua en las parcelas en 2 o 3 riegos por temporada como se muestra en la figura 64.

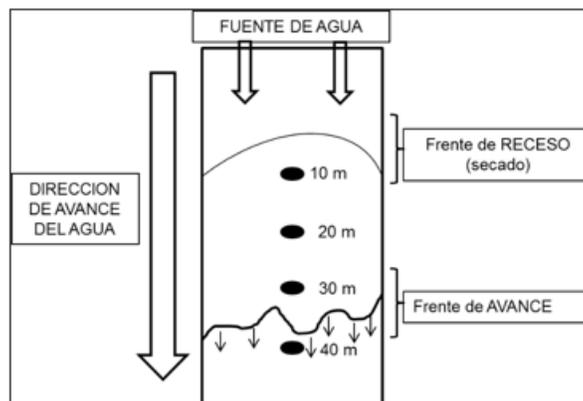
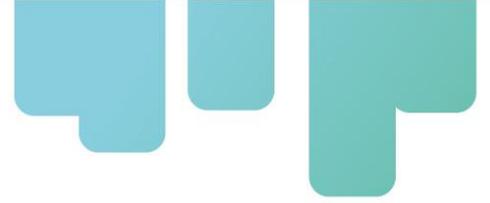


Figura 64. Esquema de la evaluación a campo del avance y receso del agua en las parcelas del piloto tecnológico. Fuente: Bourdin et al., 2015



Para la obtención de la eficiencia de aplicación, de la uniformidad de distribución, percolación profunda y el escurrimiento superficial del agua de riego, se utilizó el software de simulación WinSRFR v.4.13. En el módulo de Análisis de Evento se ingresaron los datos de campo requeridos por el software como son: largo de melga, ancho de melga, lámina máxima, pendiente, caudal, tiempo de corte, tiempo de avance acumulado cada 10 m, tiempo de receso acumulado cada 10 m, coeficiente de rugosidad de Manning, parámetro “a” de la función de Kostiakov. Este módulo con los datos ingresados calcula el tiempo de oportunidad, el parámetro K de la función de infiltración y luego al correrlo arroja resultados como eficiencia de aplicación (EA), uniformidad de distribución (UD), percolación profunda (P) y escurrimiento superficial (E) expresados en porcentaje (%) como en mm de lámina de agua según el caso. Ejemplo de la evaluación realizada a campo se presenta en la figura 65. **Error! Reference source not found..**

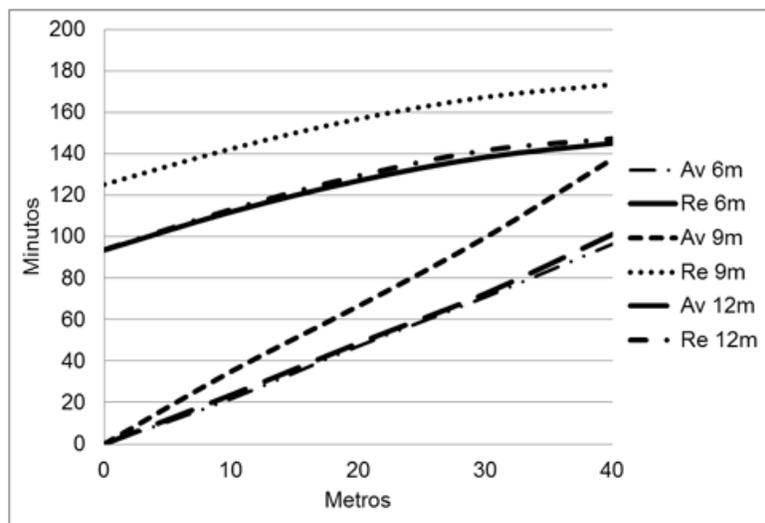


Figura 65. Curvas de tiempos de avance y receso del agua, resultante de la evaluación a campo.

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





*Figura 66. Sondas FDR (Decagon) utilizadas para el monitoreo continuo de la humedad en el suelo.*

### **Monitoreo meteorológico.**

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



*Figura 67. Estación meteorológica automática (EMA) en la parcela piloto tecnológico “El Junco”.*

### **Cultivos monitoreados**

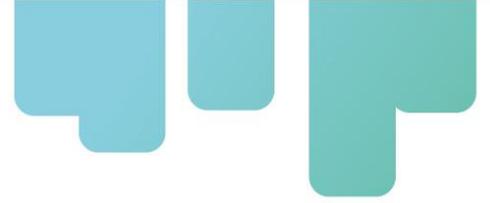
En el transcurso del proyecto se realizó el monitoreo de pasturas permanentes, maíz y soja. En el caso de las pasturas el riego fue por melgas o fajas (riego por superficie) y el maíz y soja fueron regados por pivot central de aproximadamente 60 has cada uno (figura 68 **Error! Reference source not found.**).



*Figura 68. Cultivos monitoreados para el ajuste del riego de precisión.*

#### **1.4.1.6 Estimación de la productividad del agua a escala de parcela.**

La estimación de la productividad del agua se detalló en el punto 1.1.6. La metodología es transversal para las parcelas piloto establecidas en Chile, Argentina, Uruguay y Colombia.



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

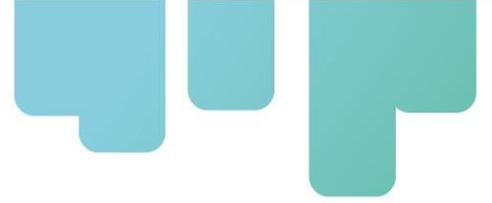
### 2.1 Empleo de la teledetección para la monitorización y contabilidad de los recursos hídricos sobre extensas superficies regables. Contextualización.

La agricultura de regadío, sirviéndose de más recursos hídricos, ha incrementado la producción de alimentos favoreciendo la seguridad alimentaria en un mundo cada vez más poblado. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), mediante el sistema de información global sobre los recursos hídricos AQUASTAT (FAO, 2016), distingue y cuantifica del total de aproximadamente 4.000 Km<sup>3</sup> de extracciones, los usos doméstico (11%), industrial (19%) y agrícola (70%). A pesar de que la monitorización de las superficies regadas y sus consumos hídricos fomenta un uso eficaz y sostenible (European Commission, 2000), éstos no suelen gestionarse sosteniblemente, siendo habituales las presiones. A escala global, un manejo sostenible se entiende cómo aquel que “*puede satisfacer las necesidades de las generaciones presentes y futuras*” (UN, 2015). Por tanto, para alcanzar dicha gestión, el conocimiento y cuantificación del agua de riego empleada es fundamental. Una visión general de la agricultura de regadío en los países objeto del estudio (cuadro 17) manifiesta la gran superficie potencial a monitorizar y la importancia del recurso hídrico empleado en la agricultura sobre los otros usos generales (industrial y doméstico).

*Cuadro 17. Superficie en regadío, extracción de agua y tipo de sistema de riego por país estudiado (FAO, 2000).*

País	Argentina	Chile	Colombia	Uruguay
Superficie bajo riego (ha)	1.550.233	1.900.000	900.000	181.200
Superficie bajo riego según total (%)	5,7	82,7	21,3	13,9
Extracción agua agrícola (Km <sup>3</sup> )	21,523	16,983	3,308	0,593
Extracción agua agrícola según total (%)	75	84	37	91
Origen superficial del agua (%)	74	97	-	96
Origen subterráneo del agua (%)	26	3	-	4
Superficie riego por gravedad (%)	95	95	95	100
Superficie riego por aspersión (%)	4	2	4	0
Superficie riego localizado (%)	< 1	3	< 1	0

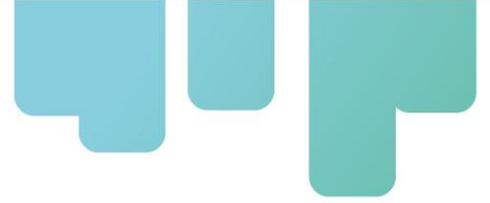
Tradicionalmente, los gestores públicos del agua han abordado la cuantificación de la demanda



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

El citado manual ha conseguido homogeneizar la estimación de la evapotranspiración de los cultivos ( $ET_c$ ), mediante la aproximación denominada coeficiente de cultivo único. Éste se basa en: i) la combinación de la demanda evaporativa atmosférica calculada de forma rigurosa para un cultivo de referencia (conocida como evapotranspiración de referencia,  $ET_o$ ); y ii) el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) que expresa: *“la diferencia entre la evapotranspiración de la superficie cultivada y la de referencia”*. Por un lado, dicho procedimiento obtiene la  $ET_o$  a través de datos climáticos recogidos principalmente por una red de estaciones, y por otro lado emplea valores tabulados de  $K_c$  que integren las características del tipo de cultivo a lo largo de su crecimiento y bajo óptimas condiciones de manejo, esto es, sin limitaciones a la disponibilidad de agua o nutrientes, y en ausencia de enfermedades u otras limitaciones a su desarrollo. Su determinación para diferentes tipos de cultivos ha permitido publicar valores tabulados por tipo de cultivo en sus diferentes etapas evolutivas: inicial ( $K_{c\ ini}$ ), desarrollo ( $K_{c\ des}$ ), medio ( $K_{c\ med}$ ) y final ( $K_{c\ fin}$ ). Sin embargo, para un correcto uso de las denominadas curvas de  $K_c$  se recomienda su adaptación a las condiciones locales (Allen et al., 1998), con lo que a pesar de que numerosos esfuerzos se han llevado a cabo para ampliar la base de datos y ponerlas a disposición de los usuarios, su transferencia y adaptación a nuevas zonas debe ser mejorada (Pereira et al., 2015, 2021).

En contraste, y más considerando las grandes extensiones de territorio como las presentadas en la **Error! Reference source not found.**, generar información complementaria y fiable para la monitorización de cultivos en regadío y los recursos hídricos empleados es posible mediante la teledetección (Bastiaanssen et al., 2000; Calera et al., 2005). Esta afirmación se apoya en adecuadas resoluciones espectrales, espaciales y temporales que presentan las imágenes capturadas por los actuales satélites de observación de la Tierra. Entre ellos destaca el satélite Sentinel-2 (S2, con los gemelos S2-A y S2-B) del programa *Copernicus* de la Agencia Europea Espacial, y cuyo acceso libre y gratuito ha contribuido a extender su operatividad, retornando beneficios económicos y medioambientales a la sociedad (Papadakis and Milosavljevic, 2019). Concretamente, los aproximadamente 110 km en cada lado del gránulo de las imágenes capturadas por S2 permiten cubrir grandes extensiones de territorio (Griffiths et al., 2019; Defourny et al., 2019), y al contar con una resolución espacial (mínimo tamaño de información



contenido en el píxel) de 10-60 m resultan apropiadas para la monitorización a escala de parcela (Melton et al., 2012; Montgomery et al., 2015; Vuolo et al., 2015). Además, la alta frecuencia de revisita de 5 días permite la construcción de series temporales de imágenes de satélite que son apropiadas para el seguimiento evolutivo de las coberturas vegetales (González-Gómez et al., 2018; Piedelobo et al., 2019). Por último, las 13 bandas que abarcan el espectro radiométrico de los 0,43 – 2,28  $\mu\text{m}$ , proporcionan la resolución espectral necesaria para el diagnóstico de la vegetación (Glenn et al., 2011; Weiss et al., 2020).

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

## 2.2 Metodología de trabajo en cuenca

El balance de agua en el suelo asistido por teledetección (Garrido-Rubio et al., 2020b) sigue la metodología FAO56, y es ejecutado en la última versión disponible de la aplicación operativa HidroMORE (Moreno et al., 2017). Dicho balance se trabaja píxel a píxel y bajo una frecuencia de cálculo diaria extendida al rango temporal deseado (x-semanas, x-meses, x-años...), con el fin de obtener una base de datos cartográfica y temática del regadío, espacial y temporalmente distribuida, gracias a las salidas al modelo de mapas de las variables de balance de agua en el suelo ( $ET_o$ , Precipitación,  $ET_c$  o NIR entre otras). Su extensión final de trabajo está determinada por la superficie abarcada por las imágenes de satélite empleadas, y la mínima unidad espacial de trabajo es la inherente a dichas imágenes, es decir, el tamaño del píxel de entrada. Para llevar a cabo el balance, HidroMORE emplea los siguientes datos de entrada (figura 69 **Error! Reference source not found.**): a) series temporales de IV; b) mapa de usos del suelo en regadío; c) mapa de tipos de suelo según sus propiedades hidrológicas; y d) bases de datos agroclimáticas (P y  $ET_o$  diaria). Esta herramienta operativa ha sido validada en diferentes escalas de gestión como: la parcela y asociación de regantes mediante el uso de contadores y planes de explotación (Garrido-Rubio et al., 2020b); la unidad geológica acuífero frente a datos piezométricos (Garrido-Rubio et al., 2019); y la demarcación hidrográfica usando Planes Hidrológicos de Cuenca (Garrido-Rubio et al., 2020a).

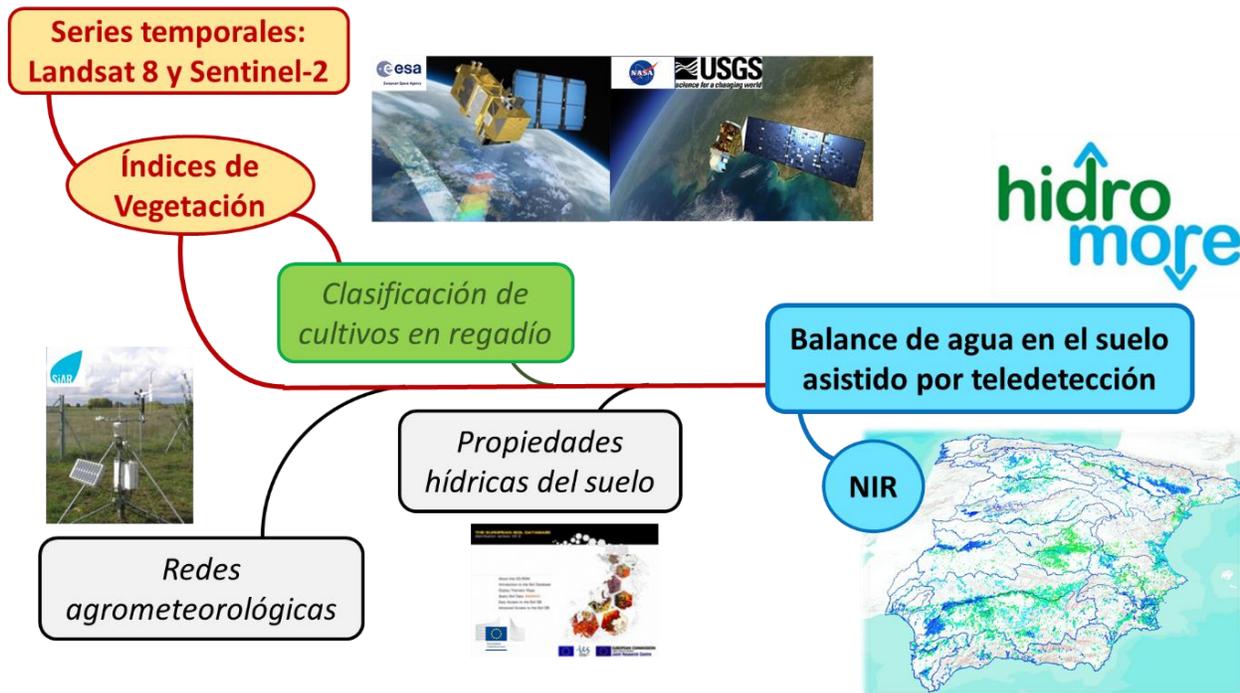


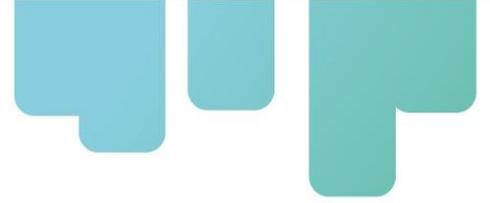
Figura 69. Esquema conceptual del modelo HidroMORE basado en la teledetección para estimar espacial y temporalmente distribuidas las NIR (Garrido-Rubio, 2021).

El balance de agua en el suelo asistido por teledetección sigue la metodología sintetizada en la ecuación (1), de forma que busca diariamente estimar el agotamiento de agua en el suelo en el perfil explorado por las raíces ( $D_r$ ) que la evaporación ajustada de los cultivos extrae ( $ET_{c_{aj}}$ ), para incorporar el agua finalmente mediante riego (NIR), en aquellas situaciones donde la precipitación ( $P$ ) sea insuficiente para un correcto desarrollo de los cultivos en regadío. En paralelo, usa la ecuación (2), aproximación de coeficiente de cultivo dual (Wright, 1982), ya que estima la  $ET_{c_{aj}}$  cuando los cultivos cubren parcialmente la superficie del suelo (leñosos y herbáceos en los primeros estadios de su desarrollo), o bien, cuando necesiten de riegos frecuentes (cultivos hortícolas) (Allen et al., 2005); tal y como se presentan en extensas y diversas superficies regables. En dicha ecuación encontramos los parámetros del coeficiente de cultivo dual como el coeficiente basal de cultivo ( $K_{cb}$ ), el coeficiente de estrés hídrico del cultivo ( $K_s$ ), y el coeficiente de evaporación del suelo ( $K_e$ ).

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - NIR_i - CR_i + ET_{c_{aj},i} + DP_i \quad (1)$$

$$ET_{c_{aj},i} = ET_o \cdot (K_{cb} \cdot K_s + K_e)_i \quad (2)$$

Asumiendo la gran variedad de cultivos y manejos desarrollados que sobre distintas condiciones locales tienen lugar en el proyecto ejecutado, en lugar de usar valores tabulados propuestos para coeficiente base de cultivo ( $K_{cb}$ ) o de fracción de la superficie del suelo cubierta por la vegetación



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

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

$$f_{c\ act,i} = 1,19 \cdot (NDVI) - 0,16 \quad (4)$$

Finalmente, el balance reproducido diariamente y a escala de píxel invierte la ecuación (1), para obtener a escala de píxel y mediante la ecuación (5), las NIR diarias (mm/día), generando una cartografía temática espacial y temporalmente distribuida. En la ecuación (5), se han descartado las variables de: ascenso capilar ( $CR_i$ ), pues no es recomendable su incorporación cuando la capa freática está localizada a más de 1 m de la superficie (Allen et al., 1998), y la escorrentía superficial ( $RO_i$ ), pues la aplicación HidroMORE trabaja flujos verticales, no laterales (Torres, 2010).

$$NIR_i = (D_{r,i-1} - D_r)_i - P_i + ET_{c\ aj,i} + DP_i \quad (5)$$

### 2.3 Diseño experimental

Con el objetivo de generar información homogénea, fiable y reproducible, que fomente el uso eficaz y sostenible de los recursos hídricos sobre diferentes tipos de cultivo en distintas cuencas de trabajo (cuadro 18), el diseño experimental ha seguido las siguientes fases:

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

*Cuadro 18. Superficie total y cultivos principales desarrollados por cuencas de trabajo.*

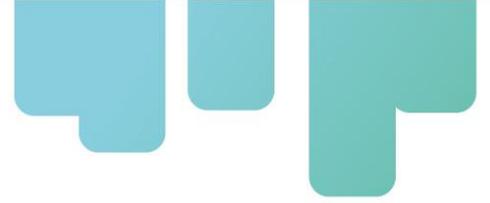
Cuenca de trabajo	Superficie (ha)	Cultivos principales
Subcuenca del río Tunuyán Inferior (Mendoza, Argentina)	100.000	Vid, frutal, olivo y hortalizas
Colonia Fiscal Sarmiento (San Juan, Argentina)	2.000	Vid, hortalizas y alfalfa
Villa Regina (Río Negro, Argentina)	7.000	Peral, Manzano, ciruela...
Valle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

## 2.4 Presentación del modelo y productos obtenidos

Para dar a conocer tanto el modelo de balance de agua asistido por teledetección como los productos que se obtienen, se realizaron reuniones grupales e individuales con los responsables y cooperadores de cada cuenca de trabajo. Entre la diferente cartografía temática generada, el proyecto se centra en la estimación de las necesidades netas de agua de riego (NIR). Se presenta a continuación los detalles técnicos para cada cuenca de trabajo.

*Cuadro 19. Descripción técnica de los productos generados por el balance de agua en el suelo asistido por teledetección.*

Cuenca de trabajo	Necesidades netas de agua de riego (NIR)			
	Campañas de riego consideradas	Resolución temporal	Resolución espacial	Unidades de trabajo
Subcuenca del río Tunuyán Inferior (Mendoza, Argentina)	2020-2021	Anual y mensual	Tamaño del píxel de salida:	mm
Colonia Fiscal Sarmiento (San Juan, Argentina)	2020-2021		10 m	y/o
Villa Regina (Río Negro, Argentina)	2020-2021, 2021-2022 y 2022-2023 <sup>1</sup>		m <sup>3</sup> /ha	



Valle del Elqui (Coquimbo, Chile)	2018-2019, 2019-2020, 2020-2021, 2021-2022 <sup>1</sup>			
Distrito RUT (Valle del Cauca, Colombia)	2020-2021			
Arroyo del Tala (Salto, Uruguay)	2019-2020, 2020-2021, 2021-2022 y 2022-2023 <sup>1</sup>			

<sup>1</sup> campaña de riego considerada en el proyecto, pero no realizada hasta la fecha.

## 2.5 Intercambio de información de entrada al modelo

Para ejecutar el balance de agua en el suelo asistido por teledetección se necesita información de entrada. Ésta fue presentada a los responsables en cada área de trabajo con el fin de iniciar un intercambio de información para poder contar con el mejor dato disponible por cuenca de trabajo. El siguiente **Error! Reference source not found.** 20 resumen los datos de entrada al modelo.

*Cuadro 20. Descripción técnica de los productos generados por el balance de agua en el suelo asistido por teledetección.*

Información de entrada requerida por el balance de agua en el suelo	
Tipo de información	Descripción
Serie temporal de Imágenes de índice de vegetación NDVI	Producto NDVI desde imágenes de satélite Sentinel 2, a 10 m de resolución espacial
Datos diarios de precipitación (P) y evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> )	Datos en mm/día registrados por las estaciones agroclimáticas representativas
Mapas de tipos de suelo (clasificación textural y profundidad limitante)	Mapas con información para derivar las propiedades hídricas del suelo
Mapas con la clasificación de usos del suelo en regadío	Mapas con información espacialmente distribuida de los cultivos en regadío desarrollados
Características de manejo y riego según tipos de cultivos desarrollados	Sistemas de riego, duración de la campaña de riego y dosis de riego por cultivo (entre otros)

## 2.6 Evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección

Una vez ejecutado con el programa HidroMORE el balance de agua en el suelo asistido por teledetección se presentó a los responsables por cada cuenca de trabajo la parametrización del balance y los resultados obtenidos con el fin de hacer una primera evaluación. Además, se solicitó el mejor dato disponible con relación a la evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección. Entendemos por este último concepto la agregación espacial y temporal del producto necesidades netas de agua de riego (NIR) en las escalas espaciales y temporales



manejadas por los gestores del agua en sus tomas de decisiones como la parcela o la asociación de regantes.

*Cuadro 21. Tipología de datos requeridos para la evaluación de la contabilidad de agua de riego asistida por teledetección.*

<b>Datos para la evaluación de la contabilidad del agua de riego asistida por teledetección</b>	
<b>Verdad terreno</b>	<b>Descripción del dato de evaluación</b>
Contadores volumétricos, aforadores de canales...	Datos sobre el agua de riego aplicada en parcela, grupo de parcelas o comunidad de regantes por ejemplo (dimensión espacial) a escalas diarias, semanales, mensuales o anuales (dimensión temporal)
Riego promedio por tipo de cultivo desarrollado.	Datos sobre el agua de riego promedio aplicada por cada tipo de cultivo desarrollado. Recopilada desde datos en parcelas, gestión de planes de explotación o información obtenido en investigación

## **2.7 Transmisión de la información generada a los gestores públicos y privados del agua**

Finalmente, la información generada de forma homogénea, fiable y reproducible para fomentar el uso eficaz y sostenible de los recursos hídricos sobre diferentes tipos de cultivo en distintas cuencas de trabajo se entrega a los gestores públicos y privados del agua para su uso.

### 3. Plataforma Agrícola Satelital: PLAS FONTAGRO

La Plataforma Agrícola Satelital es un sistema de consulta (on line), basado en el visor SPIDERwebGIS® (*System of Participatory Information, Decision support, and Expert knowledge for irrigation and River basin water Management*) que permite consultar y desplegar gráficamente la evolución temporal del índice de vegetación satelital NDVI y del coeficiente de cultivo basal (**Error! Reference source not found.** 70). Sus bases conceptuales corresponden a técnicas de sistemas información geográfica en línea (*web map server*) habilitadas con información de tecnologías de observación de la tierra (EO) y funciones típicas de los servicios de asesoramiento en riego (*Irrigation Advisory Service, IAS*) (Calera et al., 2005).

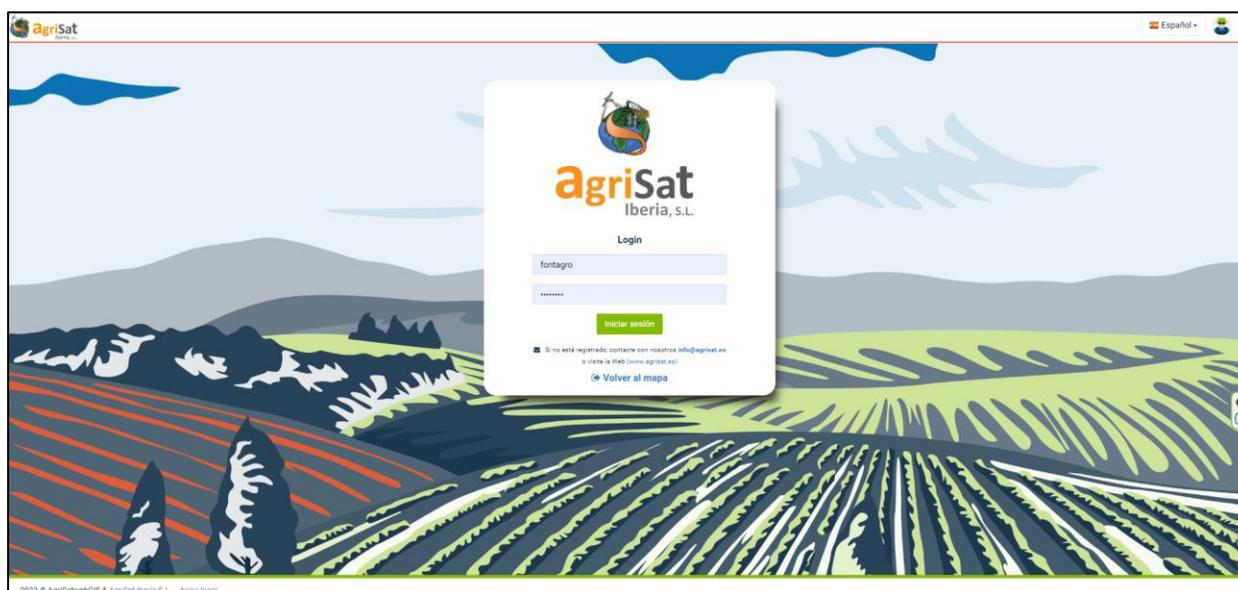


Figura 70. Página web de acceso a la Plataforma Agrícola Satelital en la región de Coquimbo (<https://www.agrisatwebgis.com/app/es/spider/map?group=PLAS-FONTAGRO>).

Uno de los pilares básicos de esta plataforma es el uso de tecnologías de EO (imágenes satelitales) que cubren grandes áreas y soportan diferentes resoluciones espaciales y temporales, otorgando a la herramienta un gran potencial para diferentes niveles de gestión del territorio y los cultivos (Moreno-Rivera et al., 2009). El despliegue de la información espacial en un visor *on line*, facilita su uso ya que no requiere la instalación de software y es la propia web quien soporta la plataforma de consulta como herramienta cooperativa, incrementando el potencial de operatividad y difusión tecnológica. De este modo, el diseño de la interfaz web proporciona una herramienta de fácil uso para el usuario general sin necesidad de poseer un alto conocimiento sobre sistemas de información geográfica o teledetección.

#### 3.1 Sistema de consulta on line

El visor on line cuenta con las funcionalidades clásicas de los visualizadores de información geográfica (*Web Map Service, WMS*) como son el despliegue de imágenes, la carga de fuentes de

información cartográfica (estándares *Open Geospatial Consortium, OGC*) y capas vectoriales, así como opciones de visualización (zoom) sobre áreas de interés, recorridos por imágenes de diversas fechas, visualización de sitios por coordenadas, guardado de sitios de interés y medidas de distancias y superficies. Adicionalmente, el sistema cuenta con la opción de carga de mapas de carreteras (*Google roadmap*) e imágenes satelitales de referencia (*Google satélite, Bing Aerial*) de manera de facilitar la búsqueda y ubicación exacta de parcelas de interés (figuras 71 y 72).

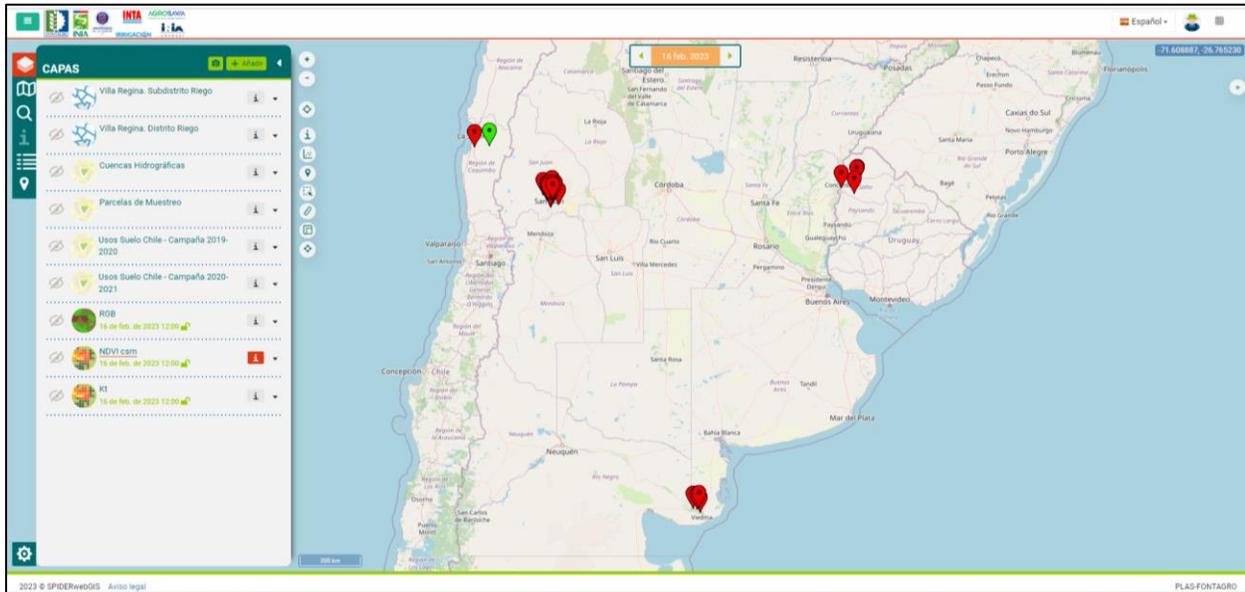


Figura 71. Plataforma Satelital para consulta en sitios piloto (Capa Open Street Map).

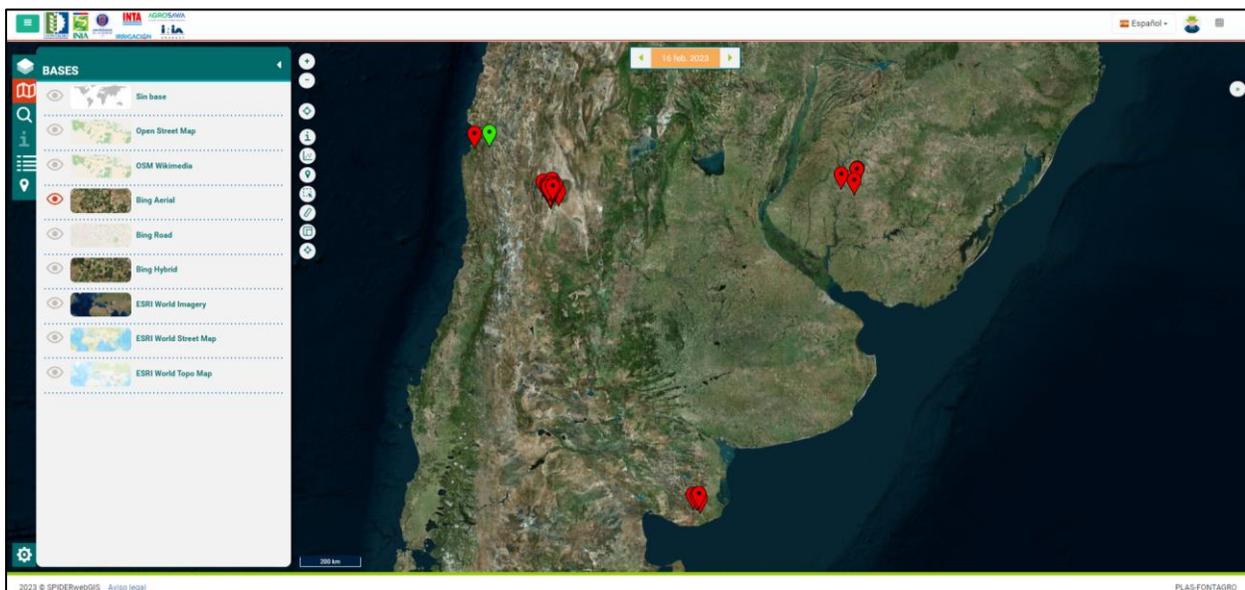
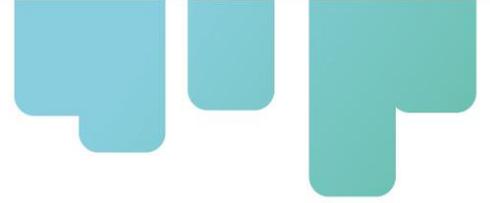


Figura 72. Plataforma Satelital para consulta en sitios piloto (Capa Bing Aerial).

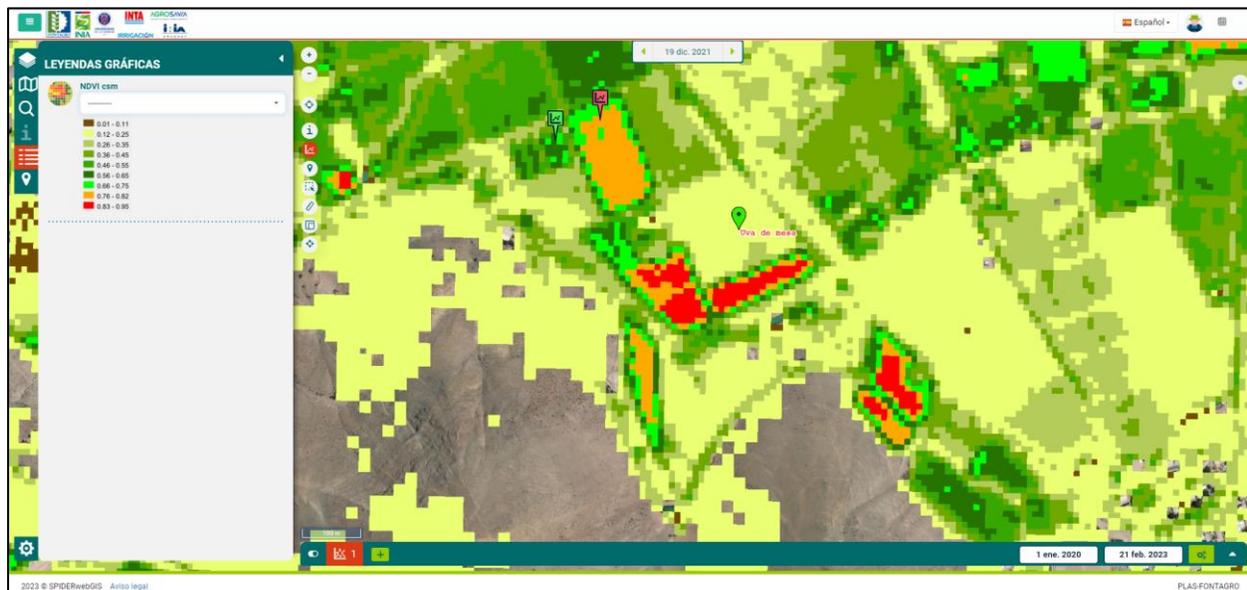


Para el análisis de los cultivos, en la Plataforma Satelital se utilizan imágenes de los Sentinel 2A y Sentinel 2B del programa Copernicus de la Agencia Satelital Europea (ESA). En el cuadro 22 **Error! Reference source not found.** se señalan las principales características de los satélites señalados.

*Cuadro 22. Características de las imágenes satelitales utilizados en el estudio.*

Programa	Satélites	Cobertura imagen (km)	Resolución temporal (días entre visita)	Resolución espacial (metros)
Copernicus (ESA)	Sentinel 2A	100 x 100	10 días	10
	Sentinel 2B			

La caracterización del desarrollo anual de los cultivos se realiza por medio del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) obtenido a partir de series temporales de imágenes satelitales. Este índice de vegetación permite estimar la absorción de la radiación solar por parte del cultivo en ciertos espectros de la radiación solar, eliminando la respuesta de otros elementos presentes en el terreno. Para la interpretación visual de este índice se utilizan paletas de colores definidas por rangos de manera de diferenciar fácilmente zonas con diferencia en el nivel de desarrollo (vigor) de los cultivos en el terreno. Así mismo, es posible consultar valores absolutos del índice y su descarga para análisis.



*Figura 73. Visualización de imagen NDVI en la Plataforma Satelital en rangos de colores para una fecha determinada. Los colores permiten identificar diferencias de vigor de los cultivos y/o cobertura de suelo desnudo en el terreno.*

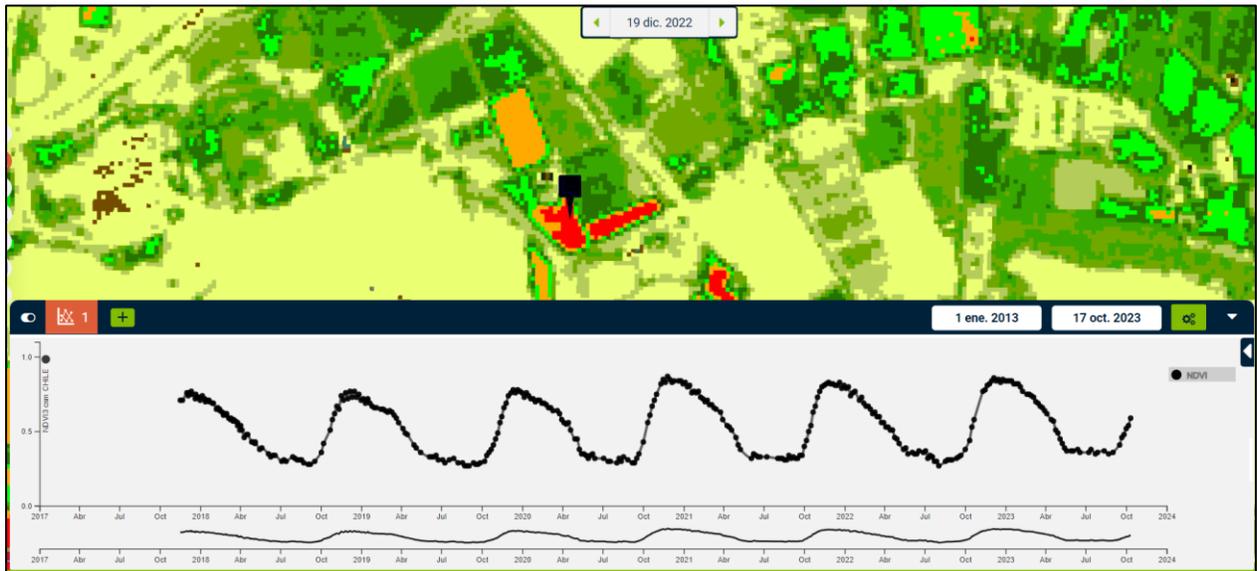
Así mismo, a partir de estas imágenes se disponibilizan imágenes composición pseudocolor RGB, de manera de facilitar el análisis de anomalías del índice NDVI como por ejemplo las causadas por nubes o sus sombras.



*Figura 74. Visualización de nubes en la Plataforma Satelital a partir de una imagen composición pseudocolor RGB.*

### **3.2 Gráficas temporales**

La secuencia temporal del índice de vegetación NDVI obtenido de las imágenes de satélite, están disponibles en la Plataforma Satelital a partir del año 2013. Las capas de consulta consisten en un mosaico dinámico de imágenes con un componente espacial y temporal, cubriendo diferentes áreas del territorio, sobre diferentes fechas, haciendo posible un ráster temporal continuo. Al momento de realizar una consulta en un sitio determinado se puede analizar las características de la evolución histórica del índice de vegetación durante la temporada de desarrollo. De este modo, la plataforma no sólo muestra la información para una fecha en concreto, sino que entrega la evolución a lo largo del tiempo. Esta información es desplegada automáticamente por medio de gráficos de series de tiempo interactivos, permitiendo al usuario la definición de un rango de fechas para consulta y análisis. De este modo es posible contar con el historial del cultivo funcionando como un cuaderno de campo digital, en la cual se podrá comparar el comportamiento del cultivo en los años.



*Figura 75. Despliegue gráfico del NDVI en la Plataforma Satelital, señalando sus curvas temporales e identificación de la variabilidad espacial del cultivo.*

Así mismo, es posible realizar múltiples consultas en diferentes puntos del cultivo de manera de comparar los valores del índice entre sectores o parcelas. De este modo, las consultas en diversas zonas del cultivo y su análisis gráfico permiten identificar sectores con diferencias en el desarrollo de las plantas y definir la **variabilidad espacial del cultivo** (figura 75). La información proporcionada por las imágenes satelitales es cuantitativa (numérica) y no depende de las apreciaciones del observador. De este modo los valores obtenidos en una parcela pueden ser comparados directamente con otros sitios en la parcela o con otras explotaciones, sin incluir el sesgo del observador.

### 3.3 Monitoreo de los cultivos.

La posibilidad de disponer de información del índice de vegetación cada vez que un satélite visita un territorio permite establecer análisis para el seguimiento anual del desarrollo de los cultivos. La periodicidad o frecuencia de información del muestreo dependerá del tipo de satélite y de las condiciones atmosféricas al momento de paso. De este modo, es posible contar con imágenes en diferentes instantes del año que representan la respuesta espectral de los cultivos a lo largo de su ciclo fenológico. En la **Error! Reference source not found. 76** se muestra un ejemplo la evolución del índice de vegetación NDVI en un parrón de uva de mesa de la variedad Flame Seedless (Vicuña, región de Coquimbo), indicando los principales estados fenológicos del cultivo en la curva temporal de desarrollo.

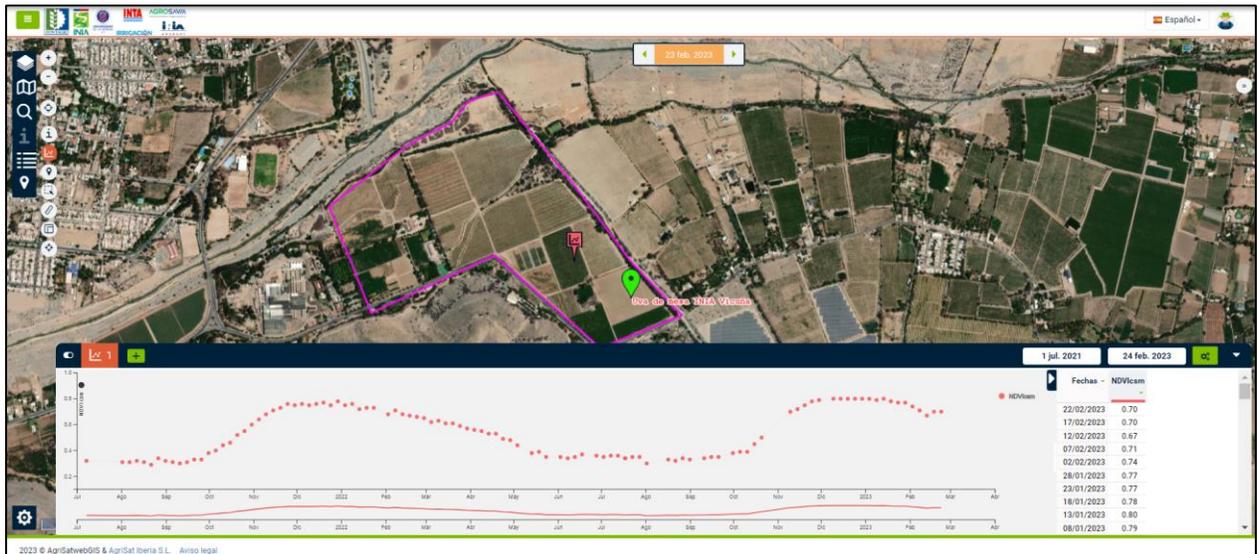


Figura 76. Ejemplo de evolución del índice de vegetación NDVI en un parrón de uva de mesa var. Flame Seedless, ubicado en la ciudad de Vicuña y registrado por el satélite Sentinel 2.

Como se puede observar en la figura 76, la curva anual del índice de vegetación NDVI permite identificar el instante de brotación del parrón, el período de crecimiento vegetativo vigoroso de las plantas, la fecha en que se alcanza el máximo desarrollo de la vegetación, el comportamiento de la cobertura vegetal durante el verano y finalmente el período de senescencia y receso invernal del cultivo. Esta capacidad de identificar instantes del desarrollo anual de un cultivo permite definir manejos agronómicos del cultivo o la implementación de prácticas culturales ya sea para el riego como otros aspectos del manejo del cultivo.

### 3.4 Guía Rápida de descripción de herramientas para consulta de la Plataforma Agrícola Satelital - PLAS FONTAGRO.

A continuación, se describen los componentes y funciones disponibles en la Plataforma Agrícola Satelital. Se indica que se dispone de un video tutorial donde se muestra en detalle el procedimiento de consulta de la plataforma.



Figura 77. Descripción de la interfaz web de la Plataforma Agrícola Satelital.

**Sección CAPAS disponibles:** contiene las capas que pueden ser consultadas por el usuario.

**Sección BASES:** permite seleccionar fondos cartográficos, carreteras o imágenes para ubicar sitios.

**Sección LEYENDAS:** contiene la representación en colores para diversos tipos de capas.

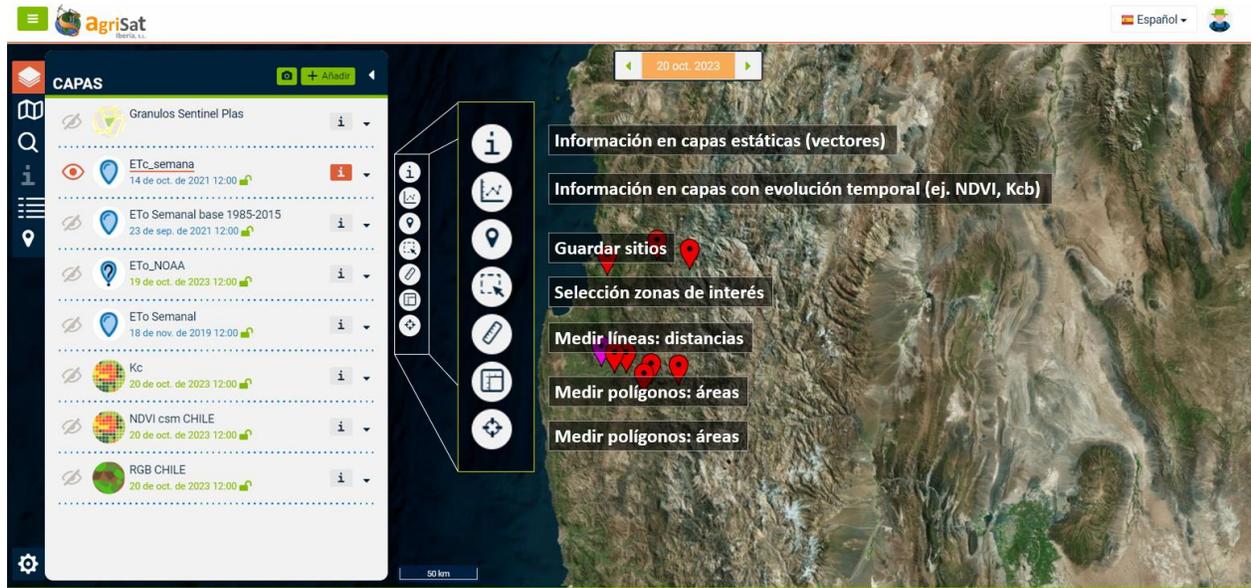
**Sección de visualización de imágenes:** es el espacio donde se visualizan imágenes, mapas, polígonos de referencia, las cuales pueden ser seleccionadas en el menú **BASES**.

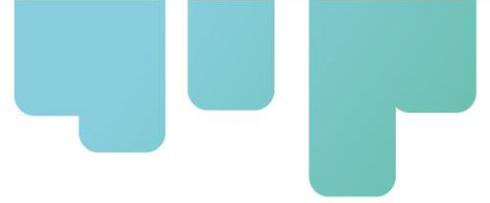
**Sección de rango de fecha de la consulta:** permite definir la fecha inicial y final de la serie temporal de imágenes que se desea consultar. Además, permite definir el número de píxeles (mallas 1x1, 3x3, 5x5, etc.) que se va a utilizar en la consulta.

**Sección de gráfica:** es el espacio donde se construye la gráfica de la evolución temporal de los productos satelitales (RGB, NDVI, Kc, etc.). Tiene la opción de ver una gráfica simple (una consulta) o una multigráfica (varias consultas).

**Sección Tabla de valores:** espacio que muestra los datos numéricos de la gráfica desplegada. Estos valores pueden ser exportados como planilla de cálculo.

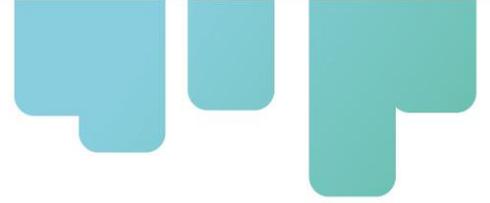
**Barras de herramientas:** contiene botones para definir la visualización de las imágenes.



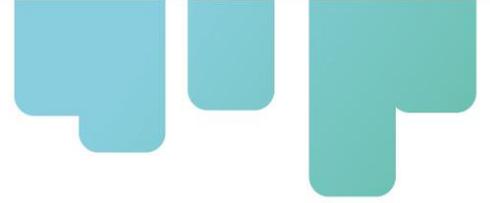


## Referencias Bibliográficas

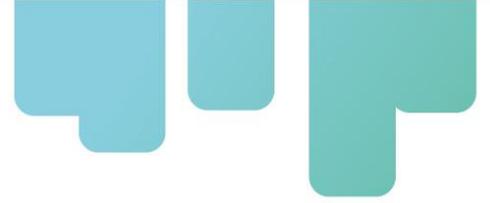
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 56. FAO, Rome, Italy.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, M. Smith, D. Raes, and J.L. Wright. 2005. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131(1): 2–13. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(2).
- Bastiaanssen, W.G.M., D.J. Molden, and I.W. Makin. 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: Examples from research and possible applications. *Agric. Water Manag.* 46(2): 137–155. doi: 10.1016/S0378-3774(00)00080-9.
- Bausch, W.C. 1995. Remote sensing of crop coefficients for improving the irrigation scheduling of corn. *Agric. Water Manag.* 27(1): 55–68. doi: 10.1016/0378-3774(95)01125-3.
- Bausch, W.C., and C.M.U. Neale. 1987. Crop Coefficients Derived from Reflected Canopy Radiation: A Concept. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 30(3): 703–709. doi: 10.13031/2013.30463.
- Calera, A., A.M. Jochum, A.C. García, A.M. Rodríguez, and P.L. Fuster. 2005. Irrigation management from space: Towards user-friendly products. *Irrig. Drain. Syst.* 19(3–4): 337–353. doi: 10.1007/s10795-005-5197-x.
- Campos, I., C.M.U. Neale, A. Calera, C. Balbontín, and J. González-Piqueras. 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manag.* 98(1): 45–54. doi: 10.1016/j.agwat.2010.07.011.
- Choudhury, B.J., N.U. Ahmed, S.B. Idso, R.J. Reginato, and C.S.T. Daughtry. 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sens. Environ.* 50(1): 1–17. doi: 10.1016/0034-4257(94)90090-6.
- Cornish, G., B. Bosworth, C.J. Perry, and J.J. Burke. 2004. Water charging in irrigated agriculture: an analysis of international experience. Food and Agriculture Organization of the United Nations., Rome, Italy.
- Dalmau, B., and L. Vierbücher. 1999. Experiencia en el establecimiento de redes de control de extracciones de agua subterránea en Tarragona. In: Ballester, A., Fernández, J.A., and López, J.A., editors, *Medida y evaluación de las extracciones de agua subterránea*. ITGE (Instituto Tecnológico Geominero de España). p. 73–87
- Defourny, P., S. Bontemps, N. Bellemans, C. Cara, G. Dedieu, et al. 2019. Near real-time agriculture monitoring at national scale at parcel resolution: Performance assessment of the Sen2-Agri automated system in various cropping systems around the world. *Remote Sens. Environ.* 221: 551–568. doi: 10.1016/j.rse.2018.11.007.
- Díaz Mora, J. 1999. Experiencia en la implantación de contadores en los acuíferos de la cuenca alta del Guadiana. In: Ballester, A., Fernández, J.A., and López, J.A., editors, *Medida y evaluación de las extracciones de agua subterránea*. ITGE (Instituto Tecnológico Geominero de España). p. 69–72
- Duchemin, B., R. Hadria, S. Erraki, G. Boulet, P. Maisongrande, et al. 2006. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation



- indices. *Agric. Water Manag.* 79(1): 1–27. doi: 10.1016/j.agwat.2005.02.013.
- Er-Raki, S., A. Chehbouni, and B. Duchemin. 2010. Combining Satellite Remote Sensing Data with the FAO-56 Dual Approach for Water Use Mapping In Irrigated Wheat Fields of a Semi-Arid Region. *Remote Sens.* 2(1): 375–387. doi: 10.3390/rs2010375.
- European Commission. 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Off. J. Eur. Parliam.* L327(September 1996): 1–82. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj>.
- FAO. 2000. El riego en América Latina y el Caribe en cifras. FAO, Rome, Italy.
- FAO. 2016. AQUASTAT - FAO's Information System on Water and Agriculture. Food Agric. Organ. United Nations. [http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water\\_use/index.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm).
- Garrido-Rubio, J. 2021. Teledetección aplicada a la contabilidad del agua de riego sobre diferentes escalas espaciales y temporales de gestión: desde la parcela hasta la demarcación hidrográfica. doi: <http://hdl.handle.net/10578/28728>.
- Garrido-Rubio, J., A. Calera, I. Arellano, M. Belmonte, L. Fraile, et al. 2020a. Evaluation of remote sensing-based irrigation water accounting at river basin district management scale. *Remote Sens.* 12(19): 3187. doi: 10.3390/rs12193187.
- Garrido-Rubio, J., J. González-Piqueras, I. Campos, A. Osann, L. González-Gómez, et al. 2020b. Remote sensing-based soil water balance for irrigation water accounting at plot and water user association management scale. *Agric. Water Manag.* 238: 106236. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106236.
- Garrido-Rubio, J., D. Sanz, J. González-Piqueras, and A. Calera. 2019. Application of a remote sensing-based soil water balance for the accounting of groundwater abstractions in large irrigation areas. *Irrig. Sci.* 37(6): 709–724. doi: 10.1007/s00271-019-00629-3.
- Glenn, E.P., A.R. Huete, P.L. Nagler, and S.G. Nelson. 2008. Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors* 8(4): 2136–2160. doi: 10.3390/s8042136.
- Glenn, E.P., C.M.U. Neale, D.J. Hunsaker, and P.L. Nagler. 2011. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrol. Process.* 25(26): 4050–4062. doi: 10.1002/hyp.8392.
- González-Gómez, L., I. Campos, and A. Calera. 2018. Use of different temporal scales to monitor phenology and its relationship with temporal evolution of normalized difference vegetation index in wheat. *J. Appl. Remote Sens.* 12(02): 1. doi: 10.1117/1.JRS.12.026010.
- González-Piqueras, J. 2006. Evapotranspiración de la cubierta vegetal mediante la determinación del coeficiente de cultivo por teledetección extensión a escala regional: acuífero 08.29 Mancha Oriental. <http://hdl.handle.net/10550/14928>.
- Griffiths, P., C. Nendel, and P. Hostert. 2019. Intra-annual reflectance composites from Sentinel-2 and Landsat for national-scale crop and land cover mapping. *Remote Sens. Environ.* 220: 135–151. doi: 10.1016/j.rse.2018.10.031.
- Heilman, J.L., W.E. Heilman, and D.G. Moore. 1982. Evaluating the Crop Coefficient Using Spectral



- Reflectance 1. *Agron. J.* 74(6): 967–971. doi: 10.2134/agronj1982.00021962007400060010x.
- Ibañez, A. A., Parera, C., & Torres, M. (2016). Efecto de la restricción hídrica invernal en olivo (*Olea europaea* L.): el potencial hídrico xilemático y la conductancia estomática. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 42(2), 186-200.
- Madurga del Cura, C., and J. Ramírez. 2011. Influencia de la calidad del agua en la metrología de los contadores de riego. XXIX Congr. Nac. Riegos. doi: <http://www.aeryd.es/empresas/aeryd/trabajos/2011-C-20.pdf>.
- Melton, F.S., L.F. Johnson, C.P. Lund, L.L. Pierce, A.R. Michaelis, et al. 2012. Satellite irrigation management support with the terrestrial observation and prediction system: A framework for integration of satellite and surface observations to support improvements in agricultural water resource management. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 5(6): 1709–1721. doi: 10.1109/JSTARS.2012.2214474.
- Montgomery, J., J.W. Hornbuckle, I. Hume, and J. Vleeshouwer. 2015. *IrrisAT – weather based scheduling and benchmarking technology* (T. Acuña, C. Moeller, D. Parsons, and M. Harrison, editors). Australian Society of Agronomy Inc.
- Moreno, R., E. Arias, J.L. Sanchez, D. Cazorla, J. Garrido, et al. 2017. HidroMORE 2: An optimized and parallel version of HidroMORE. 2017 8th Int. Conf. Inf. Commun. Syst. ICICS 2017: 1–6. doi: 10.1109/IACS.2017.7921936.
- Neale, C.M.U., W.C. Bausch, and D.F. Heermann. 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 32(6): 1891–1899. doi: 10.13031/2013.31240.
- Odi-Lara, M., I. Campos, C. Neale, S. Ortega-Farías, C. Poblete-Echeverría, et al. 2016. Estimating Evapotranspiration of an Apple Orchard Using a Remote Sensing-Based Soil Water Balance. *Remote Sens.* 8(3): 253. doi: 10.3390/rs8030253.
- Papadakis, D., and I. Milosavljevic. 2019. Copernicus Sentinel Benefits Study. Exploring sectoral uptake of Sentinel data within academic publications. doi: [http://earscl.org/Sebs/wp-content/uploads/2019/07/CopernicusSentinelBenefitsStudy\\_UptakeOfSentinelDataInAcademicPublications\\_June2019.pdf](http://earscl.org/Sebs/wp-content/uploads/2019/07/CopernicusSentinelBenefitsStudy_UptakeOfSentinelDataInAcademicPublications_June2019.pdf).
- Pereira, L.S., R.G. Allen, M. Smith, and D. Raes. 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agric. Water Manag.* 147: 4–20. doi: 10.1016/J.AGWAT.2014.07.031.
- Pereira, L.S., P. Paredes, R. López-Urrea, D.J. Hunsaker, M. Mota, et al. 2021. Standard single and basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crop water requirements approach. *Agric. Water Manag.* 243: 106196. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106196.
- Pérez, J., C. Madurga del Cura, and A. Sánchez de Ribera. 2011. Influencia en la disposición de un contador en su metrología. XXIX Congr. Nac. Riegos. doi: <http://www.aeryd.es/empresas/aeryd/trabajos/2011-C-19.pdf>.
- Piedelobo, L., D. Hernández-López, R. Ballesteros, A. Chakhar, S. Del Pozo, et al. 2019. Scalable pixel-based crop classification combining Sentinel-2 and Landsat-8 data time series: Case study of the Duero river basin. *Agric. Syst.* 171: 36–50. doi: 10.1016/j.agsy.2019.01.005.
- Rouse, J., R. Haas, D. Deering, and J. Schell. 1974. Monitoring the vernal advancement and



- retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Goddard Space Flight Center NASA.
- Tasumi, M., and R.G. Allen. 2007. Satellite-based ET mapping to assess variation in ET with timing of crop development. *Agric. Water Manag.* 88(1–3): 54–62. doi: 10.1016/j.agwat.2006.08.010.
- Torres, E.A. 2010. El modelo FAO-56 asistido por satélite en la estimación de la evapotranspiración en un cultivo bajo estrés hídrico y suelo desnudo Torres Prieto, E.A., 2010. El modelo FAO-56 asistido por satélite en la estimación de la evapotranspiración en un cultivo baj. Tesis Univ. Castilla-La Mancha. doi: <https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=894945>.
- UN. 2015. 70/1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development Preamble. General Assembly, New York.
- Vuolo, F., G. D’Urso, C. De Michele, B. Bianchi, and M. Cutting. 2015. Satellite-based irrigation advisory services: A common tool for different experiences from Europe to Australia. *Agric. Water Manag.* 147: 82–95. doi: 10.1016/J.AGWAT.2014.08.004.
- Weiss, M., F. Jacob, and G. Duveiller. 2020. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sens. Environ.* 236: 111402. doi: 10.1016/j.rse.2019.111402.
- Wright, J. 1982. New Evapotranspiration Crop Coefficients. *J. Irrig. Drain. Div.* 108(1): 57–74. doi: <https://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/id/eprint/382>.

## Instituciones participantes



Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



[www.fontagro.org](http://www.fontagro.org)  
Correo electrónico: [fontagro@fontagro.org](mailto:fontagro@fontagro.org)