

Telemetría Agrícola. Un acercamiento hacia las nuevas tecnologías disponibles en riego de precisión

Flavio Capraro¹, Santiago Tosetti¹, Vicente Mut¹

¹ Instituto de Automática (UNSJ – CONICET), Av. Lib. Gral San Martín 1112 (o)
San Juan, ARGENTINA

{fcapraro, stosetti, vmut}@inaut.unsj.edu.ar
<http://www.inaut.unsj.edu.ar>

Resumen. Los sistemas de telemetría permiten la monitorización y control remoto de procesos a grandes distancias; la implementación en la agricultura es reciente y demuestra importantes ventajas. En el trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de Telemetría Agrícola conformado por de estaciones de medición (fijas y móviles) que se instalan dentro de la zona cultivada; en combinación con de una serie de módulos informáticos encargados de procesar los datos de campo (estación base), el sistema permite disponer de información en tiempo real sobre la evolución del cultivo, la gestión del riego y condiciones del clima. Se presenta una descripción de cada componente del sistema para el cual se integraron tecnologías en electrónica, comunicación, informática robótica y control automático. El desarrollo incluyó el diseño de un entorno visual para que los usuarios consulten la información y gestionen las operaciones del riego de manera precisa en base a la demanda hídrica del cultivo, entre otros requerimientos. Finalmente se presenta un ensayo sobre una parcela de tomate en la que se aplicaron tres tratamientos de riego diferenciados.

1 Introducción

Acorde al tipo de agricultura que se desarrolla mayormente en Argentina, las técnicas de agricultura de precisión (técnicas orientadas a optimizar el uso de los insumos agrícolas función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola) han sido incorporadas y atendidas con mayor énfasis por aquellos productores que poseen grandes extensiones de cultivos, como ser soja, trigo, maíz, girasol, entre otros. Sin embargo, en la región cordillerana, con particularidad en la provincia de San Juan, se presenta otro modelo agrícola con realidades distintas a lo que se registra en el resto del país, con campos de menores extensiones y cultivos como vid, olivos, frutales, y hortalizas; y que requieren de la implementación de sistemas de riego presurizado, ello debido a la alta demanda hídrica de los cultivos y al reducido aporte de agua por lluvia (90 a 110mm anuales). La forma en que ocurren y se combaten los problemas climáticos también difiere en la zona cordillerana. Las principales adversidades climáticas que se presentan en San Juan son heladas, viento Zonda, sequía y granizo.

Con énfasis sobre la realidad del mercado agrícola primario de la provincia de San Juan, para llevar adelante una agricultura moderna y para lograr el manejo eficiente del riego, es que se planteó el desarrollo de un sistema de medición y monitorización de variables (intra campo) que se adecúe a la realidad local y permita conocer en tiempo real la evolución de los cultivos, el funcionamiento de los equipos de riego y las condiciones climáticas que afectan a la zona cultivada. El objetivo del proyecto es desarrollar el sistema de telemetría y generar una herramienta tecnológica que permita al productor un acercamiento a las nuevas tecnologías disponibles para gestionar el riego con precisión (sensores, aplicaciones informáticas, gestión en línea del riego, reportes sobre aplicación del riego, consumo hídrico de los cultivos, etc.). El desarrollo del sistema se basó en el análisis de la infraestructura de manejo de los datos y la monitorización de la información bajo las técnicas modernas de telemetría. En el presente trabajo inicialmente se abordan los conceptos de telemetría y un enfoque orientado hacia la agricultura local; se complementa la introducción con los conceptos e importancia de riego de precisión. Posteriormente se presenta el desarrollo de un sistema de telemetría agrícola que integra diferentes tecnologías en electrónica, comunicación, sensores, control automático e informática para la visualización de la información. Se complementa la presentación con una experiencia en el manejo de riego preciso en una parcela experimental con cultivo de tomate en la que se ensayaron tres tratamientos de riego diferenciados. Finalmente se mencionan las primeras conclusiones de la puesta en marcha del sistema de telemetría agrícola.

1.1 Telemetría

La palabra “telemetría” procede de las palabras griegas “tele”, que quiere decir a distancia, y la palabra “metron”, que quiere decir medida. La telemetría es la ciencia o el proceso de recopilación de información sobre objetos que se encuentran lejanos y el envío de la información (de manera electrónica) hacia algún lugar. Es una tecnología que permite la medición remota de magnitudes físicas y el posterior envío de la información hacia un centro de operaciones o donde se ubique el usuario; de esta manera se utiliza la información para monitorizar y/o controlar un proceso en el sitio remoto.

En los sistemas modernos de telemetría el envío de la información hacia la central de operaciones o usuario se realiza mediante enlaces de comunicación inalámbrica, aunque también se puede lograr por otros medios físicos, como ser: por telefónico, redes de computadoras, fibra óptica, o buses de campo. Los sistemas de telemetría admiten la transmisión de datos o información como así también de instrucciones para el control de dispositivos finales; el sistema permite la recepción de las instrucciones y de los datos necesarios para operar desde un centro de control o estación base.

En la figura 1 se muestra los componentes básicos de un sistema de telemetría inalámbrico. En el sitio remoto se encuentra un sensor o grupo de sensores que suelen ser la fuente de datos; las mediciones (magnitudes físicas) que realizan los sensores son convertidas en datos digitales mediante un dispositivo electrónico, conocido en la industria como RTU (Unidad de Terminal Remota). La RTU está conectada a un transmisor de datos inalámbrico que convierte los datos digitales en una señal que se

transmitirse por el aire. La señal es recibida por el receptor alojado en la estación base y luego es procesada por el dispositivo de recuperación y recolección de datos.

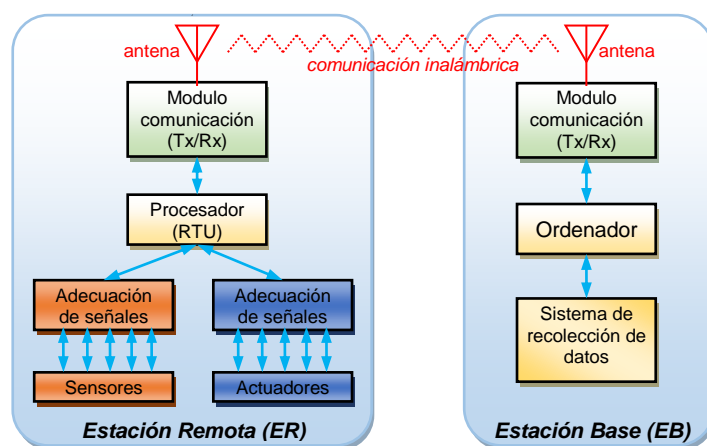


Fig. 1. Esquema de un sistema de telemetría.

En una aplicación típica la estación base (EB) solicita los datos almacenados en los sitios remotos; para ello la EB transmite una petición a la estación remota (ER) solicitando que envíe sus datos. La EB se coloca en un modo de recepción y espera la transmisión desde la ER. Después de que la ER envía todos sus datos, ésta regresa al modo de recepción esperando a que lleguen nuevas peticiones desde la EB. Una vez que la EB ha recibido la información de la ER, puede enviar instrucciones adicionales a ese sitio (por ejemplo, una acción de control para accionar un dispositivo) o continuar el ciclo de peticiones a otros sitios remotos. Este proceso de exploración continúa hasta que todos los nodos remotos hayan enviado sus datos. La estructura de la red comentada anteriormente se conoce como punto-multipunto.

1.2 Telemetría Agrícola

La telemetría es una técnica moderna que permite la recopilación de datos a grandes distancias de manera que se logra obtener información precisa sobre un elemento remoto. Hoy en día, debido a los grandes avances que se han logrado en el desarrollo de nuevos dispositivos electrónicos y de comunicación, la telemetría es una herramienta muy difundida en el ámbito aeroespacial e industrial, porque permite la recolección de información de manera inalámbrica, lo que posibilita llevar adelante acciones de manejo de instrumentos, equipamiento, o procesos de forma remota.

Una industria que recientemente ha incorporado estas tecnologías en sus procesos es la agricultura moderna. La agricultura está viviendo un proceso de modernización, donde se busca uniformizar el rendimiento de una explotación agrícola (lote, parcela,

finca, etc.) mediante el análisis sobre la variabilidad espacial y temporal de lo que ocurre en cada campaña (agricultura de precisión); todo ello acompañado de objetivos tales como: alcanzar alta eficiencia en el uso de los recursos empleados, mejorar la rentabilidad, lograr la sustentabilidad del negocio, cumplir con estándares y reglamentaciones internacionales para acceder a nuevos mercados, entre otros.

Es necesario destacar la importancia de contar con sistemas de telemetría en la agricultura, los cuales se denominan “Telemetría Agrícola”, considerando que es una herramienta innovadora para la gestión de cualquier explotación agrícola. Esta técnica es usada para obtener datos de campo, como ser condiciones en el suelo, los cultivos, el clima, maquinaria, personal, etc.. Como se indicó en el apartado anterior, ésta técnica requiere de la instalación de dispositivos electrónicos equipados con sensores y equipos de comunicación que midan las variables y/o parámetros de interés; de esta manera se puede conocer el estado de humedad del suelo, condiciones de los cultivos, condiciones climáticas que puedan ser desfavorables, saber el posicionamiento de las máquinas en el lote y sus rendimientos, entre otros muchas más. Toda la información se transmite a la estación base, donde los ordenadores almacenan, analizan e interpretan los datos (mediante softwares específicos) a fin de generar información clasificada que administran los productores mediante aplicaciones tipo web o de teléfono móvil.

Con estas herramientas los productores pueden centralizar toda la información en una oficina de monitoreo y, a su vez, recorrer los campos o lotes con dispositivos portátiles (como tablets, notebooks o teléfonos móviles) para conocer potenciales problemas referidos a contingencias climáticas, condiciones de humedad en los suelos, zonas donde se detectan enfermedades o problemas en los cultivos, estado de los equipos de riego, situación de la maquinaria, ubicación del personal, entre otros; todo ello con información actualizada en tiempo real.

1.3 Riego de precisión

El concepto de riego de precisión (RP) está en su etapa inicial, en la bibliografía ha adoptado múltiples formas, mencionándose como: “riego prescriptivo”, “riego a demanda”, “riego sitio específico”, “riego de tasa variable”, “riego diferencial de precisión”, “riego inteligente”, “riego diferenciado”, entre otras más.

En [1] los autores presentan una revisión bibliográfica en relación al “Riego de Precisión”, en la que se enfatizan diferentes definiciones al término de RP, tales como: “El riego de precisión consiste en la aplicación exacta y precisa de agua para satisfacer los requerimientos específicos de plantas individuales o de unidades de manejo, y minimizar el impacto ambiental adverso” [2]. “El manejo del riego (en profundidad y en tiempo) basado en las necesidades de los cultivos en una determinada sub-área de un campo como zonas de manejo” [3].

Según se plantean en estas definiciones, el RP no responde a una determinada tecnología, sino que es un nuevo enfoque sobre el manejo del riego pensado desde la perspectiva del control y monitorización de los sistemas de riego, donde el rendimiento del cultivo se optimiza a través de la recolección sistemática de datos; el tratamien-

to de la información sobre el cultivo, el clima y el campo; la gestión eficiente del riego y las tecnologías para la aplicación de riego y fertirriego; la detección de problemas en línea; y de técnicas modernas de control automático y gestión a distancia (telemetría).

1.4 Problemática local

La integración y el uso de nuevas herramientas resultan propicios para el desarrollo de una nueva agricultura sustentable en la provincia de San Juan y en la región cordillerana central de Argentina (bajo los conceptos ya planteados en telemetría, agricultura de precisión y riego de precisión) considerando especialmente la alta dependencia y demanda del riego en los emprendimientos agrícolas que allí se desarrollan.

Los productores agrícolas se ven forzados a dejar los sistemas de riego tradicionales (por inundación o por surco) reemplazándolos por la incorporación de modernos sistemas de riego presurizado tales como: el riego por goteo, la micro-aspersión, o los sistemas sub-superficiales. Del trabajo de extensión a campo realizado con los productores locales se observa que la mayoría de los sistemas de riego presurizado instalados son controlados manualmente. En este sentido, la programación del riego se efectúa según la experiencia del agricultor, estimando las necesidades en base a datos de evapotranspiración de referencia (ET₀) históricos, o en el mejor de los casos a través del cálculo del consumo actual (ET₀ semanal o quincenal) sobre datos tomados desde alguna estación agrometeorológica cercana. La inspección del equipo de riego para determinar el rendimiento del sistema también es manual y discontinua en el tiempo; por tanto, una falla o inconveniente demora varios días en detectarse y resolverse, según sea el problema, tiempos entre operaciones de riego, y personal disponible [4].

2 Sistema “Telemetría Agrícola”

En atención a los problemas mencionados y a la demanda tecnológica del sector agrícola, el presente trabajo se ha formulado con la intención de lograr el acercamiento del productor local hacia nuevas herramientas tecnológicas que permitan la medición (entre otras variables) de la humedad de suelo en cada sector unitario de riego, la monitorización sobre el funcionamiento de los equipos de riego presurizados, y el registro de las variables climáticas para lograr el riego de precisión en sus explotaciones agrícolas; es decir, efectuar el adecuado manejo de un equipo de riego por goteo, programar los turnos en base a la demanda hídrica de los cultivos, gestionar de forma eficiente el uso del agua y la aplicación de fertilizantes, entre otros más.

Para ello, se ha diseñado un sistema de Telemetría Agrícola (figura 2) en el que se integran diferentes dispositivos de electrónicos, comunicación, robótica e informática a fin de lograr la monitorización y supervisión de variables de interés en el campo y de los equipos de riego. El sistema de telemetría se ha subdividido en seis componentes, los cuales se detallan a continuación.

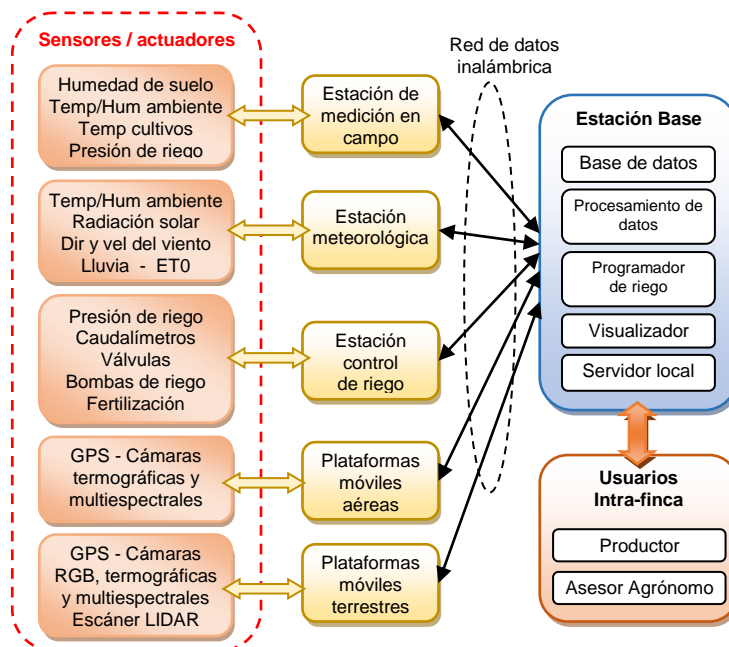


Fig. 2. Esquema del sistema de Telemetría Agrícola implementado en campo.

2.1 Estaciones de medición estáticas

Comprende un subsistema o conjunto de estaciones de medición instaladas en campo, permaneciendo fijas en un punto dentro de la zona cultivada. Las estaciones realizan la medición y registro sitio-específica de una serie de variables para lo cual se requiere determinar puntos representativos dentro de la zona de interés a fin de conocer lo que allí sucede. Hay tres tipos de estaciones de medición estáticas:

i) Estación de medición en campo. La estación está equipada con una serie de sensores que permiten medir las variables de interés dentro de la zona cultivada (figura 3.a). Se cuenta con sensores de humedad de suelo (suele instalarse tres sensores a diferentes profundidades), temperatura y conductividad del suelo, presión matricial en el suelo, temperatura y humedad ambiente, presión en el lateral de riego. Se recomienda al menos instalar una estación de medición de campo por parcela, cuadro o sector de riego. El desarrollo de la estación de medición está basado en el uso de microcontroladores de bajo consumo y con sistema de alimentación por energía solar, la misma ha sido diseñada especialmente para ser integrada al sistema de Telemetría Agrícola.

ii) Estación meteorológica. La estación está equipada con una serie de sensores que permiten medir las variables climáticas (figura 3.b) tales como: humedad y temperatura ambiente, radiación solar, dirección y velocidad del viento, precipitaciones, estimación de la ET0, entre otras más. Se recomienda la instalación de al menos una estación meteorológica dentro del predio. La estación integrada es una Vantage ProII de Davis.

iii) *Estación de control y monitoreo de riego.* La estación está equipada con una serie de sensores para conocer el caudal de agua aportada y de la presión en los sectores de riego (figura 3.c), lo cual permite conocer el estado de funcionamiento de los equipos de riego presurizados; la estación generalmente se ubica en el cabezal de riego o en sala de control del sistema de riego. A diferencia de las otras dos estaciones, en ésta se puede realizar acciones de control sobre el sistema de riego (figura 3.d); de esta manera se logra automatizar las operaciones de riego mediante el accionamiento de las electroválvulas destinadas a cada sector de riego, las aplicaciones de inyección de fertilizante, y las tareas de retro-lavado y limpieza de los filtros. La estación de medición y el controlador de riego (basado en un PLC) han sido diseñados especialmente para ser integrada al sistema de Telemetría Agrícola.

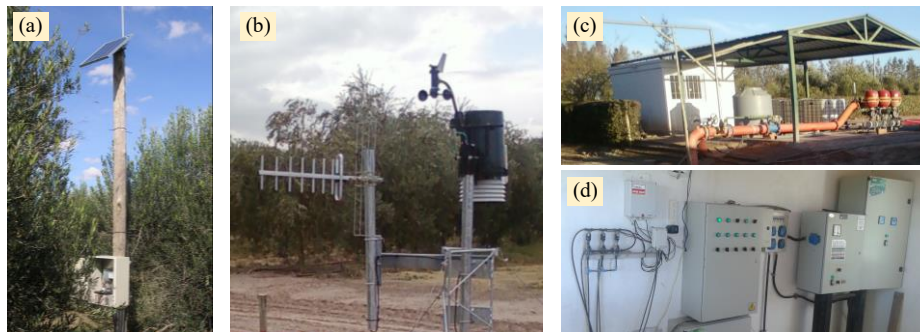


Fig. 3. Conjunto de estaciones en campo. (a) Estación de medición de variables dentro de la zona cultivada. (b) Estación meteorológica dentro del predio. (c) Cabezal del sistema de riego presurizado. (d) Unidad de control remoto del sistema de riego por goteo.

2.2 Estaciones de medición móviles

Las estaciones móviles están diseñadas en orden a complementar la información que se obtiene desde las estaciones de medición fijas. El diseño de las estaciones móviles se basa en el uso de plataformas móviles aéreas y terrestres, con ello se logra ampliar la zona de medición, como así también el rango de parámetros y variables medidas dentro del cultivar. Se utilizan dos plataformas, según se detalla:

i) *Cuatriciclo robotizado.* Consiste en un cuatriciclo comercial 250cc que ha sido automatizado en las acciones de dirección, aceleración y frenado para el uso agrícola [5] (figura 3.a); lográndose desarrollar una plataforma terrestre que recorre la zona cultivada de manera autónoma [6]. El control de navegación se basa en el uso de un sistema GPS diferencial y de visión estéreo. En el cuatriciclo se han montado dos sistemas de escaneo laser (LIDAR), una cámara termográfica, y una cámara multispectral; todo el instrumental permite obtener información de los cultivos, en particular de los laterales del cultivo, con lo cual se puede analizar la estructura foliar, estado vegetativo, estrés hídrico, enfermedades, daños por contingencias climáticas, entre otros.

ii) *Cuattrorotor autónomo:* Consiste en el uso de una plataforma aérea del tipo cuattrorotor, modelo Solo, de la firma 3DR Robotics (figura 3.b). El cuattrorotor está

equipado con un autopiloto que es configurado con una misión de vuelo la cual se establece en función de la zona cultivada a analizar y de la altitud requerida. Al cuatrirrotor se montan las cámaras termográfica y multiespectral que se utilizan para obtener las imágenes desde el plano superior al cultivo [7]. Del procesamiento de las imágenes se determinan las zonas con problemas de riego o enfermedades. Un parámetro de gran interés es conocer y determinar las zonas donde el cultivo se encuentra bajo estrés hídrico a fin de corregir el programa de riego y/o de verificar el estado de funcionamiento del sistema de riego en dicha zona [8].

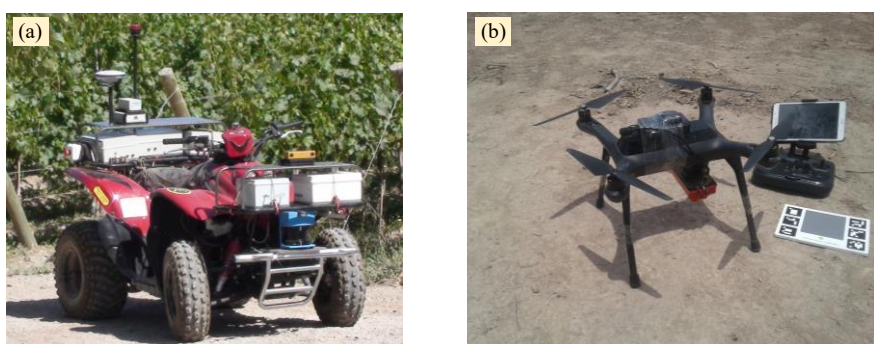


Fig. 3. Estaciones móviles. (a) Cuatriciclo robotizado. (b) Cuatrirrotor autónomo.

Desde el sistema de telemetría se logra observar el estado de funcionamiento y el recorrido que realizan las dos plataformas móviles dentro del predio; los análisis de las fotografías obtenidas con las cámaras termográficas y multiespectrales, y los datos del escáner laser se efectúan fuera de línea; una vez que la plataforma llega a destino de descarga toda la información recolectada al servidor local para su procesamiento y análisis.

2.3 Sistema de monitorización y control de riego

Este subsistema está conformado por una serie de programas y algoritmos informáticos destinados a monitorizar, evaluar y establecer las operaciones de riego que se deben ejecutar en cada parcela. El instante de inicio y la duración de cada turno de riego son definidos por el usuario; el sistema tiene la capacidad de informar la demanda hídrica de los cultivos a partir del último riego, la cual se calcula en base a la estimación de la ET_0 [9] y según la variabilidad de humedad en el suelo; esta información (figura 4.a) es importante en orden a realizar riegos de precisión ya que el usuario conoce con exactitud la demanda de agua y podrá reponer con el riego lo necesario para cubrir el déficit o pérdida. El programa también permite el ordenamiento de los turnos de riego y la programación de cada operación (figura 4.b) con el objetivo de automatizar el control del sistema de riego y la aplicación adecuada de fertilizantes. Un algoritmo supervisor analiza permanentemente el funcionamiento del sistema de riego a fin de detectar fallos o problemas; para lo cual el algoritmo hace una fusión de

la información de: los niveles de presión y caudales de agua en las cañerías principales y secundarias, del estado de las válvulas y bombas de riego, y de la variabilidad de la humedad en el suelo a diferentes profundidades.

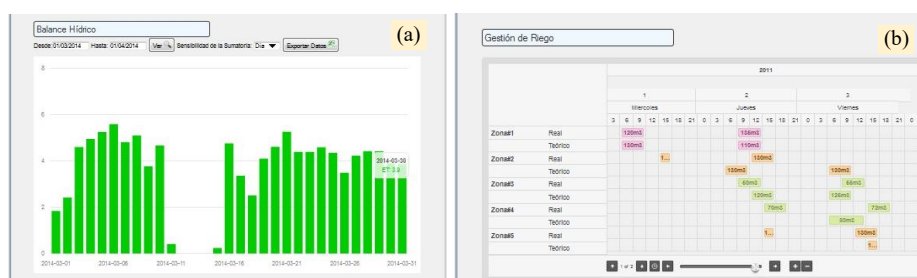


Fig. 4. Sistema de monitorización y control de riego. (a) Registros diarios de la estimación de ET0. (b) Plantilla de programación y ordenamiento de las operaciones de riego

2.4 Sistema de gestión de datos

Este subsistema cumple una función fundamental en el sistema de Telemetría Agrícola, ya que es el encargado de coordinar cada nodo dentro de la red de datos para así lograr la transmisión de la información entre la estación base y cada estación fija o móvil dentro del predio: También el subsistema se encarga de analizar los datos a fin de generar eventos que permiten gestionar de forma óptima la transacción y lograr el mantenimiento automatizado del sistema de datos. El subsistema se conforma de cuatro unidades, siendo estas:

i) Módulos de comunicación inalámbricos. Son módulos de comunicación que operan en frecuencias libres (470Mhz), de bajo consumo, y que permiten enlaces inalámbricos de distancia máxima de 3.000m. Los módulos se ubican en cada estación a fin de lograr la comunicación inalámbrica y transacción de datos entre la estación base y los concentradores de datos.

ii) Módulo coordinador y de transacción de datos. Es un programa informático que se ejecuta en la estación base y es el encargado de administrar los nodos de la red inalámbrica y realiza las peticiones para lograr la transacción de los datos desde los nodos a la estación base. La información es organizada y almacenada en un sistema de gestión de bases de datos relacional (MySQL)

iii) Servidor de eventos. Es un programa informático que trabaja en conjunto con el módulo coordinador y es el encargado de analizar el funcionamiento de las estaciones de campo y los sensores montados allí. El servidor optimiza la transacción de datos en base a los datos contenidos en cada estación y determina ciertos eventos en base al análisis continuo de la variación de las mediciones a fin de identificar fallos en los sensores o en las estaciones.

iv) Servidor de datos. Es un programa informático que trabaja en conjunto con el módulo coordinador y de transacción de datos a fin de mantener ordenada y accesible

toda la información del sistema de telemetría agrícola para que sea consumida por otros módulos del sistema; en particular funciona como driver entre la base de datos y los programas de procesamiento de la información que se detallaran posteriormente.

2.5 Sistema de procesamiento de la información

El subsistema contiene todos los programas y algoritmos requeridos para el procesamiento de la información que se obtiene desde las estaciones de medición. Entre los algoritmos se encuentran: estimación de parámetros del sistema de riego y detección de fallas en tiempo real (figura 5.a); módulo de programación de turnos de riego, modelos de estimación de evapotranspiración de referencia ET_0 y cálculo acumulativo de la demanda hídrica de los cultivos (diario, mensual y anual); algoritmo de análisis de balance hídrico en el suelo; algoritmo de pronóstico sobre la ocurrencia de heladas y viento Zonda; y algoritmos de fusión sensorial para la generación de índices sobre el estado del cultivo (estrés hídrico, enfermedades, NDVI) (figura 5.b).

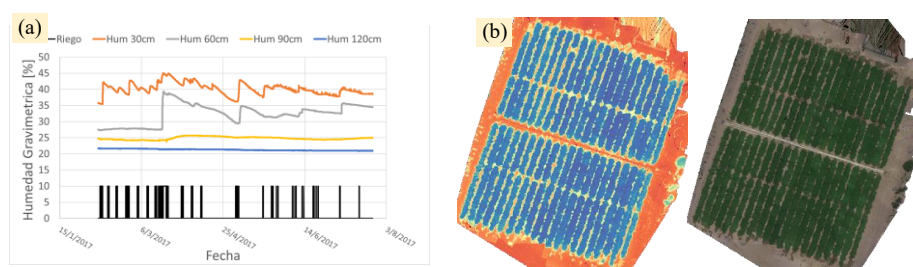


Fig. 5. Sistema de procesamiento de la información. (a) Registro temporal de la evolución de la humedad en el suelo y riego aplicado en una parcela. (b) Análisis de un cultivo utilizando imágenes multiespectrales (NDVI y RGB).

2.6 Sistema de interface al usuario

Consiste de una interfase de visualización que permita a los productores acceder a toda la información del sistema de Telemetría Agrícola de forma sencilla a fin de interpretar lo sucedido en el cultivar o equipo de riego y tomar decisiones certeras sobre la programación del riego. El sistema de visualización está montado en un servidor local (alojado en el predio o finca); los usuarios acceden a la información mediante una aplicación del tipo web, estructurada en siete pestañas (figura 6).

El sistema de telemetría puede ser consultado desde el exterior del predio o finca; como ampliación al sistema presentado en la figura 2, se ha desarrollado una aplicación externa que, mediante conexión por internet, copia toda la información del servidor local en un servidor en la nube (servidor web). Dentro del servidor web se ejecutan diferentes programas que permiten a usuarios externos a la finca consultar la información de manera remota mediante una conexión a internet (figura 7). Los usuarios deben estar registrados en la plataforma de Telemetría Agrícola y solo acceden a in-

formación pública (por ejemplo, pronóstico de heladas y viento Zonda, nivel de ET0, condiciones climáticas, entre otros) coma así también pueden solicitar el envío de avisos ante determinados eventos climáticos (registro de temperaturas mínimas, lluvias, vientos, etc.). El sistema externo le brinda mayor funcionalidad al sistema de telemetría en orden a que los productores pueden ser asesorados (sobre la gestión eficiente del riego, temas de agronomía y/o problemas por contingencias climáticas) de manera rápida por otros profesionales o colegas sin la necesidad de concurrir a la zona cultivada, basándose en la información registrada.

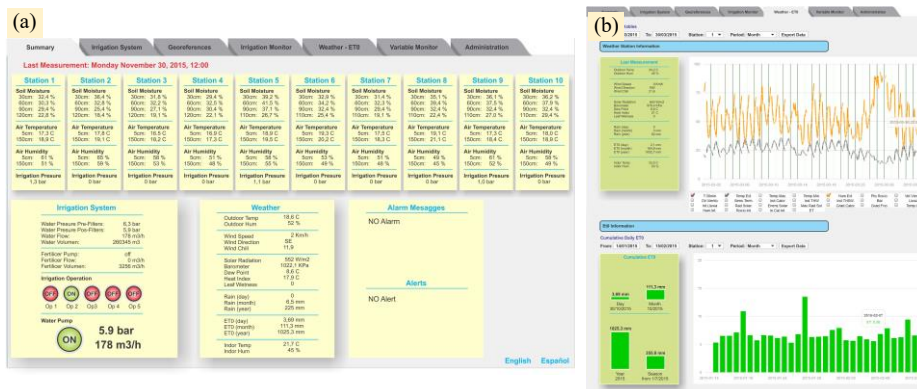


Fig. 6. Sistema de interfase al usuario. (a) Pantalla de resumen de variables y parámetros en la finca. (b) Pantalla de visualización de las variables climáticas y registros diarios de la ET0.

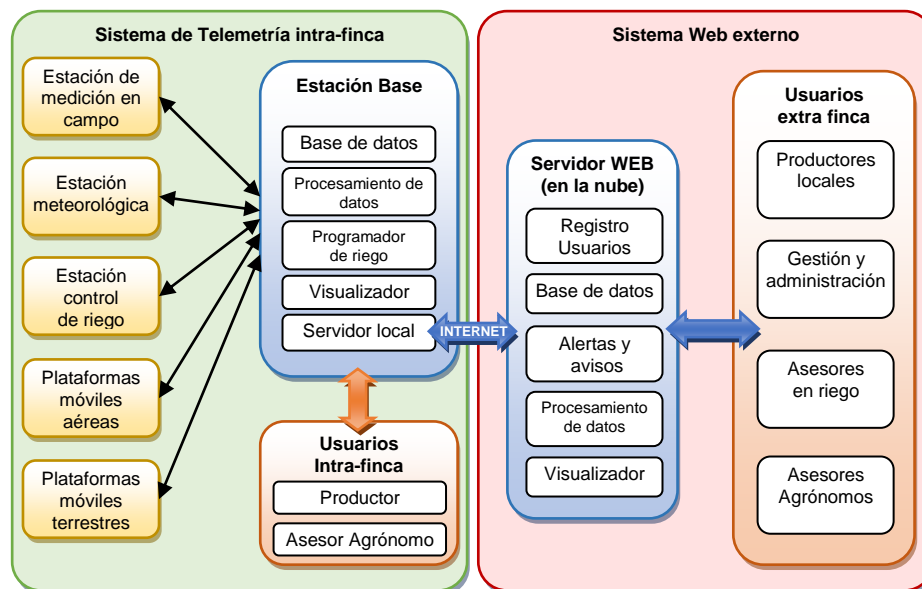


Fig. 7. Esquema del sistema de Telemetría Agrícola (intra-finca) en combinación al sistema web externo que permite el acceso via internet a la información de la finca o predio.

3 Primera experiencia a campo y resultados preliminares.

El sistema de Telemetría Agrícola aún se encuentra en desarrollo; se han superado las etapas de diseño de hardware (que involucra la red de datos, estaciones de campo, instrumental de las estaciones móviles, entre otros), aún resta avanzar sobre el diseño de las aplicaciones de software tales como el entorno de visualización de variables y monitoreo sobre el funcionamiento de los equipos de riego, como así también en los algoritmos de pronóstico y estimación de parámetros.

La primera experiencia piloto se ha realizado en una parcela experimental de tomates con destino a industria (figura 8.d); situada dentro de la estación experimental de INTA San Juan, localidad de Pocito. La implantación de los plantines se efectuó el día 18/09/2017 y la cosecha se realizó el día 15/01/2018 (90 días de duración). La parcela cultivada se dividió en cuatro bloques de dimensiones iguales. Se instaló un equipo de riego por goteo sectorizado en tres operaciones de riego. El ensayo de campo consistió en realizar tres tratamientos de riego diferenciados a fin de evaluar la productividad del agua para distintos regímenes de riego durante la última fase de desarrollo del tomate [10], esto fue a partir del día 12/1/2017 hasta la cosecha. Los tratamientos de riego se definieron como T0: Tratamiento testigo (se aporta el 100% de demanda); T1: tratamiento con riego deficitario controlado 1 (se aporta el 75% de demanda); y T2: tratamiento con riego deficitario controlado 2 (se aporta el 50% de demanda); en la figura 8.b se presenta la cantidad de agua que se suministró en cada tratamiento. En un bloque del ensayo se instalaron tres estaciones de medición en campo (figura 8.c); una por cada operación de riego, a fin de monitorizar cada tratamiento de riego.

El sistema de Telemetría Agrícola registró y presentó de manera correcta los registros instantáneos e históricos relacionados con el manejo del equipo de riego por goteo, como así también el registro de la ejecución de las operaciones de riego, de la cantidad de agua aplicada a cada tratamiento, y de la humedad del suelo a 20cm, 40cm y 60cm para tres zonas (figura 8.a). Al tratarse de un ensayo donde el riego se aplicó día a día según la demanda hídrica del cultivo, fue muy importante contar con el registro de la ET0 y la cantidad de agua aportada, ya que con estos valores se evaluó el balance hídrico del suelo y se calcularon las próximas aplicaciones de riego.

En relación a la interfase de usuario desarrollada cabe destacar que los principales usuarios (investigadores de INTA San Juan) accedieron fácilmente a la información del ensayo tanto de manera local en el edificio de INTA EEA San Juan como desde cualquier lugar externo a través de la conexión de internet. Al ser una aplicación web multiusuario, el sistema ha permitido compartir la información (entre los distintos investigadores y productores) que en el transcurso del ensayo se fueron registrando sobre el desarrollo del cultivar y la gestión del riego; la participación de usuarios externos, como lo fueron los productores locales y referentes de la industria, fue muy positiva ya que dieron su opinión sobre el manejo del cultivar y sugerencias en el manejo del riego, de esta manera se conformó un grupo de opinión en línea.

En cuanto a la gestión del equipo de riego, el sistema de control mostró un alto grado de robustez. Cuando se produjeron fallas en el sistema, los mensajes de alerta se registraron correctamente y fueron informados a los usuarios. Los instantes de inicio y

período de duración de las operaciones de riego se cumplieron según lo establecido por los usuarios, por lo cual se logró la aplica precisa del riego a demanda.

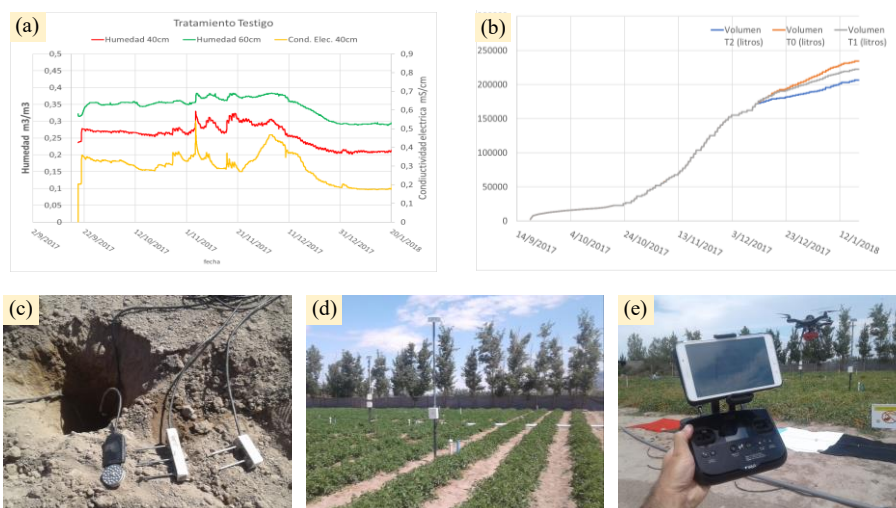


Fig. 8. Implementación del sistema de Telemetría Agrícola para gestionar tres tratamientos de riego en una parcela de tomates. (a) Evolución de variables en el suelo. (b) Agua aportada en cada tratamiento. (c) Sensores instalados en las estaciones de medición. (d) Parcela experimental de tomate (900m²). (e) Uso de cuatrirrotor para adquisición de imágenes multispectrales.

4. CONCLUSIONES

Se remarca la importancia de poner en marcha nuevas herramientas que permitan gestionar los sistemas de riego de manera precisa en una finca o campo; una propuesta es integrar dentro de los procesos agrícolas las tecnologías existentes en telemetría para que los productores logren monitorizar y gestionar remotamente los procesos.

El sistema de Telemetría Agrícola propuesto brinda información objetiva y organizada sobre el nivel de humedad del suelo, las variables climáticas, el estado de funcionamiento de los equipos de riego, y la ejecución de las operaciones de riego. Las decisiones sobre la gestión del sistema de riego y el guiado de los cultivos se basan en dicha información y sobre parámetros o indicadores que el productor advierte que deben corregirse o adecuarse; así las decisiones son acertadas y bajo margen de error.

En la primera experiencia se logró interactuar con investigadores de INTA San Juan y productores de tomate locales. Inicialmente se destacó el desconocimiento de las tecnologías disponibles para la monitorización y gestión; luego se confrontaron las opiniones entre los conocimientos prácticos de los productores y las mediciones que arrojaba el sistema, para luego discutir las situaciones presentes y acordar las nuevas estrategias sobre el riego. Esta experiencia fue positiva, donde los productores locales

tuvieron un acercamiento a las tecnologías disponibles y con el uso identificaron las ventajas de tomar decisiones según la información recolectada por el sistema.

Si bien no se puede generalizarse el porcentaje de ahorro en los recursos, es de notarse que el sistema de Telemetría Agrícola da al productor la capacidad de gestionar la explotación agrícola con objetivos tales como aumentar la productividad del uso del agua, expandir la zona cultivada, reducir consumo de energía eléctrica, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo ha sido posible al financiamiento del proyecto PIO N°84, “TELEMETRÍA AGRÍCOLA, una herramienta tecnológica para la gestión eficiente del riego, supervisión de cultivos, y generación de alertas” cofinanciado por CONICET y el gobierno de San Juan y con el apoyo brindado por INTA EEA San Juan. Un especial agradecimiento a Ing. Alfredo Olguín, Tec. Hid. Mario Liota, Ing. Germán Babelis, Lic Biol. Daniela Pacheco, Dr. Ing. Agr. Pierluigi Pierantozzi, William Varela, y Lucas Iván Vera; quienes llevaron adelante con esfuerzo y dedicación las tareas requeridas en el ensayo de riego deficitario controlado en tomate.

Referencias

1. Smith R. J., Baillie J. N., McCarthy A. C., Raine S. R., Baillie C. P. : Review of precision irrigation technologies and their application. National Centre for Engineering in Agriculture. University of Southern Queensland. Toowoomba (2010)
2. Raine S. R., Meyer W. S., Rassam D. W., Hutson J. L., Cook F. J.: Soil-water and solute movement under precision irrigation: Knowledge gaps for managing sustainable root zones. *Irrigation Sci.*, 26, pp.91-100. Ed. Springer Verlag. (2007)
3. King B. A., Stark J. C., Wall R. W.: Comparison of site-specific and conventional uniform irrigation management for potatoes. *Applied Eng. in Agriculture* 22(5): 677-688. (2006)
4. Capraro F., Tosetti S., Vita Serman F.: Supervisory control and data acquisition software for drip irrigation control in olive groves. An experience in an arid region of Argentina. *Acta Hort. (ISHS)* 1057:423-429. DOI: 10.17660/ActaHortic.2014.1057.53 (2014)
5. Rossomando F. G., Soria C., Carelli R.: Autonomous Mobile Robot Navigation using RBF Neural Compensator. *Control Engineering Practice*, 19, 215–222,doi:10.1016/j.conengprac.2010.11.011,ISSN 0967-0661. (2011)
6. D. Herrera, S. Tosetti and R. Carelli: Dynamic Modeling and Identification of an Agriculture Autonomous Vehicle. *IEEE Latin America Transactions*,vol.14, no.6, pp.2631-2637, (2016)
7. Zhang C. y J. M. Kovacs: The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *An Int Jour on Advances in Precision Agriculture*, pp.693-712. (2012)
8. Gonzalez-Dugo V., Goldhamer D., Zarco-Tejada P.J., Fereres, E.: Improving the precision of irrigation in a pistachio farm using an unmanned airborne thermal system, *Irrig Sci* 33:43–52; DOI: 10.1007/s00271-014-0447-z (2015)
9. Doorenbos J. y Pruitt W. O.: Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 24, Roma, Italia. (1976)
10. Fortes Gallego R., Prieto Losada M., Gonzalez García J. A., Millán S., Campillo Torres C.: Evaluación del efecto del estrés hídrico en las diferentes fases de cultivo de Tomate sobre la calidad y la producción. VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas, Madrid. (2013)