

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/228549078>

Sistema de monitoreo continuo de la humedad en suelo para el control de riego en un olivar (*Olea europaea* L.) empleando LabVIEW

Article · September 2008

CITATIONS

4

READS

6,961

6 authors, including:



Flavio Capraro

National Scientific and Technical Research Council

34 PUBLICATIONS 254 CITATIONS

SEE PROFILE



Santiago Tosetti

National University of San Juan

38 PUBLICATIONS 214 CITATIONS

SEE PROFILE



Facundo Vita Serman

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

19 PUBLICATIONS 154 CITATIONS

SEE PROFILE



Hector D. Patiño

National University of San Juan

84 PUBLICATIONS 1,072 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Determinación de umbrales de riego con sensor de contenido de agua en el follaje del cultivo [View project](#)



Irrigation precision [View project](#)

Sistema de monitoreo continuo de la humedad en suelo para el control de riego en un olivar (*Olea europaea* L.) empleando LabVIEW

Flavio Capraro*, Santiago Tosetti*, Facundo Vita, Daniel Patiño*, Carlos Schugurensky*, Rogelio Fullana***

**Instituto de Automática (INAUT) - Universidad Nacional de San Juan
Av. San Martín 1109 (oeste) (CP: 5400). San Juan. ARGENTINA.*

*** Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) - EEA San Juan
Ing. Marcos Zalazar (Calle 11) y Vidart. Pocito. San Juan. ARGENTINA.*

Resumen

*En la actualidad, la necesidad de reducir el consumo hídrico se plantea como un tema de gran importancia, con el objetivo de superar las limitaciones debido a la falta de este recurso. En este sentido, el monitoreo de la humedad en el suelo y la eficiente programación del riego son acciones que los agricultores deben poner en práctica. Con la idea de abordar esta problemática y brindar una solución tecnológica, en este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de un programa computacional que permite efectuar el monitoreo continuo de la humedad en el suelo agrícola y el control de un sistema de riego por goteo empleado para irrigar un olivar (*Olea europea* L.). El programa ha sido realizado en el entorno de desarrollo visual LabVIEW. El mismo realiza la medición de humedad del suelo desde varios sensores (tipo capacitivo) alojados en la zona radicular del cultivo y, abriendo y cerrando las válvulas de riego, aplica las dosis necesarias de agua para mantener la humedad dentro de los niveles fijados. La implementación en campo del sistema se ha efectuado en dos olivares, ubicados en diferentes departamentos de la provincia de San Juan, con el objetivo de evaluar dos experimentos. Experimento 1: el sistema tiene por objetivo mantener la humedad constante en un determinado nivel, en éste se ensayaron dos tratamientos de riego (T1 a capacidad de campo y T2 en restricción hídrica). Experimento 2: el sistema debe mantener la humedad dentro de dos límites y evitar la precolación de agua, esto permitirá determinar los requerimientos hídricos del olivo en la región.*

Palabras Claves

Humedad del suelo, control de riego automático, LabVIEW, sensor de humedad, ahorro de agua.

I- Introducción

En regiones cultivadas bajo condiciones de clima árido y semiárido, como sucede en la provincia de San Juan, donde el clima se caracteriza por una gran demanda hídrica de la atmósfera y un bajo nivel de precipitación anual (aproximadamente 98mm) [1], la utilización de agua para riego es un factor importante en el desarrollo de cualquier cultivo. Es por ello que el riego artificial, particularmente el riego por goteo, es visto como un importante recurso tecnológico a la hora de suministrar el agua necesaria para que los cultivos se desarrollen y crezcan adecuadamente [2]. En este sentido, es imprescindible que el agua destinada al riego agrícola se utilice con cuidado y sin derroches, considerando que este recurso es escaso en los valles pre-cordilleranos. Por ello, el uso racional de un recurso vital y escaso, como lo es el agua, genera beneficios sociales y económicos de gran importancia.

El desarrollo de nuevas tecnologías referidas al control de riego agrícola, que sean

apropiadas para realizar la gestión eficiente de suministro de agua, se presentan hoy en día como herramientas estratégicas altamente necesarias para superar las limitaciones que surgen de la demanda creciente de agua y/o por falta de la misma. El adecuado control del sistema de riego no solo permite aumentar la eficiencia del uso del agua reduciendo o eliminando las pérdidas por lixiviación, escorrentía u otros, sino que también, consecuentemente, hacer un mejor manejo y aprovechamiento de este recurso. Por ello, será necesario conocer el contenido del agua en el suelo de forma continua y en tiempo real, a fin de programar en línea los periodos y dosis de riego necesarios para cubrir el consumo hídrico real del cultivo [3],[4].

Haciendo un breve análisis del mercado informático en la Argentina, referido particularmente al monitoreo y control de los sistemas de riego, se aprecia que no existe, al menos comercialmente, un software dedicado a ello. Internacionalmente hay empresas israelíes, australinas y españolas que han desarrollado sistemas de adquisición de datos y control supervisorio, conocidos como sistemas SCADA (del ingles Supervisory Control And Data Adquisition), pero estos sistemas presentan la desventaja de ser cerrados (llave en mano), de elevados costos, extremada complejidad y difícil implementación. Debido a ello, es inusual observar en la Argentina que los sistemas de riegos sean controlados en línea y menos aún monitoreados continuamente [4] por un programa informático.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un programa computacional (software) en entorno visual dedicado a medir y monitorear continuamente el nivel de humedad, en determinadas zonas de interés y de manera independiente, a fin de realizar el adecuado control del sistema de riego, en línea y de forma automática. Así mismo, el software presenta las ventajas de ser configurable, de bajo costo, fácil y rápida implementación, y de origen nacional. Según plantean varios autores [3] - [6], la medición continua de la humedad del suelo y el control automático del sistema de riego en base a estas mediciones, conocido como control realimentado [7], permite: mantener el contenido de agua en el suelo requerido por los cultivos dentro de los valores óptimos para su desarrollo, incrementar aún mas el ahorro de agua de los sistemas de riego presurizados, y reducir los costos energéticos referidos a la extracción y bombeo del agua de riego. Todas estas características mejoran sustancialmente las propiedades y características del producto final, y aumentan el valor agregado de la producción.

Refiriéndose a la agricultura nacional, en los últimos años se ha producido un incremento considerable en las superficies cultivadas con olivos. Este crecimiento ha sido acentuado en la provincia de San Juan donde los montes de olivos superan las 15.000 has, constituyéndose en el segundo cultivo luego de la vid. De forma distinta a los olivares tradicionales, este incremento se ha producido con plantaciones que utilizan tecnologías de punta, como alta densidad de plantación, material genético seleccionado, riego presurizado y técnicas de manejo avanzadas en poda, control de malezas, fertirrigación y cosecha. Debido a la gran atención que se ha prestado a este cultivo y el crecimiento productivo que conlleva, se presenta la implementación en campo del sistema de monitoreo de humedad y control de riego en dos olivares, situados en diferentes puntos de la provincia de San Juan.

II- El riego agrícola y los cultivos

En [8] se define *el riego* como “la aplicación artificial de agua a la tierra, con el fin de suministrar a las especies vegetales la humedad necesaria para su desarrollo”. En [9] el autor complementa esta definición al considerar que el riego sigue los siguientes objetivos:

(i) compensar deficiencias de humedad en el suelo, (ii) mejorar las condiciones ambientales del suelo y el cultivo y (iii) aplicar nutrientes y medios protectores. Sin embargo, alcanza su verdadera importancia al momento de efectuar su programación, esto es, decidir *cuándo* y *cuánto* regar. La primera pregunta se refiere a definir el periodo de riego (tiempo entre el inicio de dos riegos consecutivos) y la segunda pregunta implica la dosis (cantidad de agua) a ser aplicada en cada periodo. Se distinguen distintos métodos para efectuar la programación del riego [10], ellos están basados en la medición del: (i) contenido de agua en el suelo, (ii) estado hídrico de la planta o (iii) parámetros climáticos.

El sistema de riego debe ser capaz de aplicar la cantidad justa de agua para cubrir el consumo hídrico del cultivo. En este sentido, el riego puede ser entendido como la aplicación artificial de agua a un perfil de suelo de manera oportuna, con el objetivo de mantener constante el balance hídrico del sistema suelo-planta-atmósfera [2], [11], expresado en la ecuación 1; donde, ET : evapotranspiración, Pp : percolación profunda, Es : escurrimiento superficial, Pe : lluvia efectiva, Ge : ascensión capilar, Nn : riego neto y ΔCh : cambios del contenido hídrico del suelo entre periodos de riego.

$$-ET - Pp - Es + Pe + Ge + Nn \pm \Delta Ch = 0 \quad (1)$$

Según se plantea en [12], el exceso en la cantidad de agua suministrada supone el lavado de fertilizantes, lo que puede acarrear serios problemas medioambientales debido a la contaminación de las aguas subterráneas, como así también pérdidas económicas al emplear mayor cantidad de recursos (fertilizantes, agua, energía). O es común observar la aparición de problemas de encharcamiento y asfixia radicular en suelos pesados; ocasionando daños en aquellos cultivos muy sensibles al exceso de agua. De forma contraria, la aportación de agua inferior a la requerida genera déficit hídrico en el cultivo provocando un estado de estrés hídrico, que en caso de ser permanente o no controlado llevará al deterioro de la planta o reducción de la producción.

A- Contenido de agua en el suelo

El suelo esta conformado por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida ocupa la mayor parte y se compone de partículas minerales y de materia orgánica. El espacio no utilizado por la fase sólida constituye los poros del suelo, que están ocupados por las fases líquida y gaseosa. Al volumen ocupado por los poros del suelo se llama porosidad.

Cuando todos los poros están cubiertos por agua, se dice que el suelo está saturado. Si se permite que el suelo drene libremente, el contenido de agua comienza a descender vaciándose primero los poros más grandes, que serán ocupados por el aire. Si el drenaje continúa libremente llega un momento en que el suelo no pierde más agua, en este estado se dice que el suelo está a capacidad de campo (Cc). Los poros mas pequeños retienen el agua contra la fuerza de gravedad y los poros mayores están en buena parte ocupados por aire. Esta situación es muy favorable para el desarrollo de los cultivos ya que el agua es fácilmente succionada por las raíces y al mismo tiempo el suelo está suficientemente aireado para permitir la respiración radicular [11].

El contenido de agua puede descender por debajo de la Cc como consecuencia de la evaporación y transpiración de las plantas, ha medida que la humedad disminuye se hace mas difícil la absorción de agua por las raíces, hasta que se alcanza un estado determinado como punto de marchites (Pm), que se caracteriza por que las plantas absorben el agua del suelo con dificultad y experimentan marchites irreversible.

Los estados de Cc y Pm tienen un gran significado agronómico ya que representan los valores máximos y mínimos de la humedad del suelo que puede ser utilizada por los cultivos para su desarrollo. La cantidad de agua comprendida entre la Cc y el Pm se define como *agua útil* (Au) o agua total disponible, dada en la ecuación 2.

$$Au = Cc - Pm \quad (2)$$

El agua de riego se almacena en el suelo, que actúa como un depósito, para luego ser usada por las plantas. El contenido de agua en el suelo puede ser expresado como *humedad gravimétrica* (θ_g) o *humedad volumétrica* (θ_v), definidas matemáticamente por las ecuaciones 3 y 4 respectivamente, donde M_{ag} : masa de agua, M_s : masa de suelo, V_{ag} : volumen de agua y V_s : volumen de suelo.

$$\theta_g [\%] = \frac{M_{ag}}{M_s} \cdot 100 \quad (3)$$

$$\theta_v [\%] = \frac{V_{ag}}{V_s} \cdot 100 \quad (4)$$

B- Sensores de humedad del suelo agrícola

Hoy en día, los agricultores están prestando mayor atención en la medición continua del contenido de agua en el suelo, en orden a evaluar las variaciones de humedad que suceden en el mismo y lograr el ajuste adecuado en la programación del riego [14]. Existen distintos instrumentos para realizar esta medición, tensiómetros, sonda de neutrones, bloques porosos, sensores resistivos y sensores capacitivos; siendo éste último uno de los más empleados y de mayor desarrollo tecnológico. La idea principal de esta línea de sensores se basa en medir la constante dieléctrica del suelo como un indicador del estado hídrico [14] - [17]. Esta metodología está siendo recientemente aplicada en un sinnúmero de situaciones y presenta un futuro prometedor frente al desarrollo de otras técnicas de medición [16]-[19].

Bajo esta tecnología, pueden diferenciarse tres métodos que miden directa o indirecta de la constante dieléctrica del suelo, estas son: (i) *Reflectometría en el dominio del tiempo* (TDR), (ii) *Reflectometría en el dominio de la frecuencia* (FDR) y (iii) *Capacitiva*. En inglés, Time Domain Reflectometry, Frequency Domain Reflectometry y Capacitance.

El método *TDR* mide la velocidad de propagación de un pulso electromagnético que viaja a través de una sonda enterrada en el suelo, el principio de funcionamiento se basa en la idea de que la velocidad de una señal electromagnética que pasa a través de un material varía con el dieléctrico del material. De esta forma, el instrumento envía una señal debajo de la sonda de acero, llamada guía de onda alojada en el suelo. La señal llega al final de la sonda y se refleja de vuelta hacia la unidad de control de TDR. El tiempo que demora la señal en regresar varía con la constante dieléctrica del suelo, la cual está relacionada con el contenido de agua del suelo que rodea la sonda. [19]-[21]

El método *FDR*, que es de mayor tecnología comparado al TDR, usa la técnica de transmisión de fallas. Esta técnica utiliza señales de radiofrecuencia (RF), en lugar de pulsos electromagnéticos en corriente continua (DC), proporcionando la capacidad de localizar fallas de RF. El principio de funcionamiento del dispositivo FDR radica en un multivibrador que envía las ondas electromagnéticas de alta frecuencia a lo largo de una

sonda, a continuación, mide la frecuencia de la onda reflejada, la que varía con el contenido de agua en el suelo [18], [19].

En la técnica *Capacitiva* se emplean dos placas de material conductor insertadas en el suelo que utilizan a éste como dieléctrico, formando así un capacitor ideal. Un circuito oscilador de alta frecuencia utiliza a dicho capacitor como elemento, resultando que la frecuencia de oscilación se corresponde con la humedad del suelo. En la ecuación 5 la capacitancia C se relaciona con el dieléctrico K por el área total del electrodo A y el espacio entre las placas s , nótese que la permitividad del espacio libre ε_0 es constante [22]. La relación entre C y la frecuencia F (medida en Mhz) del circuito oscilador depende del diseño físico del sensor capacitivo y esta dada por la ecuación 6, donde L es la inductancia del oscilador; C es la capacitancia del sensor, C_b es la capacitancia base (necesaria para hacer estable al circuito) y C_c la capacidad de colector del circuito oscilador. Esta última puede simplificarse combinando la capacitancia del suelo con las otras capacitancias constantes, resultando la ecuación 7. Por este método, los cambios en el contenido hídrico del suelo son detectados por la frecuencia de operación del circuito oscilador [16]. [23]

$$C = \frac{K \cdot \varepsilon_0 \cdot A}{s} \quad (5)$$

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{L}} \sqrt{\left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{C_c}\right)} \quad (6)$$

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

C- Control del sistema de riego presurizado

Indistintamente de la tecnología de riego presurizado empleada, sea con aspersores, por goteo, etc.; el sistema de riego puede operarse de forma: (i) *manual*, (ii) *temporizada*, (iii) *automática*, o (iv) *inteligente*.

En la operación *manual*, tal como el nombre lo indica, el operario encargado del riego efectúa la apertura y cierre de las válvulas solenoides de riego en forma manual según la experiencia de éste. En la operación *temporizada* se utiliza un temporizador mecánico o electrónico para efectuar la tarea que antes se describía de forma manual. El periodo de riego y la dosis permanecen fijas según la programación del mecanismo temporizado. Actualmente en la mayoría de los sistemas de riegos empleados en los sectores agrícolas se emplea esta técnica de control. En adelante, las metodologías de riego manual junto al riego temporizado serán mencionadas como *riego convencionales*.

El control de riego convencional está basado típicamente sobre predicciones del promedio de uso de agua. La operación de los mismos puede ser formulada sobre una combinación de velocidades de transpiración medidas durante las anteriores temporadas del cultivo, obtenidas bajo condiciones de investigación y con las sensaciones del agricultor o un examen físico del suelo y examinando plantas testigo para ver signos de estrés o de exceso de agua. Esto lleva a regar en base a un promedio en el nivel de humedad en el suelo; como es el caso de aplicar dosis de agua constantes en periodos de tiempo similares. Con frecuencia esto da por resultado que grandes cantidades de agua sean aplicadas a intervalos regulares pero largos, obteniéndose grandes variaciones en el nivel de humedad, pasando del estado de saturación a valores inferiores de capacidad de campo [3]-[5].

En el mercado, puede observarse que muchos fabricantes de controladores de riego temporizado le dan a estos la característica de sistemas automáticos. Es importante aclarar que estos dispositivos son autónomos ya que, una vez programados el periodo y dosis de riego, el sistema de irrigación funcionara sistemáticamente según su programación fija, sin la intervención del operario. Sin embargo estos dispositivos no pueden evaluar las perturbaciones en el sistema, ya que operan a lazo abierto, y por lo tanto son incapaces de modificar la programación en base a los requerimientos del momento; como por ejemplo, en caso de ocurrir una lluvia o días de excesivo viento y calor donde aumenta la ET.

La operación *automática* es referida a aquellos sistemas de control de riego que operan a lazo cerrado. Las acciones de control (apertura o cierre de las válvulas de riego) se ejecutan en orden a alcanzar una referencia determinada por el agrónomo. Estas acciones se calculan en función del error presente entre el valor de referencia y la realimentación de una o más variables del sistema controlado. Es por ello que estos sistemas de lazo cerrado también se conocen como realimentados [7]. Una forma de mejorar aún más el desempeño de los controladores automáticos es agregar un cierto grado de inteligencia a los mismos, mediante el diseño de algoritmos de control avanzados basados en modelos matemáticos. Estos tipos de controladores, conocidos como *controladores de riego inteligente* [3], suelen presentar características adaptables y predictivas que evalúan permanentemente la dinámica del sistema y actúan en base de predicciones a futuro [4], [5]. El riego inteligente se caracteriza por monitorear de forma continua los niveles de humedad del suelo y ajustar el suministro de agua en periodos cortos con aplicaciones de dosis muy diferentes, esta técnica es conocida como riego de alta frecuencia [24].

Tanto en el riego automático como en el inteligente las necesidades de riego serán medidas a intervalos frecuentes pero el agua solo será aplicada cuando el controlador lo indique según la medición entregada por el sensor de humedad, teniendo en cuenta que la cantidad de agua aplicada dependerá cubrir de las necesidades de las plantas, de esta manera el sistema de control dará una variación mucho más amplia en los tiempos de dosis del riego. La aplicación máxima de agua en algún momento puede llegar a ser mucho mayor que con el riego convencional, pero el monto total de agua suministrada durante un determinado intervalo, por ejemplo una semana, será mucho menor.

III- Diseño del software de monitoreo y control.

A- Entorno de desarrollo LabVIEW

LabVIEW (acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un entorno de programación gráfica en el que se pueden crear aplicaciones de forma rápida y sencilla, como ser: test y medida, control de instrumentación, y sistemas de adquisición de datos [25]. LabVIEW presenta un entorno similar a Visual C o Visual Basic, sin embargo, se distingue de ellos por usar un lenguaje de programación gráfico (G) para crear programas en forma de diagrama de bloques, mientras que otros sistemas de programación usan lenguajes basados en texto para crear las líneas de código [25][26].

El programa diseñado en LabVIEW se denomina Instrumento Virtual, o bien .vi (Virtual Instrument), debido a que imitan el desempeño de instrumentos o sistemas reales. Al crear o abrir un archivo .vi en LabVIEW, por defecto aparecen dos ventanas para trabajar en el ambiente de desarrollo, las mismas se presentan en la figura 1. En una se

implementará el panel frontal y es la que servirá de interfase al usuario, allí se colocan indicadores y controladores de todo tipo (botones, controles, textos, ventanas de dialogo, etc.). La otra ventana soporta el nivel de programación, allí se genera el diagrama donde se ejecuta propiamente la programación mediante la conexión de los diversos bloques [25].

De forma similar a un instrumento o sistema real, el panel frontal muestra en la pantalla de la PC el frente de un instrumento o la distribución del sistema y en él se pueden realizar la manipulación de los *controles* y la visualización de los *indicadores*. Por otro lado, el diagrama de bloques representa la electrónica o los mecanismos que hacen funcionar realmente al sistema mostrado en el panel frontal [26].

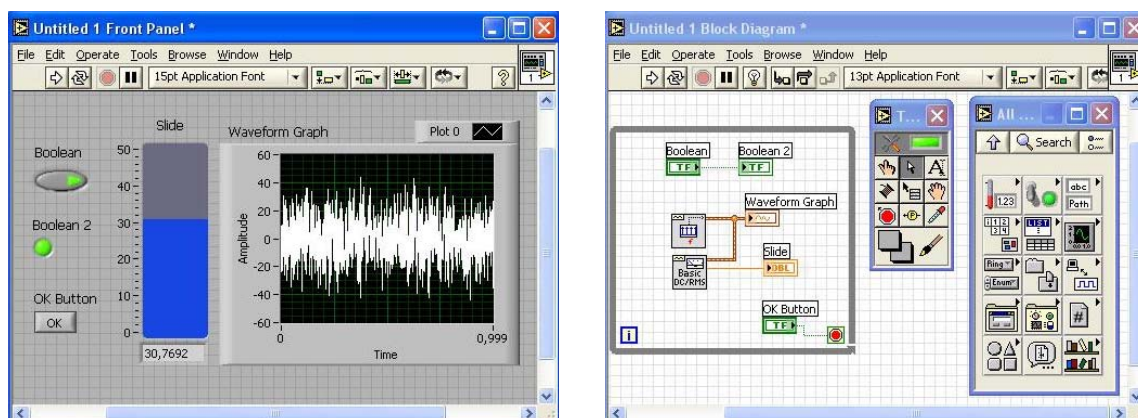


Figura 1. Entorno de programación gráfico de LabVIEW 7.1. Ventanas correspondientes al “panel frontal” que se presenta en el monitor de la PC y el “diagrama de bloques” conteniendo el programa.

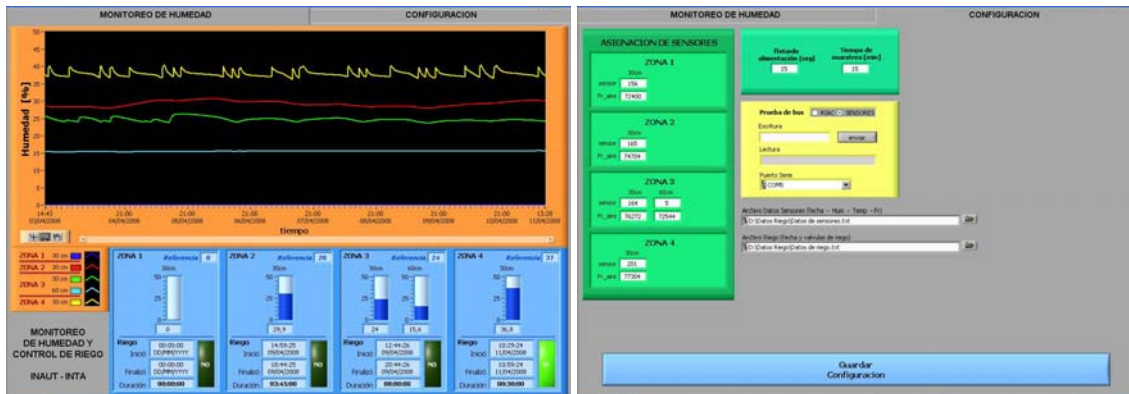
B- Programa de monitoreo de humedad del suelo y control de riego

El diseño del programa para efectuar la medición y monitoreo continuo del contenido hídrico del suelo, como así también el control del sistema de riego, esto es apertura y cierre de las electro-válvulas solenoides, se ha realizado mediante el entorno LabVIEW 7.1.

Respecto al diseño visual, el programa consta de una ventana con dos pestañas: (i) *Monitoreo de Humedad* y (ii) *Configuración*; estas se muestran en las figuras 2 y 3. En la primera pestaña, se presenta: la medición de humedad actual que cada sensor brinda, un historial de la evolución de la humedad en cada zona, el tiempo de inicio, finalización y duración de la última dosis de riego, el estado actual de cada electro-válvula de riego, y los valores de referencia de humedad para efectuar el control. En la segunda pestaña el operario configura el programa, allí se deben indicar: parámetros de comunicación entre los sensores y la PC; etiquetas o nombres de cada sensor, tiempo de muestreo, valores de humedad de referencia (set-point) para cada sector y direcciones de disco donde se guardan los archivos conteniendo la información referida a la evolución histórica del sistema.

Los resultados presentados en las pantallas y demás operaciones son ejecutadas por el código de programa, y se corresponde a la programación en forma de diagramas de bloque (programación G). El programa está estructurado en cuatro rutinas: (i) *configuración*, (ii) *comunicación y medición*, (iii) *monitor* y (iv) *controlador*, y se explican a continuación:

La *configuración* consiste en la lectura y escritura de un archivo (guardado en memoria) el cual contiene la información de los parámetros del programa. Esta rutina está íntimamente relacionada con la pestaña de configuración, donde gran parte de los parámetros son mostrados para que el operario configure el sistema según sus necesidades.



(a) Monitoreo de humedad y sistema de riego

(b) Configuración del sistema

Figura 2. Pestañas vista por el usuario en la pantalla del monitor, correspondiente al experimento 1.



(a) Monitoreo de humedad y sistema de riego

(b) Configuración del sistema

Figura 3. Pestañas vista por el usuario en la pantalla del monitor, correspondiente al experimento 2.

En la segunda rutina, el programa se comunica con cada uno de los sensores de humedad mediante comunicación serie RS-485, para ello se emplea un módulo conversor de normas RS-232 a RS-485 conectado al puerto serie de la PC. [27]. Establecida la comunicación, los sensores entregan la medición correspondiente al nivel de humedad.

La rutina *monitor* esta relacionada a la pestaña de monitoreo de humedad. La rutina ordena la información recibida desde cada sensor para luego ser mostrada en la pantalla.

El *controlador* es un algoritmo de control que opera a lazo cerrado [7], donde la acción de control u es del tipo si/no, esto es debido a que las electro-válvulas solenoides de riego solo tiene dos estados de operación: abierta o cerrada. El algoritmo determina la apertura ($u=1$) o cierre ($u=0$) de cada válvula en forma independiente, según el nivel de humedad sentido (θ_{vm}) en cada sector n , con el objetivo de mantener el nivel de humedad dentro del rango establecido. La ley de control actúa según un ciclo de histéresis dentro de dos límites de operación (ver tabla 1), siendo θ_{r-sup} el límite superior y θ_{r-inf} el límite inferior.

Tabla 1: Ley de control (por histéresis) programada en el controlador de riego.

CONDICION	ACCION DE CONTROL
$\theta_v < \theta_{r-inf}$	$u_{(k)} = 1$
$\theta_v > \theta_{r-sup}$	$u_{(k)} = 0$
$\theta_{r-inf} > \theta_v > \theta_{r-sup}$	$u_{(k)} = u_{(k-1)}$

IV- Materiales empleados y metodología realizada

A- Organización y localización de los experimentos de campo

La implementación en campo del sistema desarrollado se ha efectuado en dos olivares, ubicados en diferentes departamentos de la provincia de San Juan. Desde el punto de vista agronómico, en cada uno de ellos se aplicaron diferentes estrategias de riego en busca de distintos objetivos. Seguidamente se detalla cada uno de los experimentos.

El experimento 1 se ha efectuado sobre un monte de olivos *cv.* Arbequina joven, de cuatro años de edad, situado en EEA INTA-San Juan, en el departamento Pocito, aproximadamente a 15km de la ciudad capital. El marco de plantación es intensivo de 6m x 2m. Dentro del monte se ha seleccionado un pequeño sector de 8 hileras con 15 plantas cada una, donde solamente allí se efectuara la experimentación.

El experimento 2 se ha realizado sobre un monte de olivos *cv.* Arbequina adulto en producción, de 9 años de edad, situado en un emprendimiento privado perteneciente a Corporación de Inversiones Frutihortícolas S.A., en el departamento Media Agua, distante a 65km de la ciudad capital. El marco de plantación es 7m x 3m. Dentro del monte se han seleccionado 9 hileras con 15 plantas cada una para efectuar la experimentación.

En ambos experimentos, la homogeneidad en el stand de las plantas y el desarrollo de ésta ha sido el criterio fundamental para la selección de los sectores dentro de la plantación.

Un paso importante para llevar a cabo las experimentaciones, es la adecuada determinación de cada parcela agronómica homogénea (PAH), definiéndose a cada PAH como una zona limitada del terreno en la cual el tipo de suelo, el cultivo y la geografía deben ser similares y permanecer constantes durante el experimento.

Realizada la toma de muestras del terreno en diferentes puntos y efectuado su posterior análisis, se determinó que el suelo presenta igual característica en todo el sector seleccionado. Es por ello que la determinación de las parcelas se efectuó en base al estado actual de las plantas. De este estudio resultó la demarcación de cuatro PAH para el experimento 1 (conformadas por dos hileras de olivos, con un total de 30 plantas), y la demarcación de tres PAH para el experimento 2 (conformadas por tres hileras de olivos, con un total de 45 plantas). En la figura 4 se presenta un mapa esquemático del área de interés en cada experimento, allí se muestra la demarcación de las PAH, ubicación de las salas de control y monitoreo, sensores de humedad, sistema de riego y reservorio de agua.

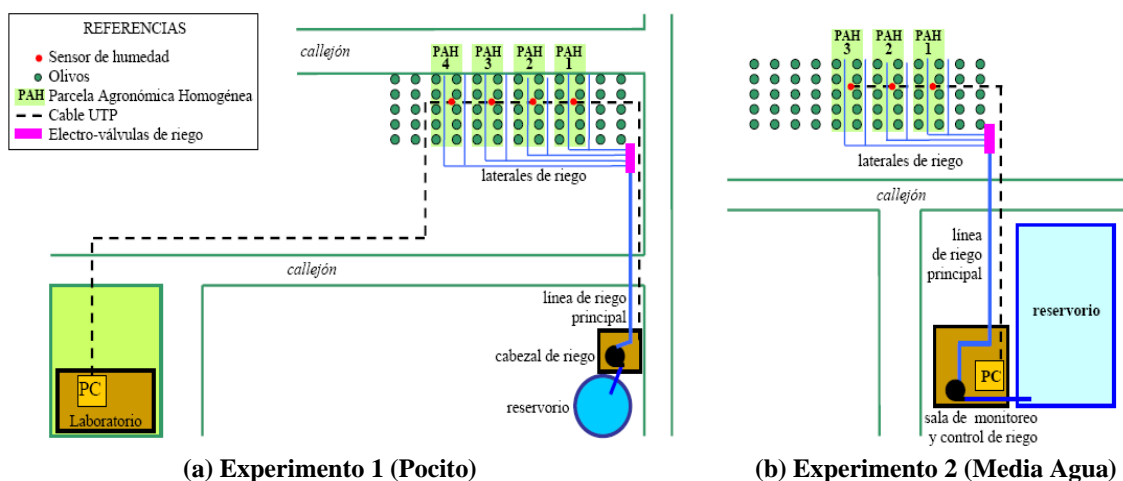


Figura 4. Mapa descriptivo del lugar de experimentación para cada ensayo de campo.

B- Sistema de riego localizado (por goteo).

Ya definidas las PAH, se debe calcular e instalar el sistema de riego, basándose en los requerimientos y necesidades hídricas del olivo [11], [24], [28]. En ambos caso se ha utilizado un sistema de riego presurizado por goteo (riego localizado) con emisores auto-compensados de 3.5litros/hora separados a 80cm. Al inicio de cada lateral de riego se instala un caudalímetro tipo Bolman a fin de conocer la cantidad de agua suministrada.

El agua, previamente filtrada, es inyectada a la línea de riego principal mediante una bomba de 1hp que permite mantener una presión constante sobre la línea de riego de 2bar. La provisión de agua se realiza desde un reservorio cercano a la sala de control. La línea principal de riego se extiende por 200 metros, partiendo desde el cabezal de riego (figura 5a). Al final de esta línea están las electro-válvulas solenoides (24volt), una por PAH, las que representan una unidad de riego (figura 5b) y son operadas por el controlador de riego de forma independiente. La tensión requerida para la apertura y cierre se envía desde el panel electrónico de control situado en la sala de control (figura 5c).



Figura 5. Elementos del sistema de riego por goteo y controlador de riego automático.

C- Instalación en campo de los sensores de humedad

Para efectuar la medición de la humedad volumétrica del suelo, se han empleado sensores de tipo capacitivo (desarrollado en el Instituto de Automática, UNSJ, con patente en trámite), alojado en la zona de las raíces y a distintas profundidades (ver figura 6). Esta técnica es una de las más novedosas en la actualidad para controlar el sistema de riego, según [13] y [15]. Las ventajas de este método radica en que solo es necesario instalar un sensor por cada PAH, permitiendo una medición directa y continua del nivel de humedad en el suelo agrícola, resultando en el adecuado monitoreo y control del riego [4], [29], [30].

Una vez concluido el estudio del suelo, definidas las PAH y ubicado el sistema de riego, se procede a determinar las estaciones de muestreo en cada una de las PAH, siendo estas un punto representativo de todo el sector. Las mismas han sido indicadas en la figura 4 con un círculo rojo. Para realizar la instalación de los sensores se debe efectuar la excavación de una calicata al costado de la planta seleccionada como estación de muestreo. Llegando aproximadamente a 150cm de profundidad, se continúa excavando horizontalmente en dirección hacia el cultivo hasta descubrir las raíces del mismo. En ese lugar se hace una perforación u orificio donde se dejara alojado el sensor, esto se ilustra en la figura 6d. Luego se introduce el sensor en el orificio y se rellena con parte del suelo extraído en la perforación. De esa manera el sensor queda perfectamente rodeado de suelo

sin generar cavidades huecas con aire, de suceder esto las lecturas del sensor serían incorrectas. Se verifica la conexión eléctrica del sensor y la comunicación con la PC para luego proceder a rellenar la calicata y dejar nuevamente llano el terreno.

En el experimento 1 (Pocito) se coloca un sensor de humedad a 30cm de profundidad en cada estación de muestreo. Esta zona es la más interés por tener la mayor densidad de raíces y allí se desea mantener constante el nivel de humedad. En la PAH 3 se ha instalado un sensor extra a 60cm de profundidad (figura 6b) con el objetivo de monitorear las variaciones de humedad en la zona profunda para observar las pérdidas de percolación.

En el experimento 2 (Media Agua) se colocan cuatro sensores en cada estación de muestreo, estos se ubican a 30cm, 100cm y 120cm de profundidad dentro del bulbo húmedo, el restante se coloca a 50cm de profundidad afuera del bulbo húmedo (figura 6c).

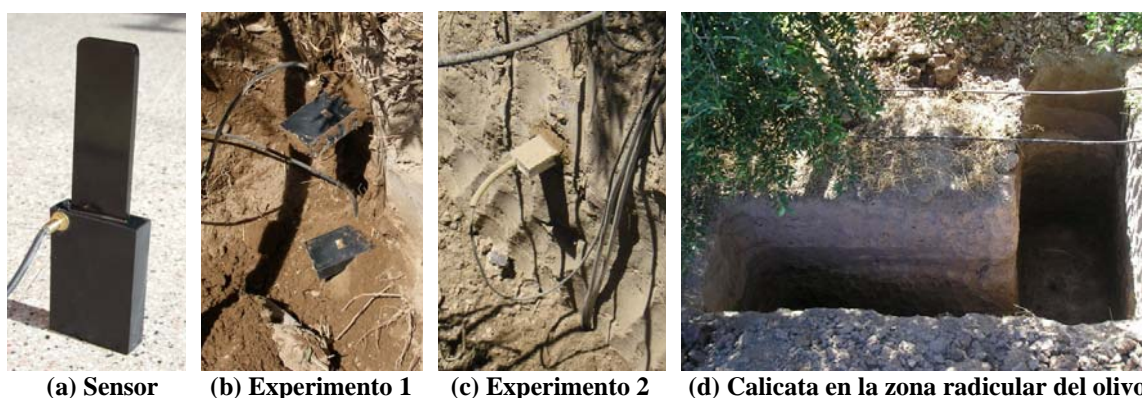


Figura 6. Instalación en campo de los sensores de humedad a distintas profundidades.

D- Controlador de riego automático

El controlador de riego esta compuesto por dos unidades. La primera consiste en el algoritmo de control programado dentro del sistema de monitoreo de humedad y control de riego (ya explicado en la sección III-B), el cual se ejecuta desde una computadora personal (PC). La segunda unidad corresponde al *panel electrónico* (unidad de potencia) el cual contiene los elementos electrónicos necesarios para efectuar las operaciones requeridas por el algoritmo de control, estos son: fuente de alimentación, relays, contactores, modulo de comunicación, protecciones contra rayos y sobre cargas eléctricas. Éste es mostrado en la figura 5c. La PC, el panel electrónico y los sensores de humedad están conectados mediante una red RS-485, en la figura 4 se indica con línea de trazo dicha conexión. En la misma figura se presenta la ubicación geográfica de cada uno de los elementos del sistema.

V- Experimentación en campo y resultados obtenidos.

El experimento 1 (Pocito) tiene por objetivo evaluar el estado del cultivo y las propiedades en el producto final, en este caso aceite, para distintas condiciones de humedad en el suelo. Por ello se efectuaron dos tratamientos de riego, T1: se mantiene la humedad del suelo a nivel de C_c (sin restricción hídrica) durante toda la temporada en las PAH 1 y 4. T2: se aplicó restricción hídrica (humedad a 40% de C_c), en las PAH 2 y 3, durante el periodo de post-cuaje a cosecha. En este experimento el operario solamente puede definir el límite inferior (θ_{r-inf}); θ_{r-sup} se define automáticamente como el 1% más por arriba de θ_{r-inf} .

De manera diferente, el experimento 2 (Media Agua) tiene por objetivo determinar las necesidades hídricas del cultivo de olivo en la provincia de San Juan. Para ello se obtendrá un coeficiente de cultivo que permita calcular las necesidades hídricas en base a datos meteorológicos. Es por ello que se instalan varios sensores de humedad a fin de conocer en todo momento el contenido de agua del suelo y, al mismo tiempo, asegurarse que no exista pérdida de agua por percolación profunda o escurrimiento lateral luego de aplicar las dosis de riego. En este experimento el operario define θ_{r-inf} y θ_{r-sup} en función de observaciones realizadas sobre la humedad a 120cm con el objetivo que la misma no varíe; indicando de esta forma que el agua aportada en cada dosis es consumida por los cultivos.

Seguidamente se presentan los resultados obtenidos en la implementación del programa a fin de llevar a cabo los tratamientos antes descriptos. En ambos experimentos, el controlador de riego toma como señal de entrada (o decisión) la medida entregada por los sensores ubicados a 30cm de profundidad.

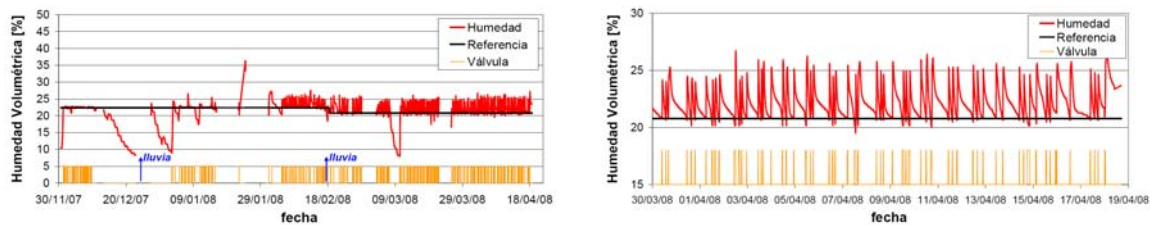


Figura 7. Experimento 1. Evolución de la humedad en la PAH 1 (sin restricción hídrica)

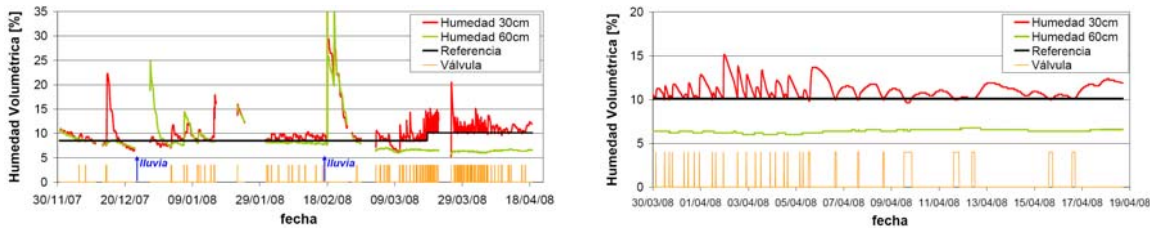


Figura 8. Experimento 1. Evolución de la humedad en la PAH 3 (con restricción hídrica)

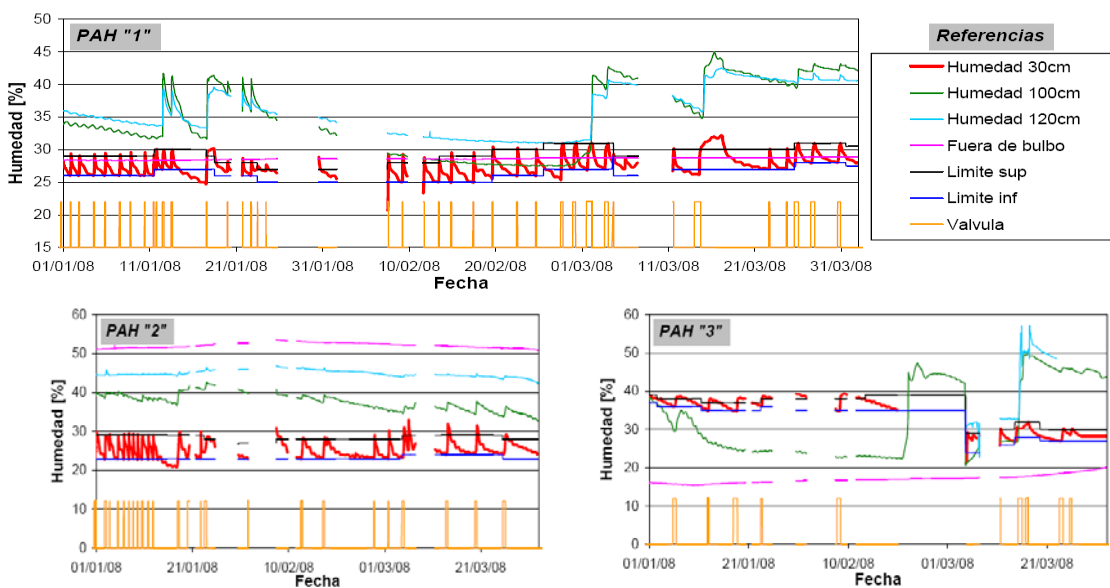


Figura 9. Evolución de la humedad, a distintas profundidades, en cada parcela del experimento 2.

En las anteriores figuras se muestra la variación de humedad volumétrica en cada PAH, los valores θ_{r-inf} y θ_{r-sup} en cada tratamiento y las acciones de la válvula de riego. Debido a diversas tormentas ocurridas durante el periodo de verano, se produjeron cortes del suministro eléctrico y ocasionó que la PC no funcionara en determinados momentos, por ello se observan discontinuidades en las distintas gráficas presentadas.

La figura 7 presenta el desarrollo del tratamiento T1 en el experimento 1. Inicialmente la referencia es $\theta_{r-inf}=22\%$, luego, día 18/02/2008 es reducida a $\theta_{r-inf}=21\%$. La figura 8 muestra el tratamiento T2 en el experimento 1. Este se inicia con un valor de referencia $\theta_{r-inf}=9\%$, el día 18/3/2008 se aumenta la referencia al 10% . En ambas gráficas se presenta una ampliación (zoom) de los últimos 20 días de este tratamiento con el objetivo de visualizar claramente las variaciones de humedad y el accionar del controlador.

En la figura 9 se presenta la evolución de la humedad, de forma histórica, en cada una de las PAH del experimento 2. El ajuste de las referencias de control fueron modificadas por el operario de riego con el objetivo de ajustar las dosis de riego evitando la percolación.

VI- Análisis de resultados y discusión

Analizando las gráficas 7, 8 y 9, correspondiente a los dos experimentos y distintos tratamiento de riego, se deduce que el sistema de monitoreo de humedad del suelo y control automático desarrollado en LabVIEW funciona adecuadamente, logrando mantener la humedad dentro de los valores deseados. En determinadas oportunidades se observa que la humedad ha descendido considerablemente por debajo del valor de referencia y el controlador no actuó en consecuencia, esto se debió a no contar con agua disponible en ese instante o por inconveniente técnicos en el funcionamiento de la bomba de succión.

En el experimento 1 se destacan las aplicaciones de alta frecuencia que realiza el controlador, es decir, pequeñas dosis en intervalos cortos de tiempo, logrando mantener la humedad según lo establecido por el agrónomo. En la gráfica 8 se aprecia que la humedad volumétrica en la zona profunda permanece constante, esto indica que el agua aportada por el sistema de riego esta siendo consumido por el cultivo. Finalizado el experimento, se realizó la cosecha. Sobre las aceitunas recolectadas y el aceite producido se realizarán distintos estudios en laboratorios para analizar las diferencias entre los productos logrados de cada tratamiento de riego. Con esta información se determinará si las estrategias de riego deficitario en olivares, con el objetivo de reducir agua y mejorar el aceite, son viables.

En el experimento 2 se destaca que el controlador ha mantenido la humedad dentro de los dos límites fijados (figura 9), sin embargo en determinados instantes el aporte de agua ha sido superior al requerido, observándose variaciones significativas en la zona profunda. En estos casos el operario modificó los valores de referencia para lograr el ajuste correcto. Los datos recolectados de esta experiencia permitirán determinar un coeficiente de cultivo (K_c) local para la provincia de San Juan, mediante el cual se podrá estimar el consumo hídrico del cultivo de olivo adulto bajo condiciones no limitantes de desarrollo, en función de datos climáticos diarios. Con ello se logrará mejorar la eficiencia en el uso del agua de riego en el cultivo del olivo, disminuyendo el consumo de energía y los costos de bombeo.

VII- Conclusiones

Desde el aspecto tecnológico, se destaca el desarrollo de una herramienta capaz de monitorear y controlar eficazmente el sistema de riego en función de la medición continua

de la humedad en el suelo utilizando sensores de tipo capacitivos en la zona de las raíces, alojados a distintas profundidades. El programa presenta de manera amena, precisa y rápida el comportamiento del sistema, brindando al operario de riego una herramienta de seguimiento y al agrónomo una base de datos completa para efectuar los análisis sobre los distintos tratamientos de riego aplicados. El controlador efectúa la programación del riego de manera efectiva, entregando la dosis de agua necesaria para cubrir los requerimientos hídricos de la planta, evitando las dosis excesivas.

El programa desarrollado en LabVIEW presenta mejoras sustanciales frente a los controladores convencionales ofrecidos en el mercado. Fundamentalmente con el control automático se alcanzan los niveles deseados de humedad, lográndose así el equilibrio correcto de agua, aire y nutrientes, lo cual es vital para un crecimiento saludable del cultivo. Además de ello, debido a que el controlador opera en lazo cerrado, éste modifica de forma automática e inmediata el periodo y dosis de riego ante perturbaciones climáticas, como ser grandes aportes de agua sucedidos por una lluvia intensa.

Los sistemas de riego convencionales generan una aplicación constante de agua pero el contenido de humedad del suelo varía significativamente. En cambio, el riego automático produce un contenido de humedad constante con amplias variaciones en la cantidad de agua aplicada, logrando mantener el contenido de humedad óptimo del suelo. Esto es altamente requerido en los períodos críticos de crecimiento máximo del cultivo.

La gestión del agua de riego empleando un controlador automático hace más eficiente el uso del recurso hídrico y energético en la producción olivícola. Esto permite incrementar la región cultivable y la disminución en el deterioro, degradación y compactación del suelo, contaminación de las capas freáticas y salinidad del suelo. Como así también, mejora la rentabilidad del sector mediante la reducción de costos (ahorro de energía, agua, fertilizantes, entre otros).

El sistema de monitoreo continuo de la humedad del suelo y el control de riego automático de un sistema de riego presurizado preirrigado en este trabajo puede ser aplicado en otras regiones agrícolas o en otros cultivos, extrapolando las experiencias presentadas a situaciones distintas. Entendiendo que esta herramienta permite efectuar un ahorro considerable en el agua de riego; fundamental para el desarrollo actual y la futura expansión del sector agrícola nacional.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CONICET, a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica del MiCTIP de la Nación por el financiamiento bajo los proyectos PICT/04 21592, PICT/05 35398 y ANR 2006 "Determinación de Necesidades Hídricas del Cultivo de Olivo en San Juan" (con contraparte del Grupo CREA Olivícola San Juan), y al INTA por el financiamiento de los proyectos "Determinación de Necesidades Hídricas del Cultivo de Olivo en San Juan" y "Control automático de riego localizado de alta frecuencia en cultivos de olivo mediante el uso de indicadores fisiológicos del estado hídrico de la planta y de las variables climáticas de la zona" enmarcados en el Proyecto Tecnológico Regional "Apoyo a la olivicultura regional".

Referencias

- [1]- INTA, 2008. Informe meteorológico. Serie estadística histórica de precipitación en la provincia de San Juan. Instituto Nacional de tecnología Agropecuaria, Servicio meteorológico EEA San Juan. Argentina. www.inta.gov.ar/sanjuan/info/boletinesmeteorologicos/precipitacion.pdf
- [2]- Doorenbos J. y Pruitt W. O., 1977. CropWater Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper N°24, Rome, Italia.
- [3]- Colin A. y Whitford D., 1996. Intelligent Irrigation. (Booklet) Cohort International Pty Ltd, Australia.
- [4]- Capraro F., Schugurensky C., Vita F., Tosetti S., Lage A., Patiño D., 2008. Intelligent irrigation in grapevines: a way to obtain different wine characteristics. 17th IFAC World Congress. Seoul. Korea.
- [5]- Capraro F., Patiño D., Tosetti S., Schugurensky C., 2008. Neural Network-Based Irrigation Control for

- Precision Agriculture. IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. China.
- [6]- Abraham N., Hema P. S., Saritha E.K., Subramannian S., 2000. Irrigation automation based on soil electrical conductivity and leaf temperature. *Agric. Water Manag.* 45. pp. 145–157.
 - [7]- Kuo B. C., 1995. Automatic control systems. 7th Edition. Prentice Hall.
 - [8]- Israelsen O.W. y Hansen V. E., 1962. Irrigation principles and practices, Chapter 1. John Wiley and Sons Inc, New York.
 - [9]- Nugteren, J., 1970. Introduction to irrigation. Chapter 1. Civil and Irrigation Engineering Department, Agricultural University. Wageningen, The Netherlands
 - [10]- Fernández M. D., Orgaz F., Federes E., López J. C., Céspedes A., Pérez J., Bonachela S., Gallardo M., 2001. Programación del riego en cultivos hortícolas bajo invernaderos en el sudeste español. Caja Mar, Barcelona, España.
 - [11]- Allen R.G., Pereira L. S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, N°56, Rome, Italia.
 - [12]- Hsiao T. (1973). Plant responses to water stress. *Ann. Rev. of Plant Physiol.* N° 24, pp 519-570.
 - [13]- Coggan M., 2002. Water measurement in soil and vines. *Vineyard & Winery Magazine*, 28(3): 43-53.
 - [14]- Bilskie J., 1997. Using dielectric properties to measure soil water content. *Sensors Magazine* 14, 26-32.
 - [15]- Mead R., 2002. Soil moisture instrumentation: Sensors & strategies for the 21st century. Artículo publicado en formato digital en el sitio web “MicroIrrigation Forum”, <http://www.microirrigationforum.com/new/sensors/smi-article.html>
 - [16]- Vita Serman F., Schugurensky C., Carrión R., Rodríguez S., 2005b. Evaluación del comportamiento de sensores de humedad de suelo de desarrollo local, en relación al contenido de agua y a la textura de suelo, CONAGUA 2005. Mendoza, Argentina
 - [17]- Whalley W.R., Dean T.J., Izzard P., 1992. Evaluation of the capacitance technique as a method for dynamically measuring soil water content. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 52:147-155
 - [18]- Tshenko R. y Savage M.J., 2005. Calibration of a frequency-domain reflectometer for determining soil-water content in a clay loam soil. *Water SA- Vol 32(1)*, pp:37-42
 - [19]- Charlesworth P., 2005. Irrigation Insights No.1, Soil Water Monitoring. 2nd edition. Published by Land & Water Australia on behalf of the National Program for Sustainable Irrigation. Lismore. Australia
 - [20]- Heimovaara T. J. and Bouten W., 1990. A computer-controlled 36-channel time domain reflectometry system for monitoring soil water contents. *Water Resources Research*, Volume 26, Issue 10, pp. 2311-2316.
 - [21]- Zegelin S.J., White I., Russell G.F., 1992. A critique of the time domain reflectometry technique for determining field soil-water content. *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. SSSA Special Publication N° 30. Soil Science Society of America, Inc.. Madison, Wisconsin, USA.
 - [22]- White I y Zegelin S. J., 1995. Electric and dielectric methods for monitoring soil-water content. In: *Handbook of Vadose Zone Characterization and Monitoring* (L. G. Wilson et al., eds). Lewis Publishers, CRC Press, FL
 - [23]- Wang J. R. and Schmugge T. J., 1980. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 18, 288–295
 - [24]- Pizarro F., 1996. Riegos localizados de alta frecuencia, III Edición, Ed. Mundi-Prensa, España.
 - [25]- Lázaro A. M y Fernández J., 2005. Lab VIEW 7.1 Programación gráfica para el control de instrumentación Ed. Thomson, España
 - [26]- Lajara Vizcaino A. R. y Pelegrí Sebastián J., 2007, LabVIEW Entorno gráfico de programación. LabVIEW 8.2 y versiones anteriores. Alfaomega grupo editor, Marcombo, España
 - [27]- Jan Axelson, 1998. Serial Port Complete. Ed Lakeview Research. Madison
 - [28]- Rodrigo J., Hernández J. M., Pérez A., González J. F., 1997. Riego localizado, II edición, Editorial Mundi-Prensa, España
 - [29]- Cary J. W. and Fisher H. D., 1983. Irrigation decisions simplified with electronics and soil water sensors. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47, pp. 1219–1223
 - [30]- Phene C. J. and Howell T. A., 1984. Soil sensor control of high-frequency irrigation systems. *ASAE* 81, pp. 392–396.

Datos de Contacto:

Ing. Flavio Capraro. Instituto de Automática, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan. Dirección: Av. Libertador San Martín 1109 (oeste), Ciudad Capital (CP5400), San Juan, ARGENTINA. Tel: +54-264-4213303. E-mail: fcapraro@inaut.unsj.edu.ar. Web: www.inaut.unsj.edu.ar/person.asp?fcapraro