

# Medidor Modular Inalámbrico de la Tensión Hídrica del Suelo

Javier Villagrana Mancilla<sup>a</sup>, Ricardo Francisco Núñez Pérez<sup>b</sup>, Manuel Moisés Miranda Velasco<sup>a</sup>, Miguel Enrique Martínez Rosas<sup>a</sup>, y Horacio Luis Martínez Reyes<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño.  
Carr. Ensenada-Tijuana 3917, Col. Playitas, Ensenada, B.C., México, 22860.  
<http://fiad.ens.uabc.mx/>

<sup>b</sup>CICESE, Laboratorio de Control, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones.  
Carr. Ensenada-Tijuana 3918, Zona Playitas, Ensenada, B.C., México, 22860.  
<http://www.cicese.edu.mx/>

2013 Published by *DIFU*<sub>100ci</sub>@ <http://www2.uaz.edu.mx/web/www/publicaciones>  
Selection and peer-review under responsibility of the Organizing Committee of the CICOMP-2013, [www.cicomp.org](http://www.cicomp.org)

---

## Resumen

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un instrumento para la monitorización en forma continua de la tensión hídrica y temperatura del suelo, cuyo objetivo es incrementar la eficiencia de los cultivos agrícolas. El instrumento recarga su batería de manera autónoma y además incluye una interfaz gráfica para la visualización de los datos medidos, la cual opera desde un servidor Web dedicado montado sobre un sistema operativo Linux. El instrumento, que puede ser configurado de acuerdo a las necesidades del usuario final está diseñado para operar en condiciones ambientales reales y la selección tanto del sensor como de los componentes utilizados en la construcción del instrumento fue respaldada por pruebas de laboratorio y campo.

*Palabras clave:* Control de riego agrícola, Monitorización de variables ambientales, Redes de sensores, Tensión hídrica.

---

## 1. Introducción

El volumen de agua que se precipita sobre la tierra sin incluir los océanos es del orden de 110,000  $km^3$  por año. De esta cantidad, casi dos tercios se evaporan, o son transpirados por la vegetación. Los restantes 40,000  $km^3$  por año, se convierten en aguas superficiales y subterráneas (acuíferos). Parte de esta agua, se remueve (extrae) mediante infraestructura instalada por el hombre. A nivel mundial, las proporciones de extracción en función de su utilización son: 70 % agropecuaria, 11 % municipal y 19 % industrial [1].

Puesto que la producción agrícola depende de la cantidad de agua disponible para riego, es necesario hacer un uso racional de este preciado recurso. Para el caso particular del municipio de Ensenada, Baja California, en México, no se cuenta con ríos, y sólo existen arroyos que llevan agua cuando el volumen pluvial en invierno o verano es considerable [2]. Según datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el 82.6 % del agua que se extrae en la Zona Costa de B.C. proviene de acuíferos en equilibrio y sobreexplotados [3]. El problema en dicho municipio y en general, en México, radica en que, en la mayoría de las explotaciones agrícolas, el

riego se realiza de forma empírica y manual, es decir, la calendarización y la observación son los métodos de riego más utilizados.

Debido a las razones mencionadas, se deduce que es necesario utilizar el agua racionalmente, de modo que se garantice su propia existencia y el cuidado del medio ambiente, para ello se debe emplear tecnología que permita evaluar en forma continua la cantidad de agua utilizada, de manera que los usuarios puedan tomar decisiones (basadas en información confiable) en sus políticas de riego que den lugar a un aprovechamiento eficiente del recurso hídrico.

En este trabajo se describe el desarrollo de un sistema de monitorización continua que permita medir las condiciones de humedad y temperatura de suelo agrícola. Los datos obtenidos de las condiciones del suelo, en conjunto con la información del agua de riego aplicada, y la evolución de los frutos le permitirían al agricultor hacer una estimación de la cantidad mínima de agua requerida para mantener las condiciones de su cultivo y por lo tanto podría modificar tanto la cantidad como los periodos de riego, es decir se tendría un manejo eficiente de los recursos. La falta de instrumentación necesaria para medir la humedad del suelo, así como de una metodología o asesoramiento sobre la programación de riegos que indique cuando regar un cultivo y cuanta agua utilizar, se cuentan entre los principales factores que afectan el uso eficiente del agua. En general, los expertos sobre este tema están de acuerdo en que el factor que limitará la producción de los alimentos en el mundo no será la tierra o la tecnología sino el agua [4].

Este escenario requiere la introducción de tecnologías modernas, ya que el agua es el factor vital en la producción de alimentos, el mal uso, la contaminación y el desperdicio del agua, no es sólo irresponsable sino un atentado contra la vida misma (particularmente en ésta época de producción intensiva).

## 2. Desarrollo del instrumento

El diseño del instrumento se puede describir a partir de los módulos que se muestran en el diagrama a bloques de la figura 1.

En los siguientes apartados se presenta la descripción de cada uno de los módulos, incluyendo la circuitería y sus componentes principales.

### 2.1. Sistema de administración de energía

El sistema de administración de energía, también conocido como BMS (*Battery Management System*),

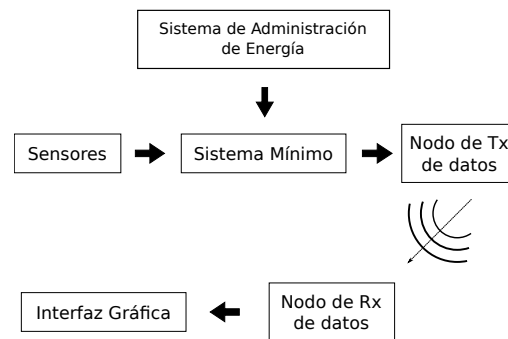


Figura 1. Diagrama a bloques del instrumento.

está compuesto por los siguientes elementos:

- **Batería.** En base al rendimiento y densidad de energía de las diferentes tecnologías descritas en el Manual de Baterías de Linden [5], se decidió utilizar baterías secundarias de iones de Litio (Li-ion), puesto que el instrumento requiere funcionar las 24 horas al día, durante todo el año.
- **Circuito controlador de energía.** Se seleccionó un controlador de carga apropiado (circuito MCP73833 de Microchip) para baterías de iones de Litio, el cual cumple con las funciones básicas para conformar el sistema de administración de energía.
- **Panel solar.** Se optó por utilizar celdas solares para alimentar al circuito controlador de energía, ya que es uno de los métodos que presenta una mayor capacidad de generación de energía con respecto a otras formas colectoras de energía [6].

Este sistema en particular cumple con las funciones de proporcionar la alimentación al instrumento, así como de proteger y prolongar la vida de las baterías.

### 2.2. Sistema mínimo

Para el control de periféricos y de las etapas de comunicación del instrumento se utilizó un dispositivo microcontrolador Atmega 328P del fabricante Atmel. Se decidió emplear éste dispositivo porque sus características de desempeño cubren las necesidades del proyecto.

Entre las características de mayor interés para este proyecto se encuentran las interfaces de comunicación proporcionadas por el microcontrolador, tales como: USART (*Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter* - Receptor/Transmisor Universal Síncrono/Asíncrono), SPI (*Serial Peripheral Interface* - Interfaz Serial de Periféricos) e I<sup>2</sup>C (*Inter-Integrated Circuit* - Inter-Circuitos Integrados). El módulo USART del

microcontrolador es fundamental para la configuración del instrumento, ya permite la comunicación con una computadora. Para nuestro caso, la conexión se realizó mediante un cable del tipo FTDI (marca de fabricante del circuito utilizado en conjunto con el cable), que es un conversor serie-USB (5 V, nivel TTL).

La utilización del protocolo SPI, que proporciona el microcontrolador, se utiliza para establecer comunicación con el convertidor analógico-digital, extraer los valores de los sensores, comunicarse con la memoria del tipo EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory* - Memoria de solo escritura programable y borrable eléctricamente) y almacenar los datos adquiridos. La interfaz I<sup>2</sup>C permite la comunicación con el circuito temporizador de tiempo real, gracias al cual se puede realizar la escritura y lectura de la hora, fecha, alarmas, interrupción y temporizador.

El protocolo I<sup>2</sup>C es fundamental para establecer la sincronía, que el circuito de tiempo real proporciona, con todos los dispositivos electrónicos utilizados, así como también, para ajustar el periodo de muestreo de las variables de interés. Otra de sus actividades que realiza, es la conversión de diferentes datos tales como: hora, fecha y datos de las variables de interés que proporcionan los diversos dispositivos electrónicos, de tal manera que se permita una visualización adecuada para los usuarios.

### 2.3. Sensores

De acuerdo a [7], hay dos objetivos principales en la medición del contenido de agua en el suelo de los cultivos agrícolas.

1. Determinar el contenido de humedad del suelo. Esto se refiere a la cantidad de agua contenida en una unidad de masa o volumen de suelo. Con este dato se puede calcular el agua necesaria para restaurar la humedad del suelo a la capacidad de campo del cultivo.
2. Determinar la magnitud de la tensión del agua en el suelo o tensión hídrica. Representa la cantidad de trabajo necesario para remover una cantidad equivalente a una unidad de agua retenida más flojamente, medida en centibares (ó *kPa*) de tensión de agua del suelo.

Desde el punto de vista de la ingeniería, muchas de las propiedades del suelo están más íntimamente relacionadas con la medición de la magnitud de la tensión del agua en el suelo y no en su contenido de humedad, por el hecho de que la cantidad de agua no es tan im-

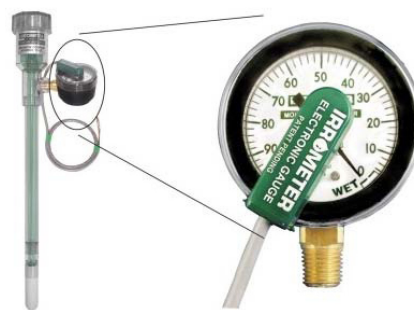


Figura 2. Tensiómetro Irrrometer modelo SR [4].

portante como lo difícil que es para la planta extraerla de la tierra.

Para llevar a cabo la medición de este parámetro se utilizó un tensiómetro como el que se muestra en la figura 2, que es un tubo lleno de agua cerrado herméticamente por uno de sus extremos y teniendo en el otro una cápsula de material cerámico poroso que se pone en contacto con el suelo. Junto al extremo cerrado se coloca un medidor de presión o vacuómetro, para medir presiones inferiores a la atmosférica (*i.e.*, depresiones). Esta cápsula porosa permite que la succión del suelo se transmita al agua del tensiómetro y la depresión se lee por el vacuómetro. La medida del vacuómetro se da en centibares (1 *cbar* = 0.10 *m* de columna de agua) y su escala esta graduada de 0 a 100 centibares. Una lectura cero indica que el suelo no ejerce ninguna retención sobre el agua por lo que está saturado o sobresaturado [8].

Procesos tales como la asimilación, la respiración, la transpiración, la fotosíntesis y el crecimiento dependen de la temperatura. La mayoría de las reacciones químicas que tienen lugar en la planta y en el suelo ocurren con mayor velocidad a temperaturas altas. Los procesos físicos de difusión y flujo viscoso dependen de la temperatura. Las plantas disponen de más agua en un suelo caliente que en uno frío, porque el suelo caliente retiene menos agua, cualquiera que sea su potencial. En sistemas equilibrados, la dependencia de la temperatura del potencial de agua indica un aprovechamiento inadecuado de energía [7].

La sonda de temperatura seleccionada (modelo 6470 de Davis Instruments), está diseñada para medir la temperatura del suelo. El encapsulado es de acero inoxidable y el sensor es un termistor de precisión y coeficiente negativo de temperatura (NTC por sus siglas en inglés) que produce un cambio de resistencia proporcional a la temperatura. El termistor es un dispositivo extremadamente no lineal y su curva característica varía dependiendo del fabricante; sin embargo, la curva de comportamiento de un termistor puede obtenerse

de forma bastante aproximada por medio de la Ec. (1) conocida como ecuación de Steinhart-Hart.

$$\frac{1}{T} = A + B [\ln(R_{term})] + C [\ln(R_{term})]^3 \quad (1)$$

donde:

$T$ : Temperatura en  $^{\circ}K$ .

$R_{term}$ : Resistencia del termistor en  $k\Omega$ .

$A, B, C$ : Coeficientes de la curva de aproximación.

Los coeficientes  $A, B$ , y  $C$  pueden calcularse al seleccionar tres puntos de la tabla o curva que acompaña el termistor, sustituyendo los valores de temperatura y resistencia de cada uno de los tres puntos seleccionados en la Ec. (1) se forma un sistema de 3 ecuaciones simultáneas con tres incógnitas, al resolver dicho sistema de ecuaciones simultáneas se obtienen los valores de  $A, B$ , y  $C$ .

#### 2.4. Nodos para la transmisión inalámbrica

Para agregar conectividad inalámbrica al instrumento se eligieron los módulos XbeePro de MaxStream S1. Los módulos Xbee pueden ser configurados desde una computadora utilizando el programa X-CTU, el cual permite realizar estas operaciones de manera más intuitiva, fácil y rápida que utilizando la Hyperterminal de Windows o bien desde el propio microcontrolador.

La Serie 1 incluye el firmware 802.15.4 que permite redes punto a punto o de topología en estrella. Este firmware ofrece conversión analógica-digital (ADC por sus siglas en inglés), así como entradas y salidas digitales. El sistema basado en el estándar 802.15.4 es mucho más rápido que ZigBee.

#### 2.5. Interfaz gráfica

Para la visualización de los datos de tensión hídrica y temperatura del suelo, se optó por instalar un servidor Web en una computadora con sistema operativo Linux, en particular con una distribución Ubuntu versión LTS 10.04 con ayuda de la paquetería Apache 2 y PHP 5. De esta forma, se puede tener acceso a la información en línea y sin necesidad de instalar algún programa en el dispositivo de despliegue (computadora, smarthphone, tablet o cualquier otro dispositivo con acceso a internet).

A grandes rasgos, en la computadora que mantiene en operación el servidor corre un programa que lee los datos a través del puerto serie universal (USB por sus siglas en inglés) y genera un archivo de texto, en el que se almacenan de forma ordenada los datos recibidos. Por otro lado, el paquete Apache se utiliza en conjunto con el paquete Php, el cual lee el archivo de texto

para posteriormente mostrar los datos en formato html y javascript, de tal manera que se puede generar una gráfica de la variable medida (que en realidad es una imagen) por medio de la librería Jpgraph.

### 3. Resultados experimentales

El tensiómetro provee un voltaje de salida en relación con el voltaje de alimentación, que está restringido al alcance de 2.7  $V_{cd}$  mínimo y 5.5  $V_{cd}$  máximo. Para poder convertir el voltaje medido a centibares el fabricante proporciona la Ec. (2), así como los valores correspondientes cuando se alimenta con 5  $V_{cd}$ .

$$cb = \frac{(V_{sm} - V_m)}{((265V_g)/(V_{mam} - V_{mim}))} \quad (2)$$

donde:

$V_{sm}$ : Voltaje máximo de salida calculado del medidor.

$V_m$ : Voltaje medido.

$V_g$ : Volts por grado.

$V_{mam}$ : Valor máximo en centibares del medidor.

$V_{mim}$ : Valor mínimo en centibares del medidor.

Para corroborar la información proporcionada por el tensiómetro, se realizó el montaje de la figura 3. El sensor se excitó con 5  $V_{cd}$  y los datos fueron registrados empleando el módulo de adquisición de datos NI USB-6216 de National Instruments, el cual cuenta con 16 entradas analógicas y una resolución de 16 bits. El módulo se controló mediante el uso de rutinas escritas en lenguaje Matlab, las cuales permiten efectuar mediciones del sensor cada 15 minutos y generar un archivo por día para los datos obtenidos, los cuales además incluyen el día y hora de la medición.

Los resultados obtenidos de la caracterización del tensiómetro se pueden observar en la figura 4, en donde se aprecia como al principio, el medidor arroja una lectura de aproximadamente 61  $cb$  y aumenta a 65 después de los 1000 minutos de estar midiendo. Esto nos indica que el suelo se estaba secando. Poco antes de los 1500 minutos, se agregó agua (simulando el riego) al contenedor con tierra en donde se insertó el tensiómetro, lo que provocó que la humedad del suelo llegara a 12  $cb$  lo que se interpreta como un suelo adecuadamente mojado.

La simulación de un pequeño riego en el montaje es semejante a la dinámica que tienen los suelos de cultivo, para los que se busca mantener la tensión hídrica del suelo en cierto intervalo (ni seco ni saturado), así que este proceso de secado natural y regado se mantendrá mientras el cultivo lo requiera dentro de los márgenes óptimos para el mismo.

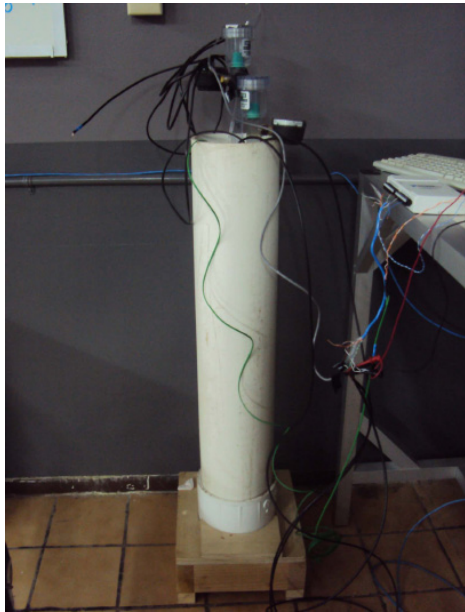


Figura 3. Montaje para la caracterización del tensiómetro.

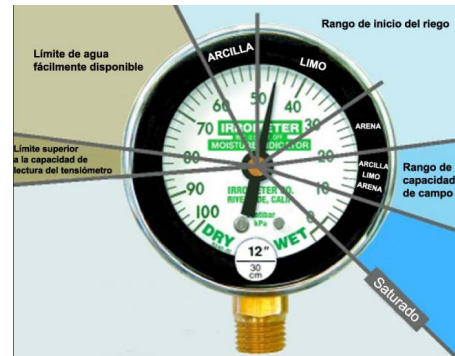


Figura 5. Interpretación de lecturas del tensiómetro (tipo de suelo).

Tabla 1. Interpretación de lecturas del tensiómetro [9].

Lectura (cb)	Interpretación de lecturas
0-10	Suelo saturado
10-30	Suelo adecuadamente humedecido
30-60	Alcance usual para irrigación
60-100	Alcance usual para irrigación en suelos pesados
100-200	El suelo se está secando peligrosamente, la producción puede afectarse severamente

Aunque los valores óptimos de tensión hídrica dependen tanto del tipo de suelo (figura 5), como del tipo de cultivo [4], los valores de las lecturas de la tabla 1 se pueden utilizar como una guía general, teniendo en cuenta que la capacidad de lectura del tensiómetro para una lectura confiable de acuerdo al fabricante es de alrededor de 80 centibares.

### 3.1. Integración del instrumento

Después de las pruebas preliminares, tanto en el laboratorio como en el campo, de los diversos módulos que componen el instrumento, se llegó al diseño final de las tarjetas de circuito impreso.

Para instalar y proteger estas tarjetas se escogió una caja de montaje de policarbonato, que cumple con las normas Nemas 4, 4X, 12, 13, i.e., está sellada contra agua y polvo y es resistente a la corrosión. Por lo que es ideal para uso en interiores y exteriores, protegiendo el equipo contra salpicaduras de agua, filtraciones de agua, derrames de agua sobre la caja y condensación externa severa.

El prototipo final del instrumento se muestra en la figura 6.

Para poder conectar los sensores a la caja, fue necesario agregar cuatro conectores especiales que cumplan con la norma Nema 4x; esto asegura que aún con estas perforaciones la caja sigue manteniendo toda la electrónica protegida. En la tabla 2, se muestran las

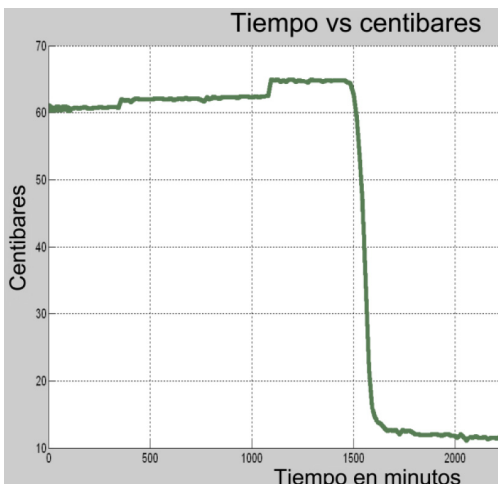


Figura 4. Caracterización del tensiómetro Irrometer modelo SR.



Figura 6. Prototipo final del instrumento.

Tabla 2. Especificaciones del instrumento.

Tipo	Valor	Unidades
Alcance de tensión hídrica.	0-75	Centibares ( <i>KPa</i> )
Alcance de temperatura.	25 ± 15	°C.
Precisión tensión hídrica.	± 3	Por ciento.
Precisión temperatura.	± 0.5	Por ciento.
Voltaje de alimentación.	3.3	V
Resolución.	0.8	mV
Consumo energético.	49.5	mWh.

principales especificaciones con las que cumple el instrumento desarrollado

El instrumento se mantuvo en funcionamiento en campo, ininterrumpidamente, durante 4 meses, en un cultivo de fresa en San Quintín, B.C. México. En la figura 7 se puede observar el instrumento operando en el campo de cultivo.

### 3.2. Despliegue y visualización de la información

La visualización de los datos que llegan del medidor al servidor Web, vía inalámbrica, con ayuda de los radios



Figura 7. Medidor instalado en un cultivo de fresas.



Figura 8. Página principal para el usuario del instrumento.

Xbee, es de la forma mostrada en la figura 8. Para facilitar la lectura de datos, la gráfica cuenta con un soporte interactivo en donde se utilizan menús para selección, por ejemplo para el caso en que se desea ver las mediciones de un mes particular, al seleccionar el mes deseado se despliegan los días que cuentan con datos en el servidor.

Después de haber seleccionado el día, la información se mostrará en forma gráfica (figura 9). En la parte inferior, se indica la figura y color que representa cada uno de los 4 sensores con los que cuenta el instrumento. El tensiómetro 1 y el termistor 1, se encuentran enterrados a una profundidad de 15 centímetros, por otro lado el tensiómetro 2 y el termistor 2 se encuentran a 30 centímetros de profundidad.

Claramente se ve que los sensores que se encuentran más cerca de la superficie, presentan una dinámica mayor, al encontrarse más expuestos a la humedad superficial; por el contrario, los sensores que se encuentran a mayor profundidad entregan datos que permanecen casi constantes.

En las abscisas, se despliega la hora en que se adquirió la medición y en las ordenadas la tensión hídrica o la temperatura (en *cb* ó °C, respectivamente) dependiendo del sensor que se esté consultando.

### 4. Conclusiones

Se diseñó e implementó un instrumento para medir la tensión hídrica y temperatura del suelo, el cual incluye un suministro de energía que le permite funcionar de manera continua e ininterrumpida durante una temporada completa de cultivo. El instrumento permite verificar

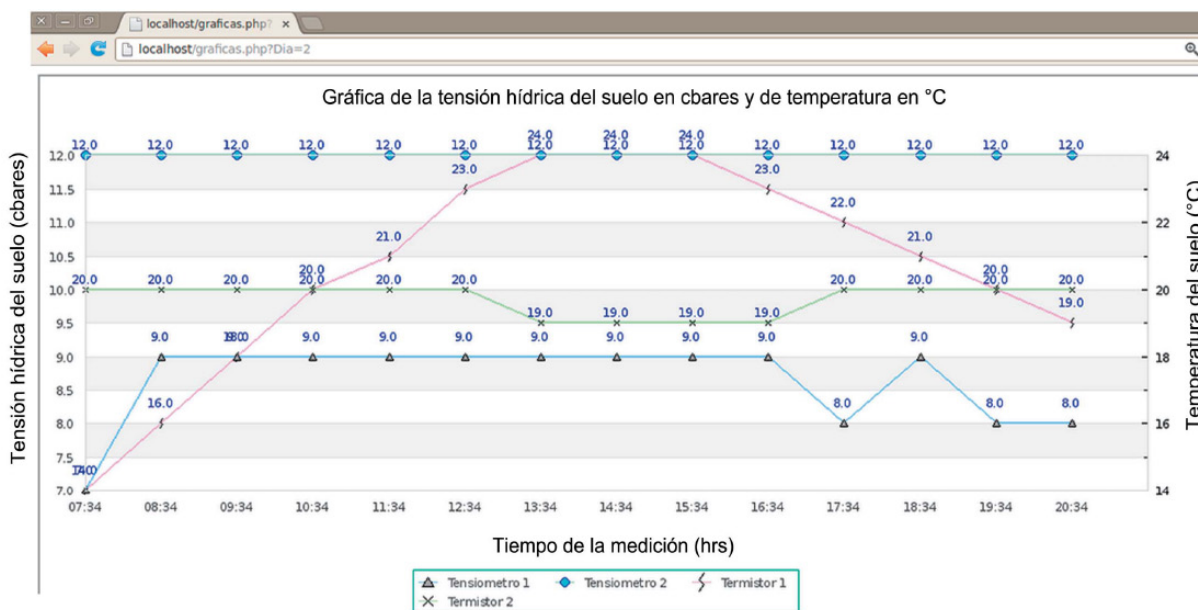


Figura 9. Despliegue de los datos obtenidos del instrumento.

el estado de las variables medidas de forma remota, ya que incluye un módulo de transmisión inalámbrica de datos que se enlaza con una computadora personal.

El prototipo es totalmente configurable a las necesidades de presentación de información del agricultor y puede ser utilizado prácticamente en cualquier tipo de cultivo sobre suelo agrícola. La programación del instrumento se realizó con el objetivo de que fuera adaptable a las necesidades específicas del usuario final.

Durante el desarrollo del instrumento, se efectuaron varias pruebas en el laboratorio y en los campos de cultivo. Los resultados obtenidos, corroboran su adecuado funcionamiento, en condiciones reales de operación, por lo que se puede mencionar que se tiene un sistema capaz de competir con otros equipos comerciales más costosos.

Por otro lado, cuando se colocan dos sensores a diferentes profundidades, se puede conocer el gradiente de infiltración del agua en el suelo, con todo el potencial que esto representa.

El usuario puede encontrar en éste instrumento una herramienta que le permita tomar decisiones basadas en información para controlar la programación de riegos, lo cual implicaría las siguientes ventajas: ahorro de agua, optimización de aplicación de fertilizantes, reducciones de costo por mano de obra y en general un mejor control del desarrollo de los cultivos. Este instrumento, tiene además la característica de que al ser un sistema abierto puede ser modificado para cubrir necesidades particulares, lo que no sucede con otros instrumentos comerciales que además por lo regular involucran modificaciones tecnológicas periódicas para mantener en

operación los equipos y por lo tanto incrementan el costo para el agricultor.

### Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo brindado por la FIAD-UABC, CONACYT y CICESE para la realización de este trabajo.

### Referencias

- [1] FAO. "AQUASTAT - Sistema de Información global sobre el agua y la agricultura de la FAO", 2013.
- [2] J. Villagrana Mancilla. "Medidor modular inalámbrico de la tensión hídrica del suelo". Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, B.C., 2013.
- [3] Comisión Nacional del Agua. "Atlas del agua en México 2012", 2012.
- [4] Irrrometer. "Moisture Sensor Agricultural Irrigation Design Manual". Technical report, Irrrometer Company, Riverside, CA, 2005.
- [5] T. Reddy. *Linden's Handbook of Batteries*. McGraw-Hill Professional, 4th edition, 2010.
- [6] J. M. Conrad. "A survey of energy harvesting sources for embedded systems". *IEEE SoutheastCon 2008*, pp. 442-447, April 2008.
- [7] A. G. Sampat *Física de los suelos: principios y aplicaciones*. Limusa-Wiley, México, D.F., 1976.
- [8] C. Cadahia López. *Fertirrigación. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Ediciones Paraninfo S.A, Madrid, 2005.
- [9] Irrrometer. "Soil Moisture Basics", 2013.