

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORÍA DE TÍTULO

**HERRAMIENTA VISUAL PARA EL ANÁLISIS DE DATOS DE LA Sonda
HYDRA PROBE ORIENTADA A DAR SOPORTE EN LA TOMA DE
DECISIONES DE RIEGO Y MANEJO DE SALES**

MAXIMILIANO JOSÉ RIOSECO GARRIDO

SANTIAGO - CHILE
2014

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORÍA DE TÍTULO

**HERRAMIENTA VISUAL PARA EL ANÁLISIS DE DATOS DE LA SONDA
HYDRA PROBE ORIENTADA A DAR SOPORTE EN LA TOMA DE
DECISIONES DE RIEGO Y MANEJO DE SALES**

**VISUAL TOOL FOR DATA ANALYSIS OF THE HYDRA PROBE SENSOR TO
SUPPORT DECISION MAKING OF IRRIGATION AND SOIL SALINITY
MANAGEMENT**

MAXIMILIANO JOSÉ RIOSECO GARRIDO

SANTIAGO - CHILE
2014

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**HERRAMIENTA VISUAL PARA EL ANÁLISIS DE DATOS DE LA SONDA
HYDRA PROBE ORIENTADA A DAR SOPORTE EN LA TOMA DE
DECISIONES DE RIEGO Y MANEJO DE SALES**

Memoria para optar al título profesional de
Ingeniero Agrónomo

MAXIMILIANO JOSÉ RIOSECO GARRIDO

Profesores Guías

Calificación

Sr. Rodrigo Callejas Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, Dr. Sc. Agr.

6,8

Sr. Cristián Kremer Fariña
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.

6,8

PROFESORES EVALUADORES

Sr. Herman Silva Robledo
Profesor de Biología y Ciencias, Mg. Sc. y Dr.

6,0

Sr. Eduardo Loyola Madariaga
Ingeniero Agrónomo, Enólogo, Dr.

6,1

SANTIAGO - CHILE
2014

ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
Objetivo	4
MATERIALES Y MÉTODOS	5
Materiales	5
Método	6
Obtención de datos fuente	6
Diseño de la aplicación.....	8
RESULTADOS	11
Datos fuente	11
Estructura de la base de datos.....	11
Diseño de la interfaz	12
Gráfico del contenido de agua del suelo por sensor	14
Gráfico del contenido de agua de manera agregada	14
Gráfica de la evolución de la conductividad eléctrica de la masa de suelo.....	15
Medición de una misma variable entre intervalos de tiempo	16
Observación de gráficos simultáneos	19
Ingreso manual de otras variables (ETo, riego y precipitación).....	21
DISCUSIÓN	21
Análisis de los datos de las unidades instaladas	21
Unidad 1 sector Chamonate.....	21
Unidad 2 sector Tierra Amarilla.....	28
Consideraciones sobre el sensor Hydra Probe.....	31
CONCLUSIONES	33
BIBLIOGRAFÍA	33

RESUMEN

Utilizando los datos de dos instalaciones con sondas Hydra Probe para la medición del contenido de agua del suelo y conductividad eléctrica de la masa de suelo, instaladas en la región de Atacama, se desarrolló un software para facilitar la visualización y análisis de éstos con el objetivo de transformar los datos en información relevante que facilite la toma de decisiones para la gestión del riego. El software desarrollado, Hydra Plot, permitió visualizar los datos de las sondas en el tiempo y facilitó la extracción de información más allá de los mismos valores numéricos capturados por los instrumentos. Mediante observación de los datos en un gráfico interactivo en el tiempo, es posible determinar el contenido de agua en el suelo para el perfil donde están los sensores, el contenido de agua en el suelo por cada profundidad de sensor, la conductividad eléctrica de la masa de suelo, la duración aproximada de un evento de riego, la profundidad de suelo que moja un evento de riego y el tiempo transcurrido entre eventos de riego.

ABSTRACT

Using data from two facilities with Hydra Probe soil water content and bulk soil electric conductivity probes installed in Atacama region, a software was developed in order to facilitate visualization and analysis of the probes' data, with the aim of transforming it into relevant information with the purpose of making irrigation decision taking, easier. The developed software, Hydra Plot, allowed the visualization of probes' data over time, thus, facilitating information extraction beyond the numeric values captured by the instruments. Through the observation of data on an interactive graphic over time, it is possible to determine the soil water content for the profile where the sensors are, the soil water content for each sensor depth, the electric conductivity of the bulk soil, the estimated length of an irrigation event, soil depth reached by an irrigation event and elapsed time between irrigation events.

INTRODUCCIÓN

Entre un 80 a 90% del agua de uso consuntivo es utilizada por la agricultura, sin embargo ésta es aprovechada a lo más con una eficiencia del 45% (Hamdy *et al.*, 2003). En la medida que la población humana aumenta, el desarrollo reclama una mayor cantidad de recursos hídricos, lo que intensifica la presión sobre éstos, generando inevitablemente conflictos económicos, sociales y ambientales (FAO, 2007). Además, el agua de riego y la fertilización alteran la salinidad del suelo y su efecto en el tiempo, si no se realiza un manejo apropiado, puede llegar a ser negativo para la sustentabilidad de una explotación agrícola (Metternicht y Zinck, 2003). En la realidad local del país y concretamente en la Región de Atacama, la situación anterior es particularmente importante. La relación entre los derechos de agua otorgados, la extracción y la recarga del acuífero es desigual, generando un balance negativo en contra del acuífero (Diario Chañarillo, 2013).

Lo anterior hace evidente la necesidad de identificar técnicas y herramientas para mejorar la eficiencia en el uso del agua de riego y controlar su efecto sobre la salinidad (Hamdy *et al.*, 2003). Para ello, la tecnología actual dispone de equipos electrónicos capaces de medir cuantitativamente parámetros del suelo, como el contenido de agua y la conductividad eléctrica (Seyfried *et al.*, 2005; Chow *et al.*, 2009).

Dentro de estos dispositivos, se encuentra la sonda Hydra Probe, fabricada por Stevens Water Monitoring Systems. Esta sonda permite la captura de datos sobre el contenido volumétrico de agua ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), conductividad eléctrica de la masa de suelo ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$) y temperatura del suelo ($^{\circ}\text{C}$). Su funcionamiento se basa en la medición de la permitividad eléctrica de la masa de suelo, que es un número complejo en el que su componente real está relacionado con el contenido de agua y su componente imaginario, con la conductividad eléctrica (Seyfried y Murdock, 2004; STEVENS, 2007). Varias de estas sondas pueden ser instaladas de manera permanente a distintas profundidades de un perfil de suelo y mediante un registrador de datos, que realiza mediciones de cada sonda en intervalos de tiempo regulares, es posible implementar un sistema de monitoreo continuo de los parámetros antes señalados (STEVENS, 2005).

Este monitoreo continuo tiene la potencialidad de generar grandes volúmenes de datos, a partir de los cuales se puede realizar una gestión más precisa del recurso hídrico (Hanson *et al.*, 2000; Dukes *et al.*, 2007; López Riquelme *et al.*, 2009). Sin embargo, la capacidad de extraer información y tomar decisiones de riego a partir de estos datos se ve limitada si éstos no son procesados y presentados de una forma que facilite su observación (Hey, 2004).

Por tales motivos, la utilización de gráficos para la presentación de información se ha identificado como una herramienta vital para el análisis de datos (Cleveland y McGill, 1984). Los gráficos pueden hacer uso del proceso humano automático de búsqueda de patrones (Ware, 2004) y el diseño de un software que potencie dicho proceso humano, a través gráficos y funciones orientadas a la extracción de información desde los datos capturados por las sondas, puede resultar en una herramienta mucho más poderosa que la sola capacidad cognitiva humana para la búsqueda de información que asista a la toma de decisiones (Keller y Tergan, 2005).

Objetivo

Desarrollar un software gráfico que facilite la toma de decisiones de riego, a partir de datos registrados sistemáticamente en el tiempo sobre el contenido volumétrico de agua y conductividad eléctrica del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizaron 2 unidades Hydra Probe como fuentes de datos (Figura 1). La ubicación de estas unidades fue en la comuna de Copiapó, Región de Atacama, en las siguientes coordenadas:

Cuadro 1. Ubicación de las unidades Hydra Probe en la comuna de Copiapó

Unidad	Ubicación	Coordenadas
Unidad 1	Sector Chamonate	27°17'48.5" S 70°26'48.1" O
Unidad 2	Sector Tierra Amarilla	27°44'28.1" S 70°11'6.4" O

Cada unidad se compuso de:

- 3 sensores Hydra Probe II instalados en el suelo.
- 1 registrador de datos Dot Logger.
- 1 batería como fuente de energía.
- Armario cerrado resistente a condiciones de intemperie.

Cada sensor Hydra Probe proporcionó 3 variables:

- Contenido volumétrico de agua del suelo ($\% \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).
- Conductividad eléctrica de la masa de suelo ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$).
- Temperatura de suelo ($^{\circ}\text{C}$).

El registrador Dot Logger fue el equipo de la unidad encargado de realizar las lecturas de manera automatizada y almacenar los datos desde cada uno de los sensores, registrando las 3 variables antes mencionadas para cada uno de los 3 sensores de la unidad, dando como resultado una base de datos en donde una lectura periódica proporcionó 9 registros en total.

Para el desarrollo del software, se tomó la decisión de utilizar la plataforma de desarrollo Microsoft .Net Framework 2.0, empleando el lenguaje de programación C#. El motor de base de datos seleccionado fue Microsoft Access Database Engine, por su simple utilización y disponibilidad.

El equipo para el desarrollo del software fue un computador portátil con sistema operativo Microsoft Windows 7 SP1.

Método

Obtención de datos fuente

La primera parte del trabajo consistió en la obtención de datos reales desde las unidades instaladas en campo, a partir de mediciones que se realizaron de manera automatizada y periódica por el registrador de datos Dot Logger de cada unidad. Este dispositivo almacenó las lecturas de cada sensor Hydra Probe de la unidad en 3 canales independientes, uno para cada variable. En total, para una unidad Hydra Probe completa, cada lectura de datos se compuso de 9 canales.

Las lecturas automatizadas se realizaron en intervalos de tiempo que comprendieron los 30 y los 60 minutos. Esto no fue constante para ambos sitios, ya que por necesidades particulares este intervalo fue cambiado. Sin embargo, para efectos del objetivo del desarrollo del presente trabajo, esta situación no tiene mayor relevancia.

La salida de cada unidad correspondió a un archivo de texto plano, para cada unidad como se describe a continuación en el Cuadro 2:

Cuadro 2. Periodos de captura de datos para cada unidad

Unidad	Periodo de captura
Unidad 1 Sector Chamonate	Junio 2011 hasta agosto 2012
Unidad 2 Sector Tierra Amarilla	Junio 2011 hasta marzo 2013



Figura 1. Unidad Hydra Probe instalada en campo

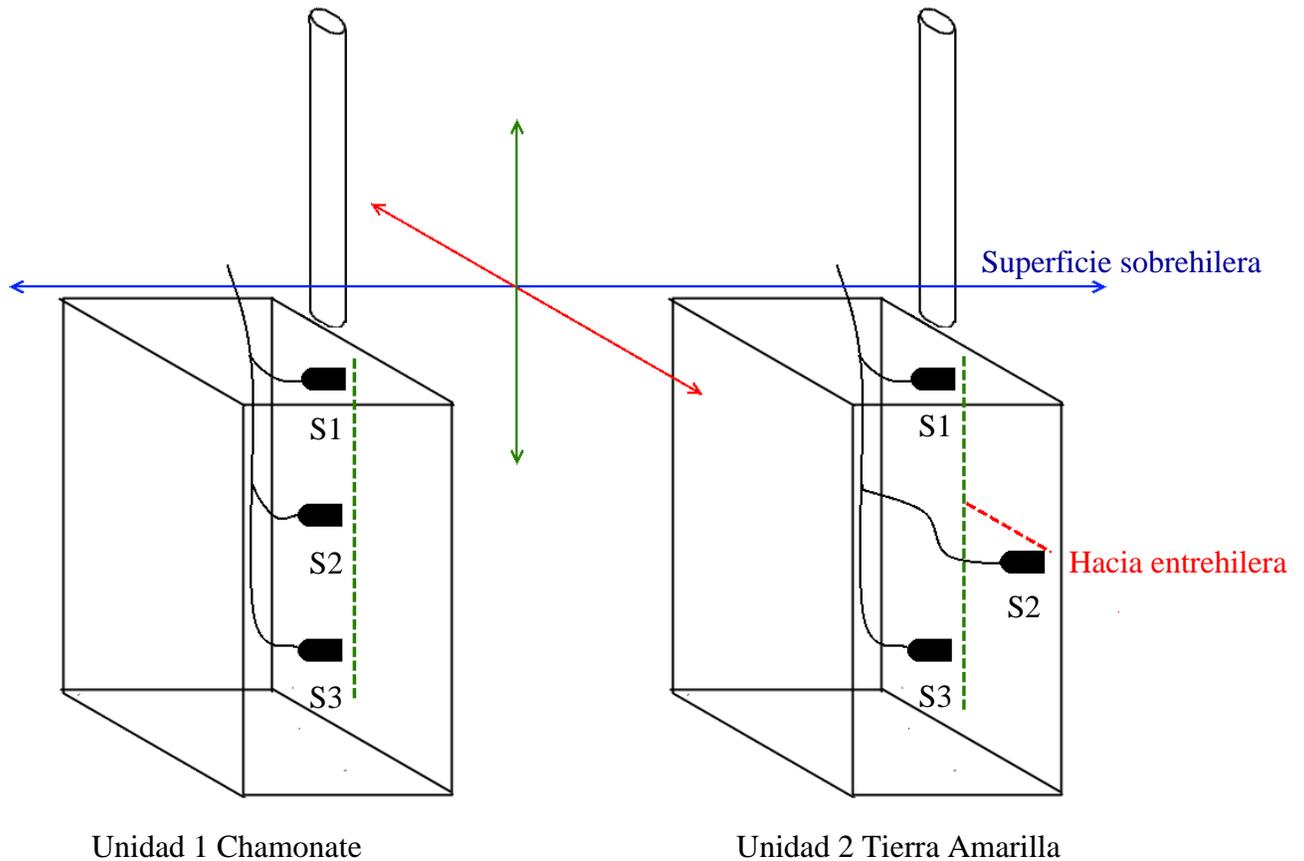


Figura 2. Disposición de los sensores para cada unidad

La disposición de los sensores se indica en la Figura 2. En la unidad 1, los sensores fueron insertos en el perfil del suelo a profundidades de $S1 = 30$, $S2 = 60$ y $S3 = 90$ cm, sobre el eje vertical ortogonal a la superficie del suelo, con S1 y S2 insertos en la zona donde se concentra la mayor cantidad de raíces, mientras que S3 inserto donde ya no hay cantidad importante de ellas. S1 se utilizó como marcador de inicio del riego, S2 como señalizador de avance en el tiempo del frente de mojamiento y S3 como el sensor indicador del fin de riego. Los objetivos de la disposición fueron: 1) sensores S1 y S2, programar los riegos (frecuencia de riego) basándose en la información sumada de ambos sensores; 2) Sensor S3, programar el tiempo de riego en función de la información aportada en la zona de baja densidad de raíces; este sensor, inserto fuera de la zona de masa de raíces indica el agua que llega a dicha profundidad y permite establecer un control sobre la percolación profunda, la lixiviación de fertilizantes y la evolución de la conductividad eléctrica de la masa de suelo durante los eventos de riego.

Los sensores de la unidad 2 fueron dispuestos en las mismas profundidades que los sensores de la unidad 1, sin embargo, el sensor S2 fue desplazado 90 cm desde el eje vertical ortogonal a la superficie del suelo en dirección a la entrehilera, con el objeto de detectar el posible movimiento del bulbo de mojamiento y si el volumen de agua aplicado tendría algún efecto sobre el desplazamiento de las sales, señalado como una variación de la conductividad eléctrica de la masa de suelo durante y tras los eventos de riego.

Diseño de la aplicación

Para proceder a llevar estos datos a información, el primer paso necesario fue la creación de una base de datos estructurada; para ello, las unidades Hydra Probe se colocaron en condiciones de campo a capturar datos y luego de ello, estos datos se estructuraron en una base de datos Microsoft Access de estructura simple, que permitiera ser actualizada de manera incremental y transportada de manera sencilla.

Luego de determinar la estructura de los datos capturados en condiciones de campo, se diseñó un primer componente que se encargó de llevar los datos desde el texto plano a una base de datos estructurada. Este componente fue responsable de crear y actualizar la base de datos bajo criterios de validación de los datos de origen, descartando datos duplicados, inválidos o que no corresponden al registrador de datos de interés.

Con estos datos estructurados, se procedió a diseñar la presentación gráfica que cumpla con los requerimientos necesarios para brindar información para la toma de decisiones en las variables de interés que el sensor Hydra Probe ofrece; contenido volumétrico de agua y conductividad eléctrica de la masa de suelo.

Analizando el trabajo de Intrigliolo y Castel (2004) y los métodos mencionados por Hanson *et al.* (2000) relativos al seguimiento continuo del agua en el suelo como herramienta para la gestión del riego, el diseño de la presentación de los datos consideró los siguientes requerimientos:

1. Graficar el contenido volumétrico de agua en el suelo en el tiempo para cada sonda conectada al registrador de datos, con la capacidad de aumentar o disminuir el intervalo de tiempo mostrado.
2. Graficar el contenido volumétrico de agua de manera agregada para todas las sondas conectadas al registrador de datos y que sean de interés en un perfil de suelo.
3. Graficar la evolución de la conductividad eléctrica de la masa de suelo en el tiempo.
4. Permitir la realización de mediciones para una misma variable entre intervalos de tiempo.
5. Permitir la observación de múltiples gráficos simultáneamente.
6. Permitir el ingreso manual de otras variables, como la evapotranspiración o el agua aportada por la precipitación.

En base a los criterios antes señalados, se creó un bosquejo de la interfaz de usuario, el que se describe a continuación (Figura 3):

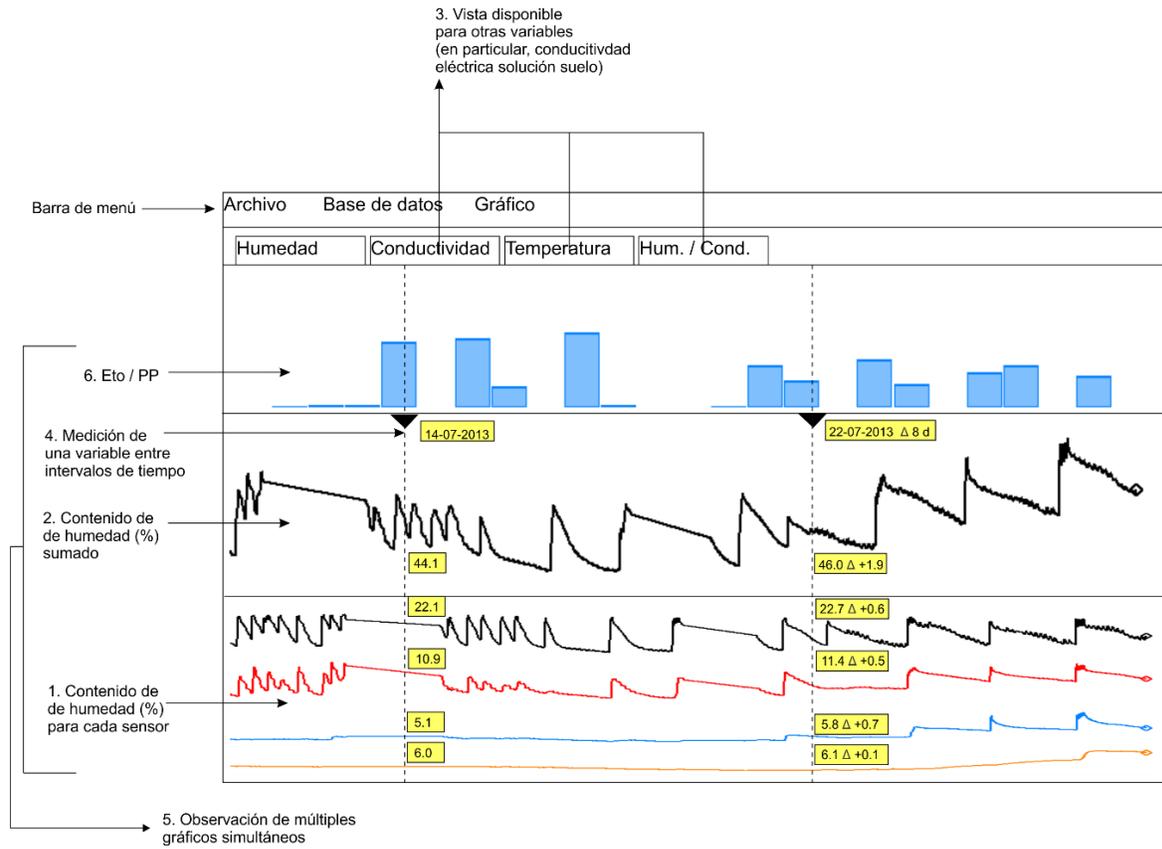


Figura 3. Bosquejo de la interfaz gráfica a desarrollar.

A partir de este bosquejo, se establecieron los siguientes puntos que permitieron direccionar el desarrollo de la aplicación (Cuadro 3):

Cuadro 3. Requerimientos de la aplicación.

Requerimiento	Objetivo	Desarrollo concreto
Graficar el contenido volumétrico de agua en el suelo en el tiempo	Proporcionar información que permita determinar tiempo de riego	Gráfico apilado
Graficar el contenido volumétrico de agua de manera agregada para todas las sondas	Proporcionar información que permita determinar frecuencia de riego	Gráfico ponderado
Graficar la evolución de la conductividad eléctrica de la masa de suelo en el tiempo	Proporcionar información que ayude a determinar si la conductividad eléctrica de la masa de suelo es adecuada o si se requiere atención	Gráfico de conductividad eléctrica de la masa de suelo en el tiempo
Permitir la realización de mediciones para una misma variable entre intervalos de tiempo	Obtener información inmediata y de manera simple sobre las variaciones de una variable en un intervalo de tiempo	Reglas verticales con etiquetas que muestran valores instantáneos y la diferencia temporal y de magnitud entre ellos
Permitir la observación de múltiples gráficos simultáneamente	Visualizar efectos globales, locales o comparativos entre variables	Vistas muestran por defecto gráfico de sensores independientes, agregado y una vista especial muestra contenido de agua y conductividad eléctrica de la masa de suelo simultáneamente
Permitir el ingreso manual de otras variables, como la evapotranspiración o el agua aportada por la precipitación	Cotejar el comportamiento del contenido de agua del suelo en relación a variables externas.	Mediante un editor de datos externo es posible ingresar valores de ETo y precipitación (PP) y visualizarlos.

RESULTADOS

Datos fuente

Los datos fuente fueron capturados para los periodos descritos en el Cuadro 2 y descargados desde el registrador Dot Logger en forma de archivo de texto. Cada línea del archivo de texto entregado por el registrador de datos tiene el formato descrito en la Figura 4.

Identificador de Registrador	Canal	Hora	Fecha	Lectura
20 caracteres	9 caracteres	6 caracteres	4 caracteres	14 caracteres

Figura 4. Formato de cada línea de datos descargada desde el registrador Dot Logger

Durante el periodo de captura de datos, hubo periodos en que no se capturaron datos producto de la descarga de la batería que alimentó a cada una de las unidades. Para estos intervalos, la aplicación muestra una discontinuidad en el gráfico, haciendo notar la ausencia de éstos.

Otro desafío que se enfrentó fue el manejo de datos fuente incompletos o corruptos, los que se descartan bajo las siguientes condiciones:

- La línea de datos de origen tiene una longitud distinta a los 56 caracteres.
- El Identificador de Registrador no corresponde al seleccionado en el proceso de carga hacia la base de datos.
- La fecha tiene un valor o formato incorrecto.
- La hora tiene un valor o formato inválido.
- La lectura no es un valor numérico.

Estructura de la base de datos

Los datos se estructuraron en 4 tablas principales: a) la tabla “datos”, que almacena cada lectura de los sensores por fecha, hora y canal, b) la tabla “riego”, c) la tabla “precipitaciones” y c) la tabla “ETo”, estas tres últimas de ingreso manual, que permiten registrar por fecha y hora los milímetros de entrada y salida generados por los eventos de riego, precipitación y evapotranspiración potencial, según corresponda.

Mediante las 4 tablas descritas fue posible generar una estructura global de las variables frecuentemente disponibles en las explotaciones agrícolas comerciales y que resultan de interés para la gestión del riego.

Cada ciclo de captura de datos realizado periódicamente por el registrador Dot Logger, envía comandos a cada sensor Hydra Probe solicitando lectura de las variables contenido de agua del suelo (WFW), conductividad eléctrica de la masa de suelo (CE) y temperatura de suelo (Ts). Cada lectura de las variables genera una línea en el archivo de datos del

registrador Dot Logger. Al descargarse este archivo de datos y procesarse mediante el software HydraPlot, se almacena en la tabla de datos un registro con fecha, hora, canal y lectura por cada línea válida desde el archivo de texto de salida del registrador Dot Logger.

Diseño de la interfaz

El componente principal de la interfaz de usuario es el panel de gráficos con capacidad de presentar simultáneamente y de manera sincronizada múltiples gráficos de línea y barras para presentar información desde los datos del contenido de agua del suelo, conductividad eléctrica de la masa de suelo, temperatura y de las variables auxiliares, evapotranspiración, precipitación y riego. Para este objetivo, se utilizó como base el componente ZedGraph. Este componente fue ajustado para las necesidades propias de la aplicación, incorporando 3 modificaciones esenciales para cumplir con los objetivos del presente trabajo (véase Figura 5):

- Capacidad para mostrar múltiples datos desde sensores ordenados visualmente por un criterio arbitrario, asociado por lo general con la profundidad en la cual los sensores fueron instalados. Esto se define como capacidad de “apilar” el gráfico.
- Capacidad para mostrar intervalos de ausencia de información (discontinuidad temporal de los datos) como espacios “en blanco”, en vez de una interpolación lineal entre un punto y el siguiente, entregando así información respecto a los momentos en que la captura de los sensores se interrumpió.
- Capacidad para realizar mediciones entre intervalos de tiempo mediante reglas verticales.

Estas modificaciones fueron completadas e integradas como versión alternativa de ZedGraph a la aplicación.

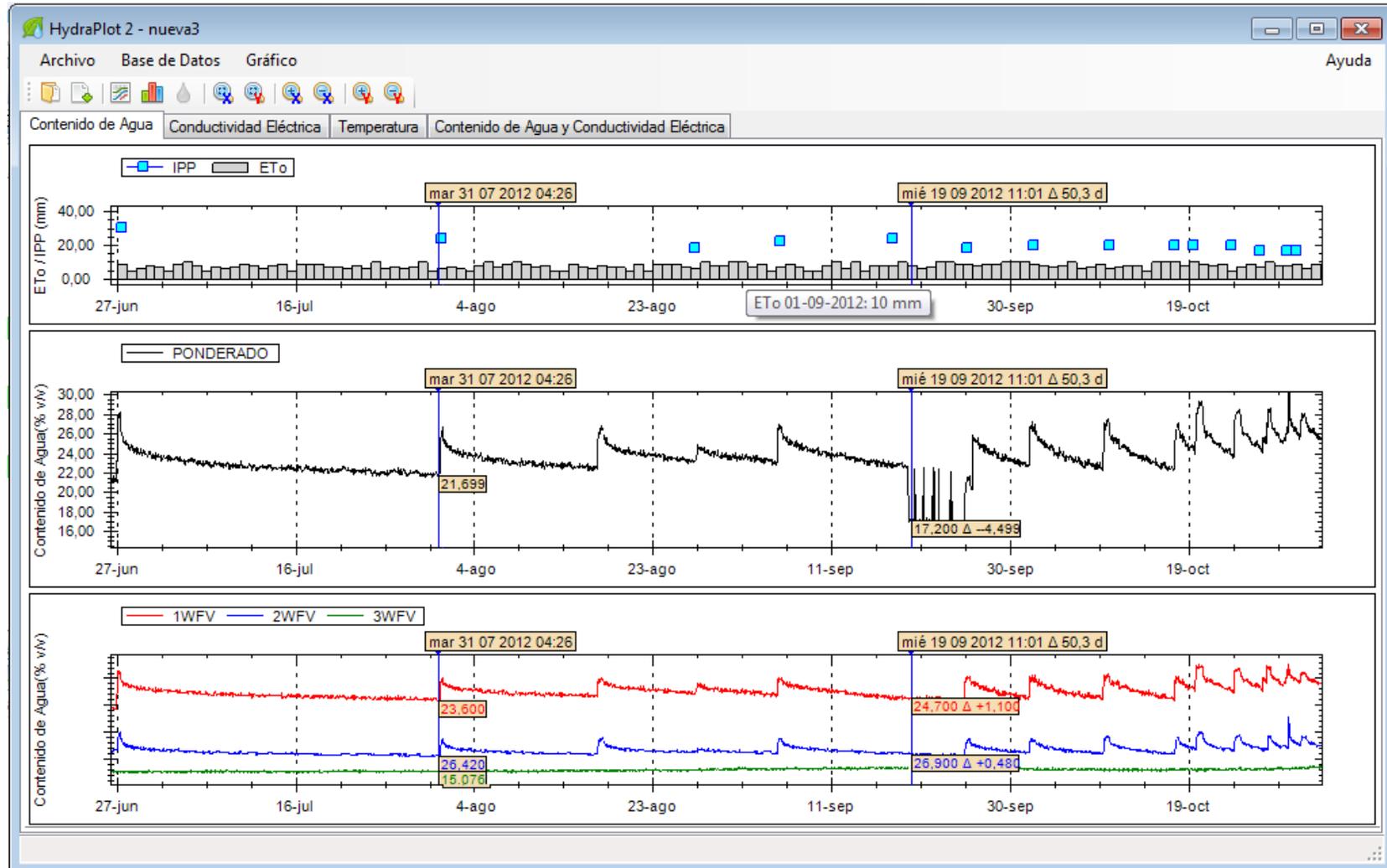


Figura 5. Interfaz gráfica desarrollada

Los componentes de la interfaz de acuerdo a los requerimientos se describen a continuación:

Gráfico del contenido de agua del suelo por sensor

Es un gráfico independiente (Figura 6) que permite visualizar la evolución del contenido volumétrico de agua en el suelo en función del tiempo para cada sensor de interés. El contenido de agua del suelo es presentado como valor porcentual, que es la lectura directa que entrega el sensor Hydra Probe.

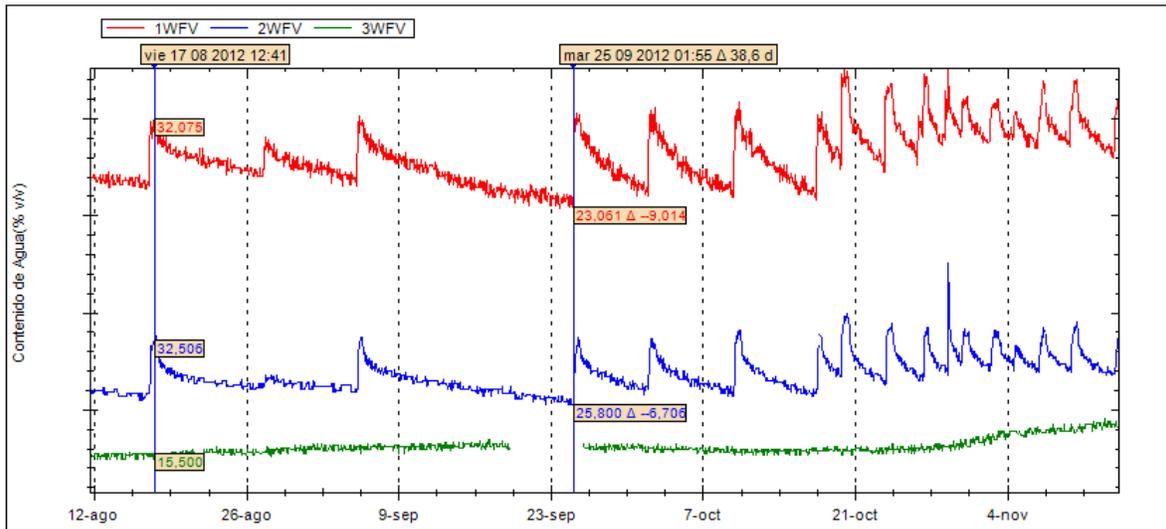


Figura 6. Gráfico del contenido de agua del suelo medido por el sensor.

Los sensores pueden ser apilados, lo que significa que cada gráfico de línea es ordenado visualmente desde la parte inferior del área de trazado hacia la parte superior en función de su orden en el perfil de suelo, que generalmente está asociado a la profundidad en la cual cada sensor fue colocado. Esto permite hacer una relación visual entre los sensores más superficiales y los más profundos.

Gráfico del contenido de agua de manera agregada

Permite la observación de los valores de cada uno de los sensores de manera agregada, como un promedio del efecto de cada sensor o bien como un valor ponderado en función de la profundidad de cada sensor (Figura 7). Para este último caso se asumen que cada sensor representa una sección del perfil comprendida entre la profundidad del sensor anterior (0 si se trata del primer sensor) y la profundidad en la cual el sensor está inserto. Esto significa que mientras mayor sea este diferencial, el peso relativo del sensor en el promedio es mayor. La ecuación empleada para el cálculo del valor ponderado fue la siguiente:

$$\theta_p = \frac{1}{\Delta z_1 + \Delta z_2 + \Delta z_3 + \dots + \Delta z_n} (\Delta z_1 \theta_{S1} + \Delta z_2 \theta_{S2} + \Delta z_3 \theta_{S3} + \dots + \Delta z_n \theta_{Sn}) \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Donde:

θ_p := Contenido de agua ponderado para los sensores seleccionados en el perfil

Δz_n := Diferencia de profundidad entre el sensor anterior (n-1) y el siguiente (n)

θ_{Sn} := Contenido volumétrico de agua registrado por el sensor S_n

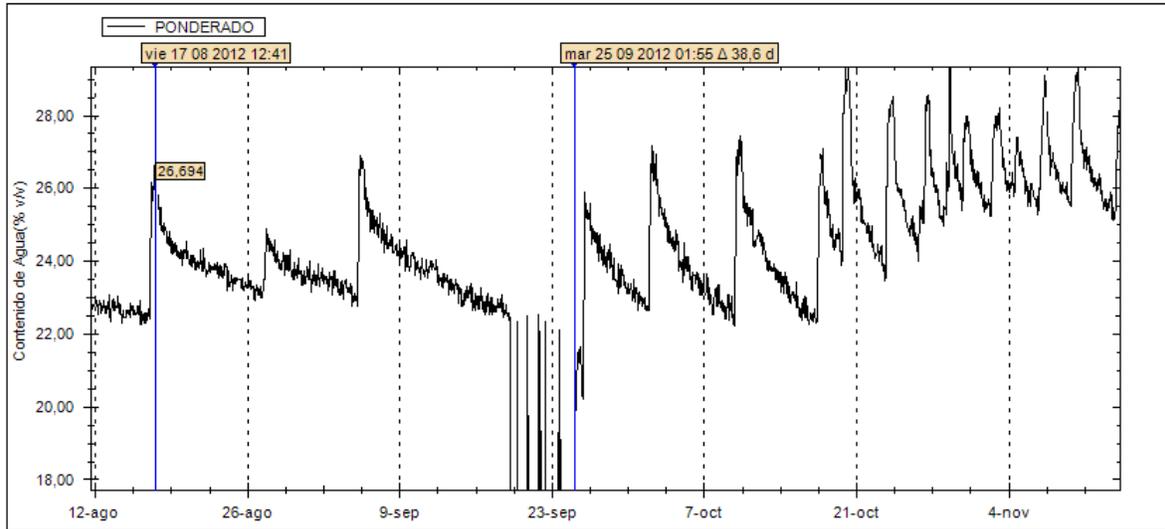


Figura 7. Gráfico del contenido volumétrico de agua ponderado

Los sensores de interés pueden ser seleccionados de manera individual. Esto quiere decir que si hay un sensor que no aporta información relevante en cuanto al contenido de agua, por ejemplo, de la zona de raíces, éste puede ser retirado del gráfico.

Gráfica de la evolución de la conductividad eléctrica de la masa de suelo

Presenta la evolución de la conductividad eléctrica de la masa de suelo medida por las sondas en función del tiempo en unidades dS m^{-1} .

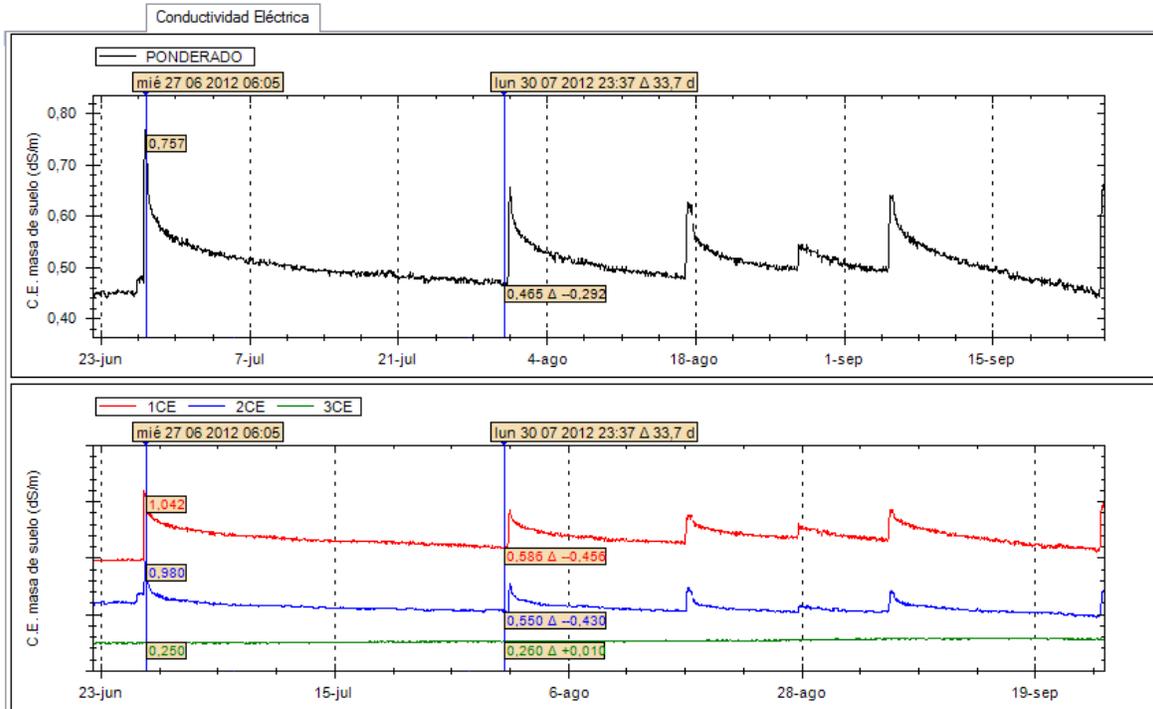


Figura 8. Gráfico de la evolución de la conductividad eléctrica de la masa de suelo en el tiempo

El gráfico de la Figura 8 muestra el comportamiento de cada sensor, al igual que en el caso del contenido volumétrico de agua, de manera independiente y agregada, ponderando cada sensor en función de su profundidad, empleando la misma Ecuación 1, reemplazando los valores de contenido volumétrico de agua θ_{Sn} por los valores de conductividad eléctrica de la masa de suelo CE_{Sn} .

Cabe señalar que el valor de conductividad eléctrica entregado por la sonda Hydra Probe corresponde al efecto de la fase sólida del suelo y los solutos disueltos que se encuentran en él; al haber mayor cantidad de agua en el suelo y mientras existan solutos por disolver, el valor de la conductividad eléctrica aumentará.

Medición de una misma variable entre intervalos de tiempo

Permite la observación de diferencias entre valores de una misma variable en el tiempo, mediante reglas verticales que se pueden desplazar. Resulta de utilidad para determinar numéricamente las variaciones temporales de las lecturas realizadas por los sensores. Se presenta como un delta de valores en horas y días para el eje X y como un delta de valores en las unidades que corresponda (porcentaje, $dS\ m^{-1}$ o $^{\circ}C$) para el eje Y.

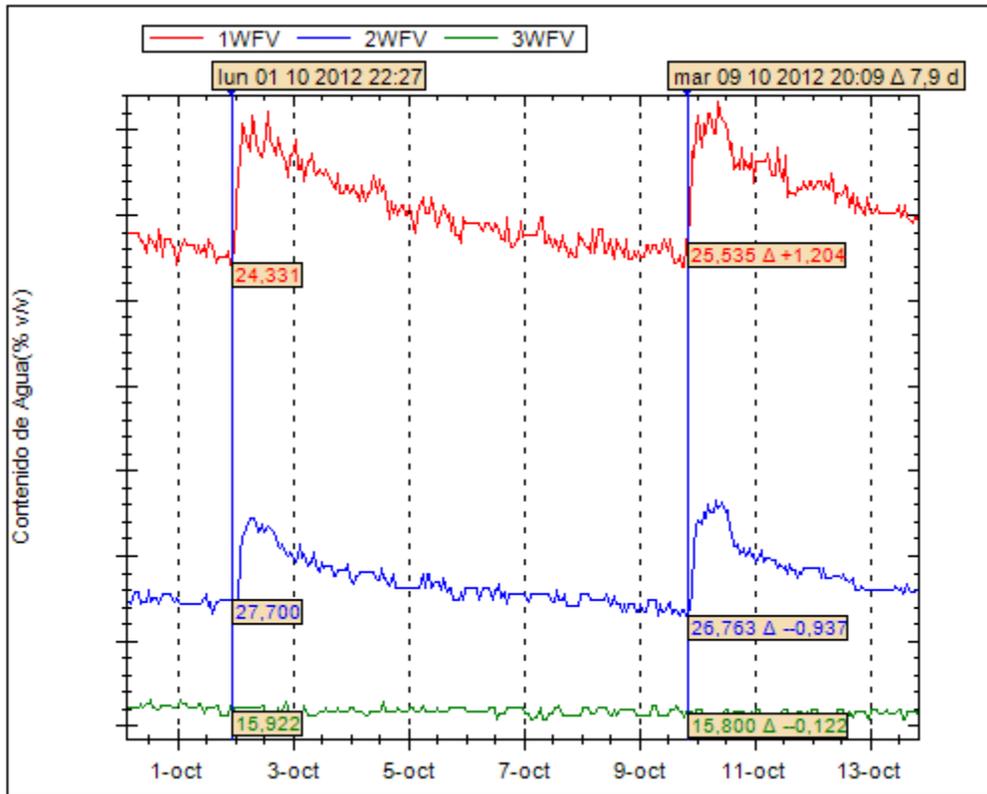


Figura 9. Uso de reglas verticales para determinar variaciones de magnitudes en el eje X e Y.

Con la visualización de la Figura 9 es posible determinar el tiempo entre eventos de riego (frecuencia de riego) y el efecto que ha tenido cada uno de ellos sobre el perfil y sobre el total.

En la Figura 10 es posible observar que el evento de riego registrado por la unidad el día martes 9 de octubre de 2012 a las 18:54 aproximadamente (sensor 1WFV muestra variación significativa en sus lecturas) tuvo una duración aproximada de 14,1 horas, incrementando los valores de contenido de agua en el suelo en un 9,7 y 5,9 % en los sensores 1WFV y 2WFV, sin tener mayor efecto sobre el sensor 3WFV.

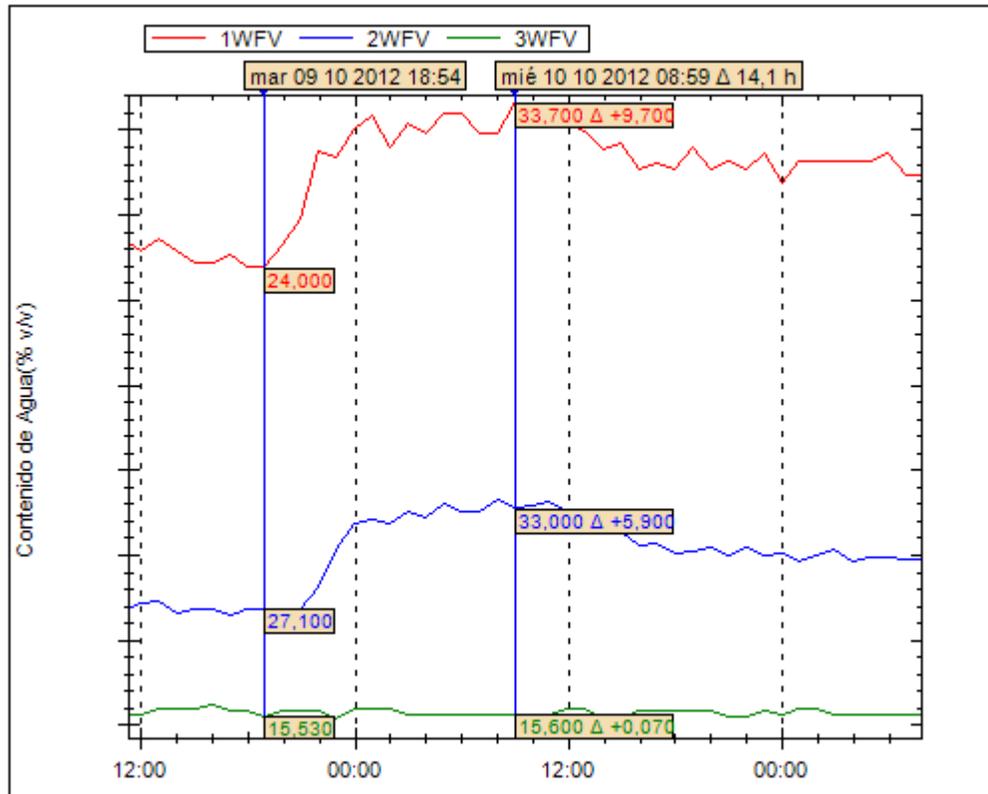


Figura 10. Uso de reglas verticales para determinar duración aproximada de evento de riego

Otro ejemplo de uso de las reglas verticales es la determinación del tiempo que tarda el frente de mojamiento en avanzar entre un sensor y otro. En la Figura 11, se puede apreciar que el tiempo que tardó el frente de mojamiento en llegar a la zona de medición del segundo sensor fue de aproximadamente 2 horas.

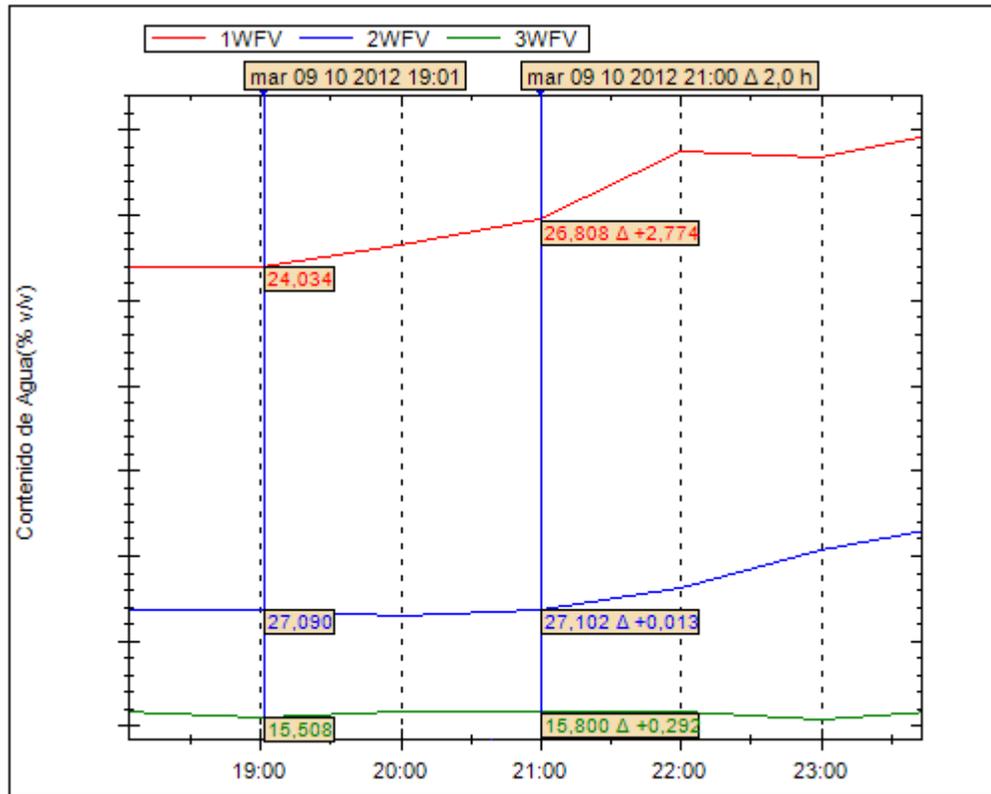


Figura 11. Uso de reglas verticales para determinar tiempo aproximado que tardó el frente de mojamiento en alcanzar los sensores de la unidad.

Observación de gráficos simultáneos

Permite visualizar los gráficos referenciales y de ingreso manual “ETo”, “precipitaciones y riego” de manera simultánea a otros gráficos (Figura 12).

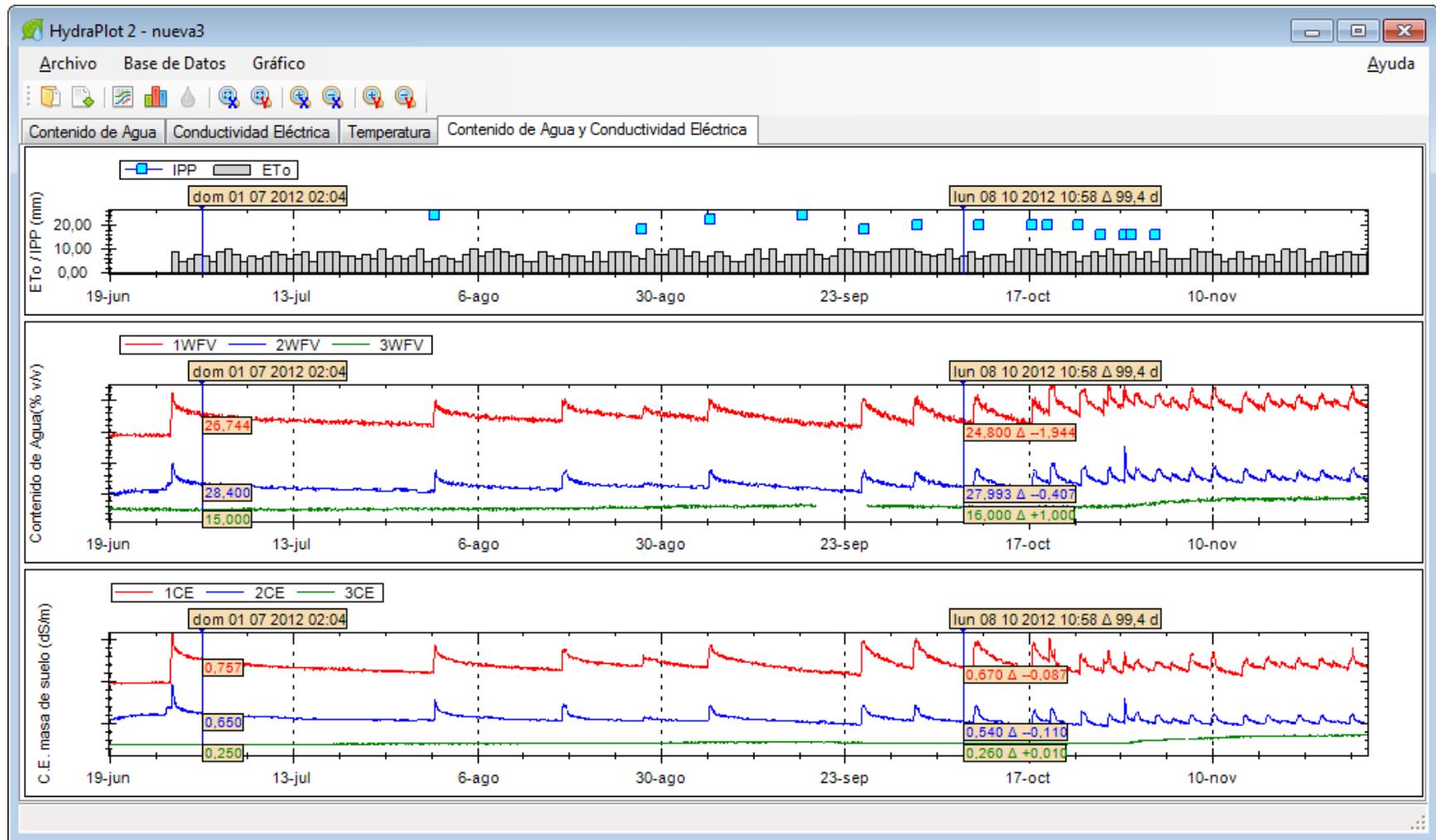


Figura 12. Gráficos simultáneos de evapotranspiración potencial (ETo), riego y precipitación (IPP), contenido de agua del suelo y conductividad eléctrica de la masa de suelo.

Ingreso manual de otras variables (ET_o, riego y precipitación)

Mediante tablas auxiliares, es posible ingresar la evapotranspiración potencial ET_o en mm y el aporte del riego y la precipitación en mm (indicado como IPP en la leyenda del gráfico).

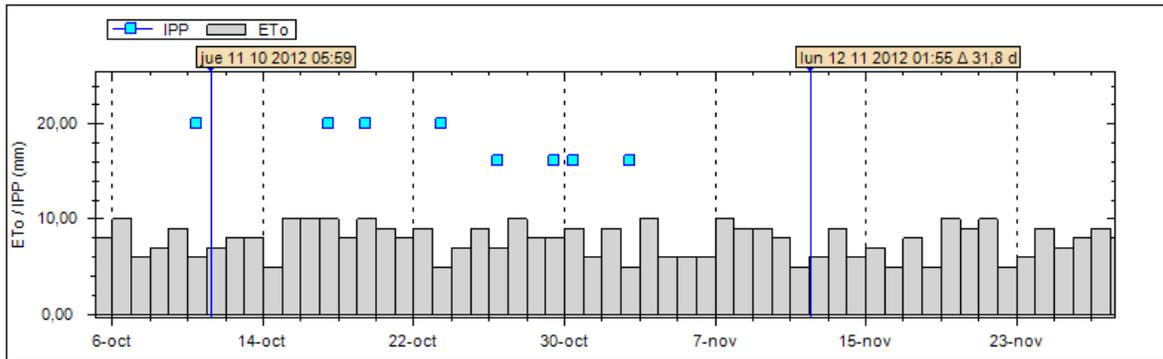


Figura 13. Gráfico complementario de evapotranspiración, riego y precipitación.

DISCUSIÓN

Análisis de los datos de las unidades instaladas

Unidad 1 sector Chamonate

La unidad 1 se encontró en una situación de moderada conductividad eléctrica de la masa de suelo para el periodo junio 2011 – agosto 2012, con un promedio de $0,51 \text{ dS m}^{-1}$ ($CE_{S1} = 0,65$, $CE_{S2} = 0,62$ y $CE_{S3} = 0,27$). Estos valores están dentro de los rangos en los cuales Seyfried y Murdock (2004) afirmaron que el sensor Hydra Probe estaría midiendo contenidos de agua del suelo con exactitud (Figura 14).

El gráfico de la evolución del contenido de agua del suelo y la conductividad eléctrica de la masa de suelo para el periodo 2011 – 2012 (Figura 15), muestra que para el periodo julio 2011 – julio 2012 el sensor S1 no registró los eventos de riego, los que sí aparecen parcialmente en el sensor S2. Esto puede deberse a que la línea de goteo se haya desplazado del eje de los sensores.

Tomando como línea base de umbral de riego la situación de contenido de agua para el día 27-06-2012, justo antes del primer evento de riego de la temporada 2012 – 2013 (Figura 16), se puede establecer como umbrales los contenidos de agua $UR_{S1} = 20,34\%$, $UR_{S2} = 28,7\%$, $UR_{S3} = 15,0\%$. Considerando 24 horas después del riego (inicio 27-06-2012 0:00 horas, tiempo de riego 8 horas) como punto de medición para determinar un valor probable de capacidad de campo (CC), se puede establecer que $CC_{S1} = 29,65\%$, $CC_{S2} = 29,76\%$. El tiempo de riego de 8 horas no fue suficiente para llegar al sensor S3 (90 cm profundidad), lo que en este caso es lo que se persigue, ya que no hay masa importante de raíces en ese

punto; dado que la conductividad eléctrica en ese punto es baja ($0,27 \text{ dS m}^{-1}$ promedio), se puede programar el riego (frecuencia de riego) en función del estatus de agua del suelo medido por los sensores S1 y S2 y teniendo en consideración el sensor S3 como indicador de tiempo de riego (detener el riego cuando este sensor muestre variación, o bien ajustar los tiempos de riego en función de la magnitud de variación del sensor S3).

En la Figura 17 se aprecia como un aumento de la frecuencia de riego entrando en el periodo de máxima demanda (aproximadamente 17-10-2012) produjo un aumento de la conductividad eléctrica de la masa de suelo medida por el sensor S3 de $0,1 \text{ dS m}^{-1}$ (23-11-2012). Esto podría estar explicado por el efecto de la fertilización sobre los extremos del bulbo de mojamiento, considerando que los riegos en la temporada en cuestión no buscaron llegar a la profundidad del sensor S3. Esto se podría apoyar con lo que se observa en la Figura 18, en la que se aprecia que la frecuencia y el tiempo de riego son muy similares a lo que ocurre entre el 17-10-2012 y 23-11-2012, sin embargo ocurre una variación negativa de la conductividad eléctrica de la masa de suelo medida por el sensor S3 ($-0,8 \text{ dS m}^{-1}$), posiblemente porque se dejó de aplicar fertilizantes, dejando al perfil casi en el estado original de conductividad eléctrica en la que se encontraba al 17-10-2012. Esto permite incipientemente, al menos, hacer un seguimiento del efecto de la fertilización o del desplazamiento de sales en función del riego y con ello facilitando las decisiones de riego y fertilización considerando los umbrales seguros para la planta.

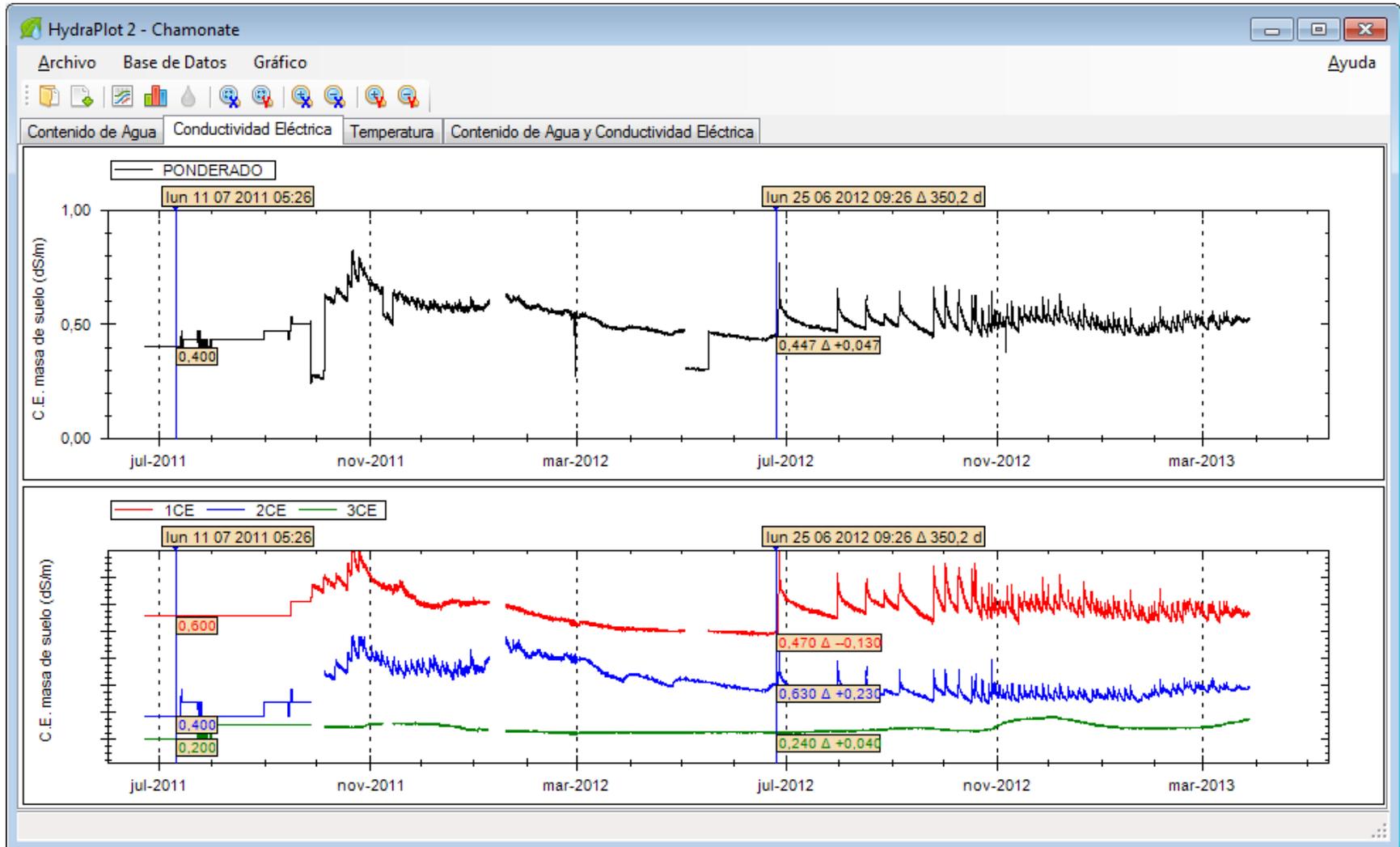


Figura 14. Comportamiento de la conductividad eléctrica de la masa de suelo para la unidad 2.

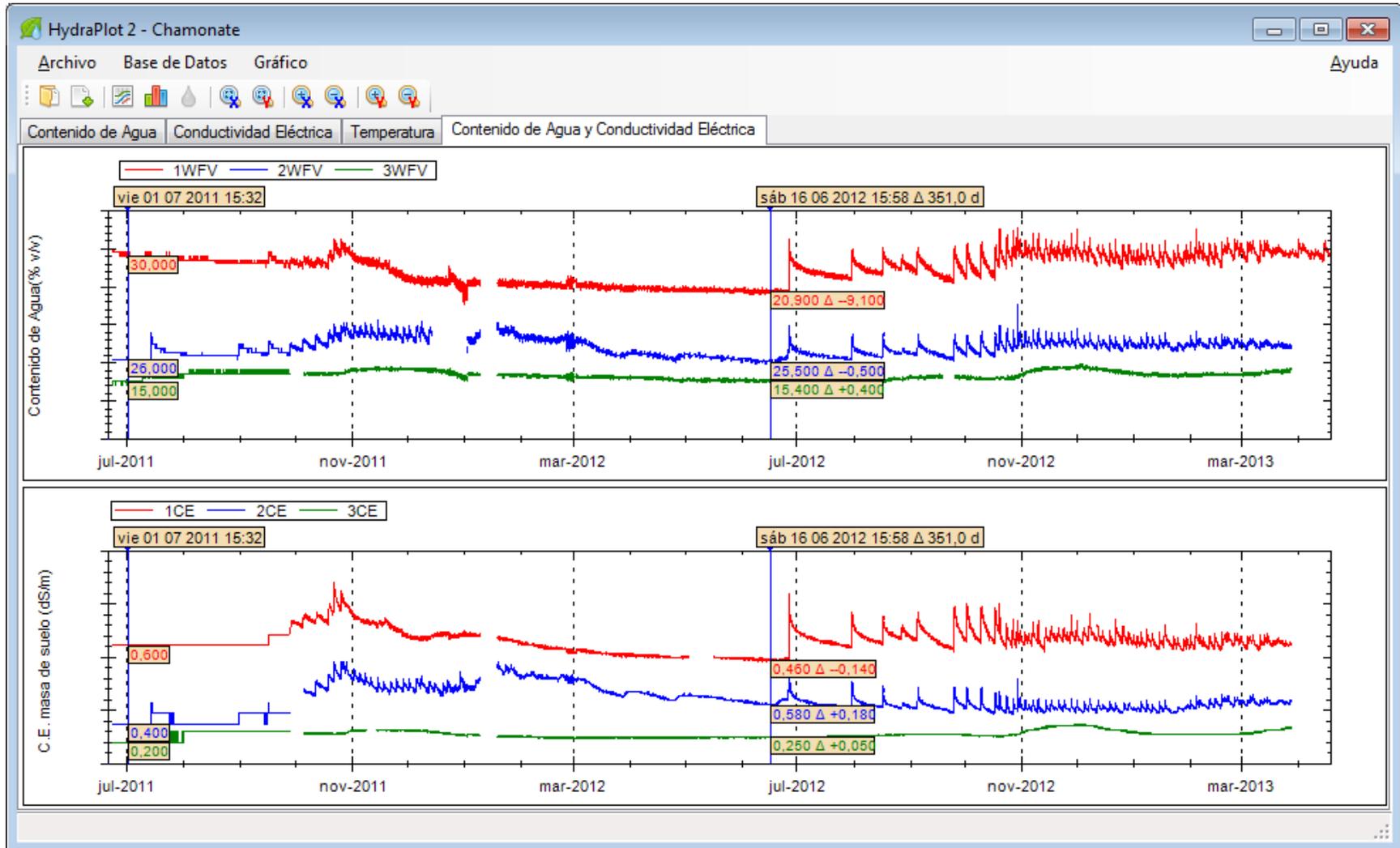


Figura 15. Evolución del contenido de agua en el suelo y la conductividad eléctrica de la masa de suelo para la unidad 2 en el periodo julio 2011 – agosto 2012.

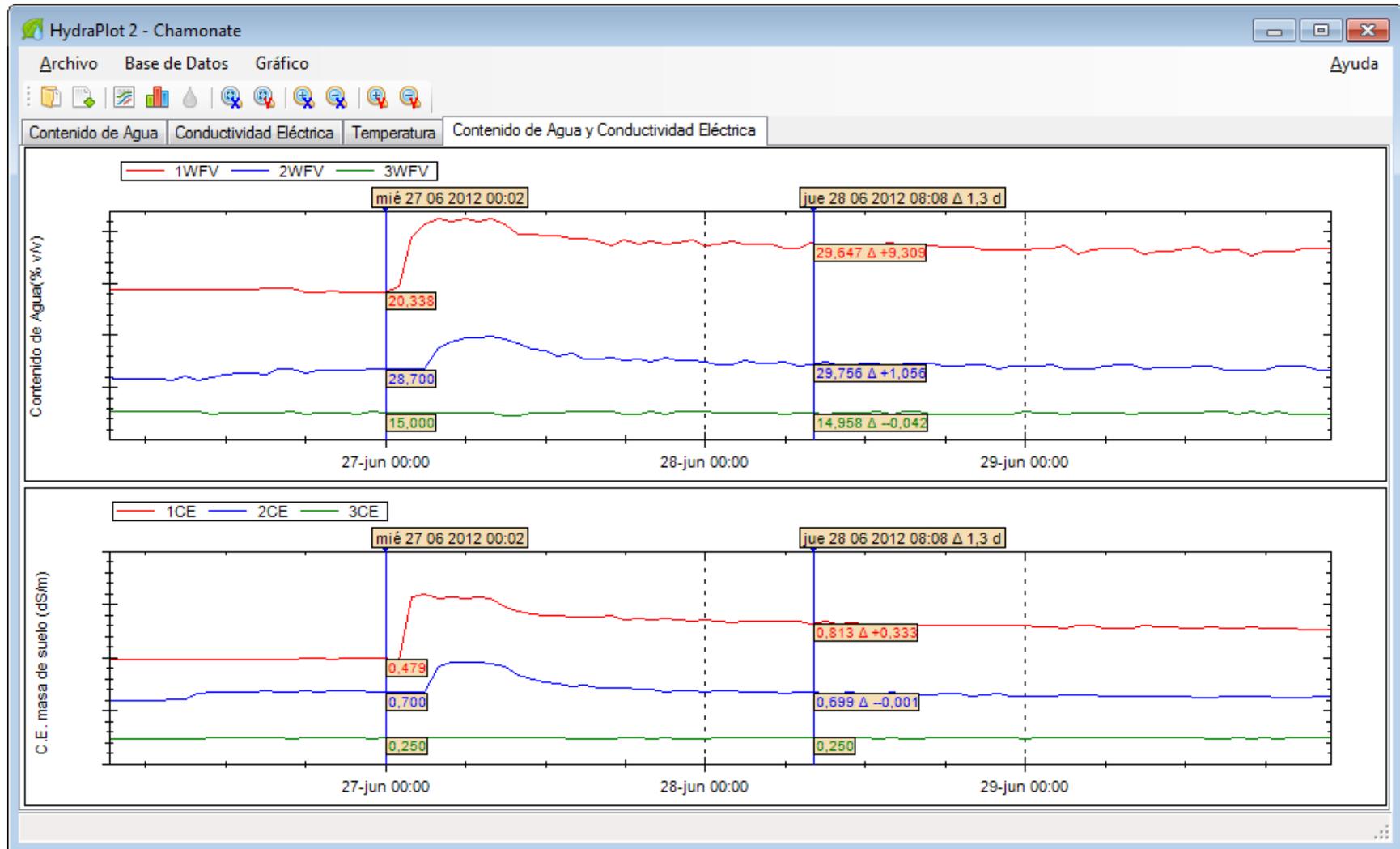


Figura 16. Evaluaciones de contenido de agua y conductividad eléctrica de la masa de suelo antes y después del primer riego de la temporada 2012 – 2013 para la unidad 2.

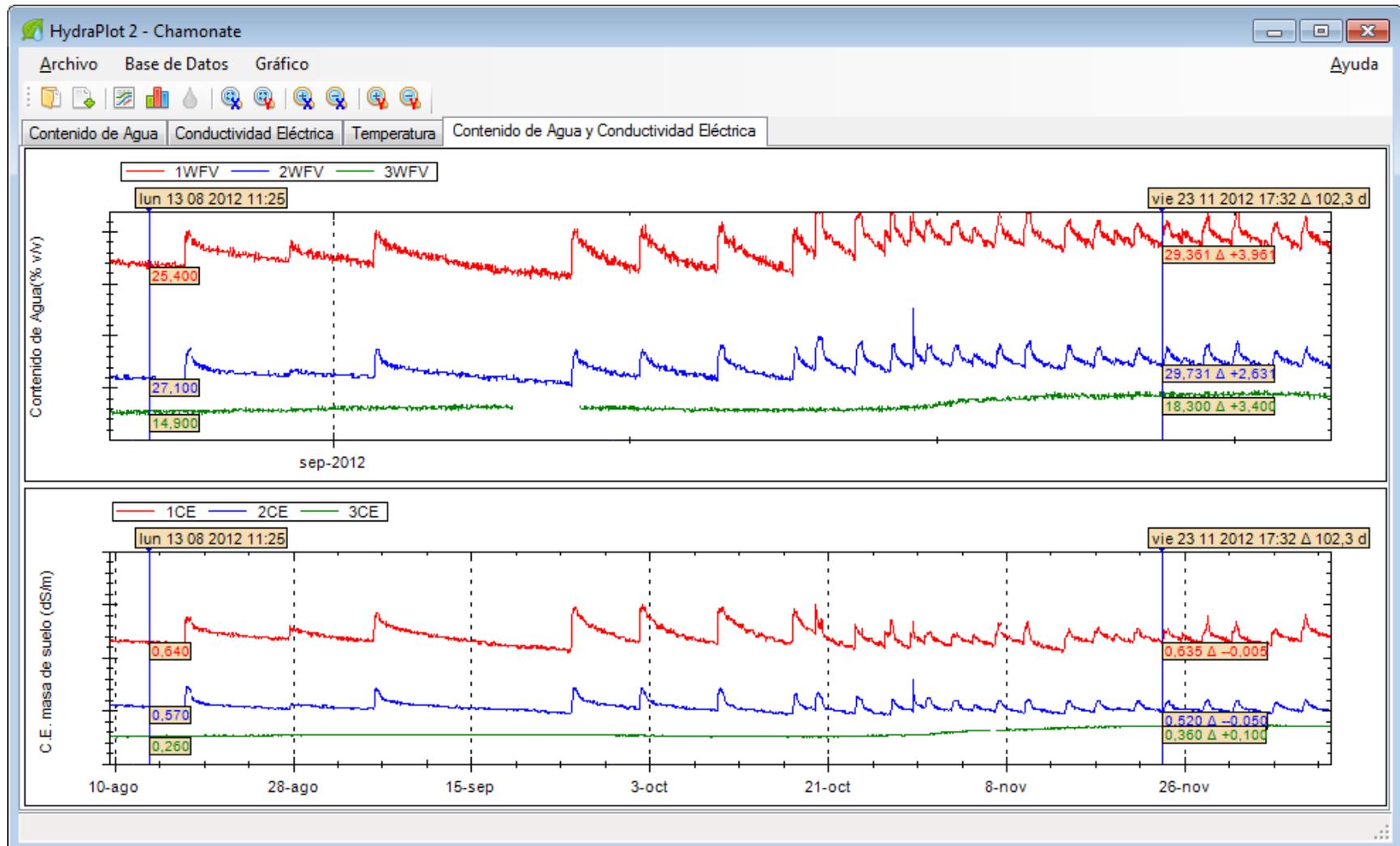


Figura 17. Variación observada de la CE de la masa de suelo en el sensor S3 al aumentar la frecuencia de riego en la unidad 2 al entrar en el periodo de máxima demanda.

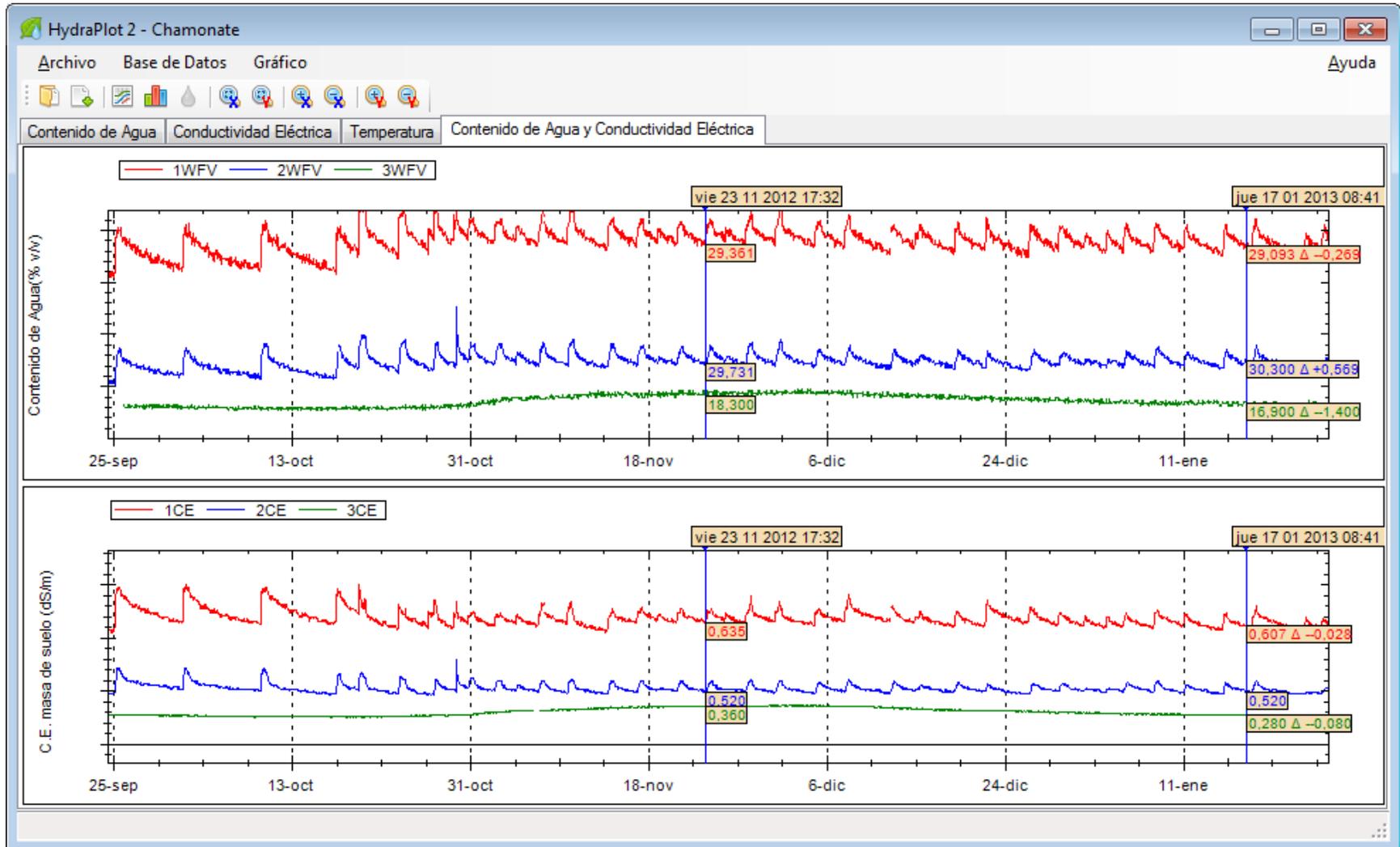


Figura 18. Conductividad eléctrica de la masa de suelo cercano a postcosecha en relación al periodo de máxima demanda y de posible aplicación de fertilizantes.

Unidad 2 sector Tierra Amarilla

La unidad 2 se enfrentó a una situación de alta conductividad eléctrica en el suelo (Figura 19). El análisis de los datos con el software Hydra Plot indicó que en periodo comprendido entre julio de 2011 y agosto de 2012 el promedio de conductividad eléctrica de la masa de suelo fue de $1,63 \text{ dS m}^{-1}$. Los valores promedio para el mismo periodo por profundidad de sensor fueron $CE_{S1} = 0,91$, $CE_{S2} = 1,31$ y $CE_{S3} = 2,67$. De acuerdo a Seyfried y Murdock (2004), los valores de conductividad eléctrica de S2 y S3 estarían afectando la lectura de contenido de agua del suelo. Debido a esto, es posible que exista un grado de sobrestimación de las mediciones de contenido de agua del suelo, especialmente para el sensor S3.

Los valores más bajos de contenido de agua se obtuvieron en julio de 2011 (29-07-2011: $\theta_{S1} = 29,0\%$, $\theta_{S2} = 34,0\%$, $\theta_{S3} = 44,0\%$) y junio de 2012 (24-06-2012 : $\theta_{S1} = 31,6\%$, $\theta_{S2} = 33,0\%$, $\theta_{S3} = 42,0\%$), como se aprecia en la Figura 20. Estos valores parecen consistentes entre ambos años dado que 1) no hay aporte de precipitaciones después de postcosecha 2) la planta se encuentra en receso, por lo que no hay transpiración. Esto permitiría establecer como puntos de umbral de riego para el suelo de la unidad los valores superiores ($UR_{S1} = 31,6\%$, $UR_{S2} = 34,0\%$, $UR_{S3} = 44\%$) de las lecturas de ambos años y con ello iniciar una gestión de la frecuencia de riego en función de los contenidos parciales de cada profundidad de suelo, o bien, mediante el promedio ponderado de los sensores S1 y S2. De esta forma, mediante datos medibles y cuantificables, se permite establecer un criterio de programación del riego para ese suelo y cultivo.

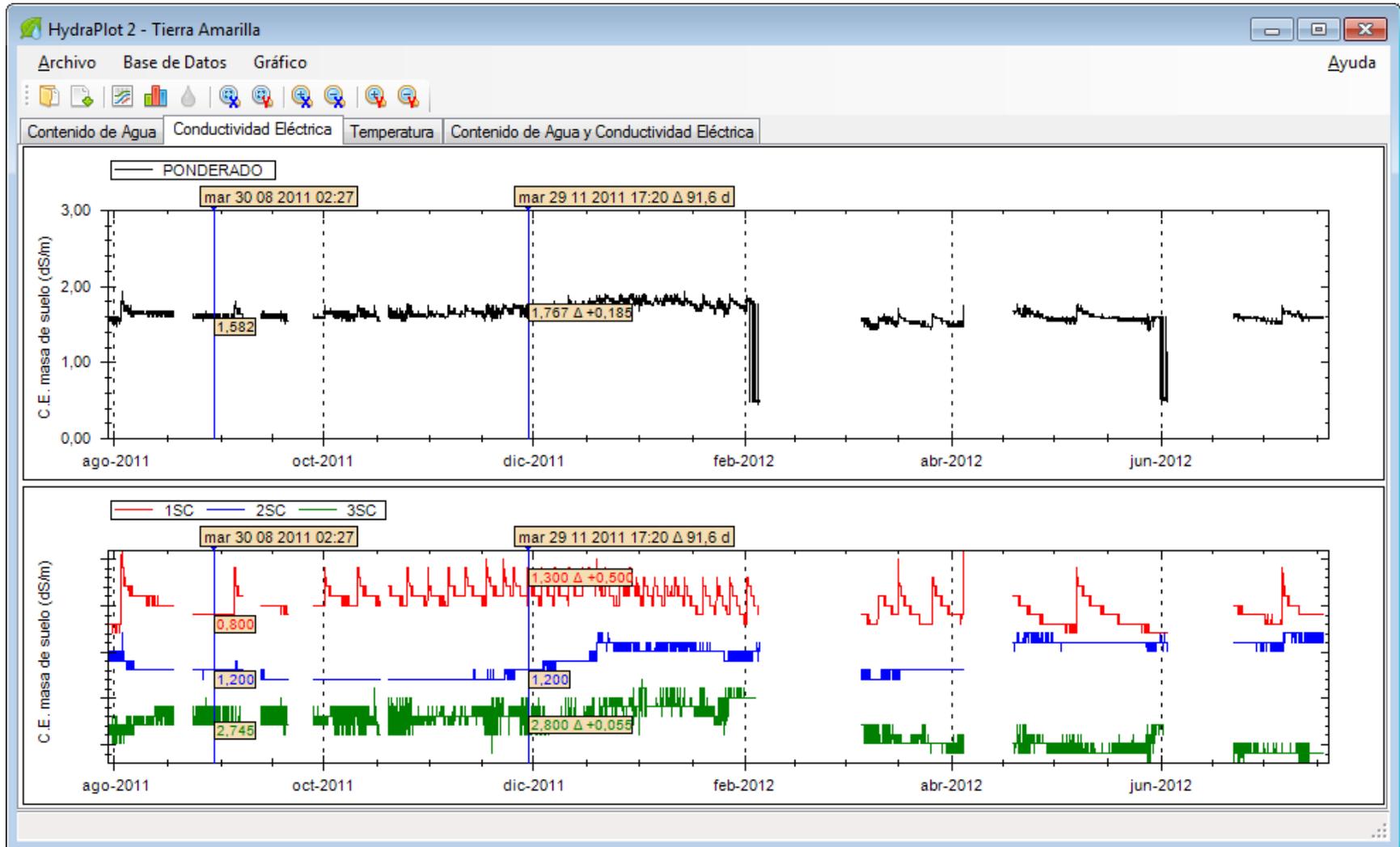


Figura 19. Comportamiento de la conductividad eléctrica de la masa de suelo para la unidad 2.

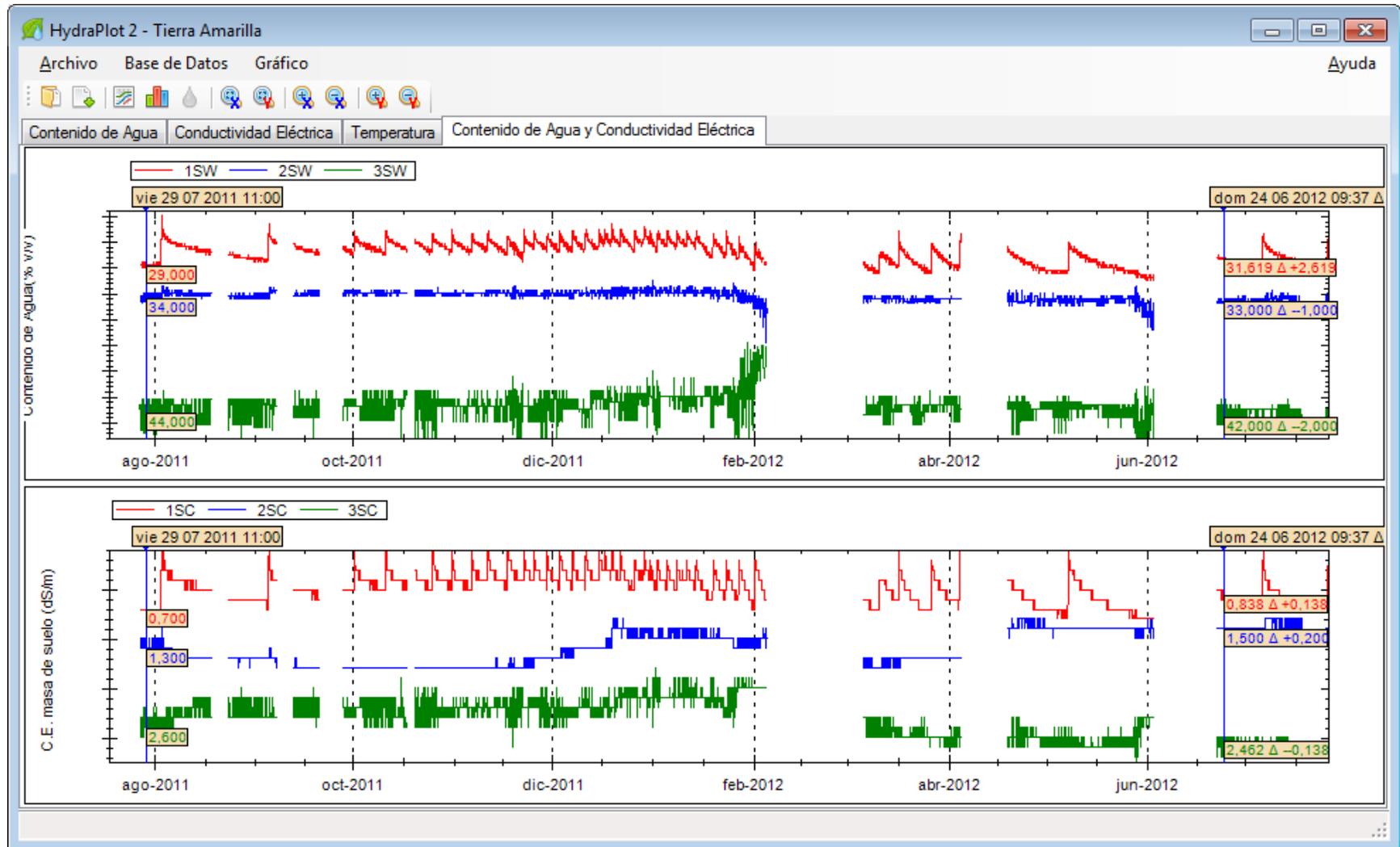


Figura 20. Contenidos más bajos de agua en el suelo observados en receso 2011 y 2012 para la unidad 2.

Consideraciones sobre el sensor Hydra Probe

El desarrollo del presente trabajo permitió observar en mayor detalle el comportamiento de las mediciones continuas realizadas con la sonda Hydra Probe, en las condiciones de terreno, y plantear la discusión sobre ciertos aspectos que la literatura llama la atención, respecto a este tipo de equipos de medición.

De acuerdo al trabajo comparativo entre 8 equipos destinados a la medición del contenido de agua del suelo (Vaz *et al.*, 2013), la sonda Hydra Probe resulta ser una de las sondas menos precisas al momento de comparar las mediciones de agua del suelo del instrumento en relación a los valores medidos por métodos gravimétricos. Lo anterior está asociado al efecto que produce la salinidad del suelo sobre la permitividad medida por el instrumento, resultando en sobrestimaciones sobre el agua en el suelo.

Seyfried y Murdock (2004) señalan que en evaluaciones de laboratorio, para concentraciones de KCl 0,005 M ($\sigma = 0,73 \text{ dS m}^{-1}$) y KCl 0,01 M ($\sigma = 1,42 \text{ dS m}^{-1}$), no hay mayores diferencias en la permitividad medida en relación al agua destilada. Sin embargo, al aumentar la concentración de KCl a 0,02 M ($\sigma = 2,77 \text{ dS m}^{-1}$) se observó una notable variación del valor de la permitividad medida en relación al agua destilada, lo que impacta directamente en el valor medido sobre el contenido de agua del suelo. Mayores concentraciones de KCl entregaron valores de permitividad considerados irreales por el estudio.

Aunque en el presente trabajo no se evaluó la precisión de las mediciones realizadas por el equipo, resulta relevante mencionar estas consideraciones respecto a las mediciones del mismo.

Por otra parte, un aspecto observado al graficar los datos en el software fue el comportamiento oscilante de las mediciones del contenido de agua del suelo, como se ilustra en la Figura 21.

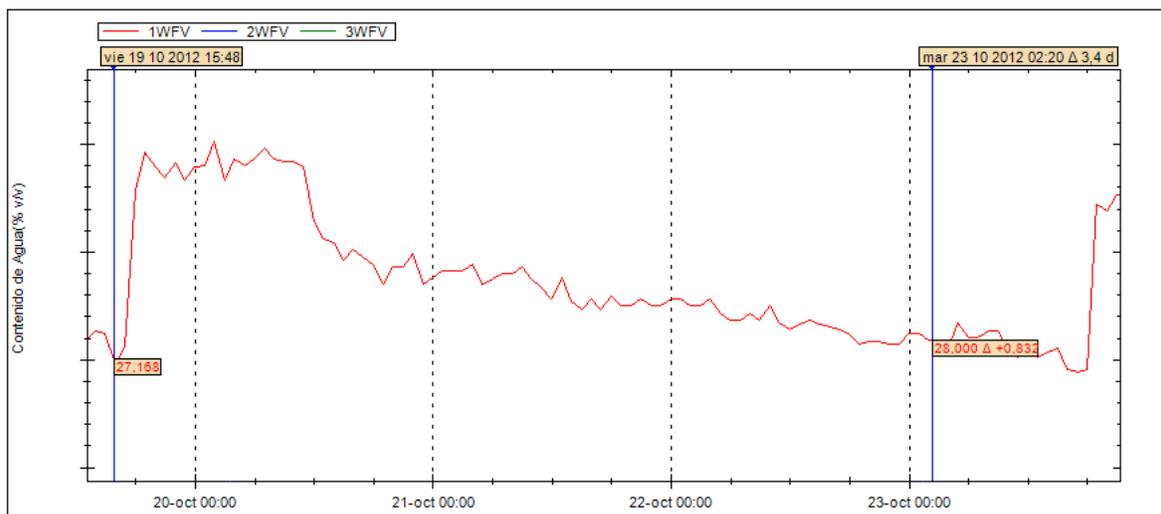


Figura 21. Oscilaciones en mediciones consecutivas realizadas por la sonda Hydra Probe. Al analizar este gráfico en detalle para las mediciones realizadas los días 21 al 23 de octubre y trazar una línea de tendencia, se aprecia que, si bien la tendencia es a la reducción del contenido de agua del suelo, hay oscilaciones entre mediciones consecutivas de un -2,5 a un 7,7%.

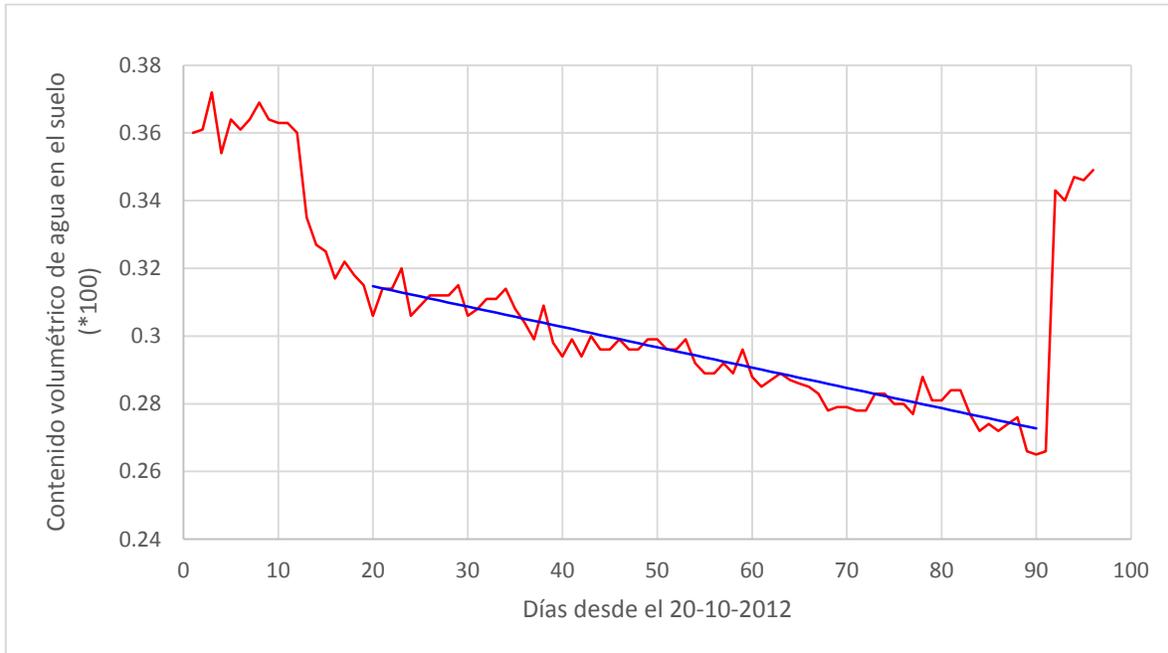


Figura 22. Tendencia de las mediciones realizadas entre el 20 y el 23 de octubre de 2012.

Para mediciones generales del contenido de agua del suelo, esta oscilación entre mediciones consecutivas podría no ser relevante, sin embargo, para efectos de observación de la actividad diaria de la planta, esta variación parece ser suficiente para enmascarar la extracción de agua por parte de la planta en el ciclo diario.

Esta oscilación podría estar dada por el error de cuantificación (Widrow y Kollár, 2008), asociado a una baja resolución (10 bits, que equivalen a 1024 valores posibles entre 0 y 1) del convertidor análogo – digital del sensor Hydra Probe II (STEVENS, 2007).

Pese a las consideraciones antes mencionadas, el sensor Hydra Probe es capaz de entregar parámetros brutos de los componentes reales e imaginarios de la permitividad del suelo. Esto permite aplicar el método señalado por Hillhorst (2000) para determinar la conductividad eléctrica del poro, que es finalmente la conductividad eléctrica a la que la planta está sometida. Esto requiere que se active el registro de los valores reales e imaginarios de cada lectura del sensor, lo que en el caso de usar el registrador Dot Logger significaría dejar de registrar otras variables. Esto no es mayor limitante, excepto por la necesidad de post procesar los datos brutos para obtener lecturas, al menos, de conductividad eléctrica de la masa de suelo y del poro.

Hillhorst (2000) señala que, para contenidos de agua en el suelo sobre 10%, es posible

determinar la conductividad eléctrica del poro como función de la conductividad eléctrica de la masa de suelo y la parte real de la permitividad del suelo, variables disponibles en cada lectura del sensor Hydra Probe.

CONCLUSIONES

La observación y análisis de datos obtenidos mediante la sonda Hydra Probe en forma de gráficos, permite extraer información en relación al estatus hídrico del suelo más allá de los mismos valores numéricos medidos.

El software desarrollado permite traducir los datos capturados por la sonda en una serie de tiempo con representación visual. Esto facilita la visualización del estado hídrico del suelo, la detección de eventos de riego, la determinación de su duración, la profundidad de con que el suelo queda mojado después de un evento de riego, entre otras observaciones posibles.

Si se tiene referencia respecto a parámetros de retención de agua básicos del suelo, como capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), y si el equipo es calibrado para un suelo determinado, es posible mediante el software desarrollado visualizar el estado hídrico del suelo en un determinado momento y determinar si es necesario regar.

BIBLIOGRAFÍA

- Chow, L., Xing, Z., Rees, H. W., Meng, F. R., Monteith, J. y Stevens, L. 2009. Field performance of nine soil water content sensors on a sandy loam soil in New Brunswick, Maritime Region, Canada. *Sensors* 9 (11): 9398 - 9413
- Cleveland, W. y McGill, R. 1984. Graphical Perception: Theory, Experimentation, and Application to the Development of Graphical Methods. *Journal of the American Statistical Association* 79 (387): 531 - 554.
- Diario Chañarillo. 2013. Secretario Ejecutivo de la CNR realiza exposición a agricultores de Copiapó sobre Estrategia Nacional de Riego. Disponible en http://www.chanarillo.cl/articulos_ver.php?id=69446. Leído el 19 de octubre de 2013.
- Dukes, M.D., Carpena-Muñoz, R., Zotarelli, L., Icerman, J. y Scholberg, J.M. 2007. Soil moisture-based irrigation control to conserve water and nutrients under drip irrigated vegetable production. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo* 8: 239 - 236.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). 2007. Coping with water scarcity, challenge of twenty-first century. Disponible en <http://www.fao.org/nr/water/docs/escarcity.pdf>. Leído el 5 de noviembre de 2011.
- Hanson, R., Orloff, S. y Peters, D. 2000. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. *California Agriculture* 54: 38 – 42.

Hamdy, A., Ragab, R. y Scarascia-Mugnozza, E. 2003. Coping with water scarcity: water saving and increasing water productivity. *Irrigation and Drainage* 52: 3 - 20.

Hey, J. 2004. The Data, Information, Knowledge, Wisdom Chain: The Metaphorical link. Disponible en http://posterous.com/getfile/files.posterous.com/publicknowledge/flbXJgySUNldOO9Do8aTADLjt1hqVwA0pAWJqCa3qnvvyDKmvS5dRb3ZrPPHo/IS290_Finalpaper_HEY.pdf. Leído el 6 de noviembre de 2011.

Hilhorst, M. 2000. A pore water conductivity sensor. *Soil sci. Soc. Am. J.* 64: 1922 – 1925.

Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R. 2004. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrigation Science* 23 (2): 93 – 102.

Keller, T. y Tergan, S.-O. 2005. *Knowledge and Information Visualization: Searching for Synergies*. Springer-Verlag, Berlin, Alemania. 393p.

Kruchten, P. 2000. *The Rational Unified Process An Introduction, Second Edition*. Pearson Education, Boston, EEUU. 320p.

López Riquelme, L.A., Soto, F., Suardíaz, J., Sánchez, P., Iborra, A. y Vera, J.A. 2009. Wireless Sensor Networks for precision horticulture in Southern Spain. *Computers and Electronics in Agriculture* 68 (1): 25 - 35.

Metternicht, G.I. y Zinck, J.A. 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment* 85 (2003): 1 - 20.

Seyfried, M. S. y Murdock, M. D. 2004. Measurement of Soil Water Content with a 50-MHz Soil Dielectric Sensor. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 394 - 403.

Seyfried, M.S., Grant, L.E., Du, E. y Humes, K. 2005. Dielectric Loss and Calibration of the Hydra Probe Soil Water Sensor. *Valdosa Zone Journal* 4 (4): 1070 - 1079.

STEVENS WATER MONITORING SYSTEMS (STEVENS). 2005. DotLogger. Disponible en http://www.stevenswater.com/catalog/products/data_loggers/manual/dotlogger92963coct2005.pdf. Leído 20 de agosto de 2011.

STEVENS WATER MONITORING SYSTEMS (STEVENS). 2007. The HydraProbe Soil Sensor: Comprehensive Stevens Hydra Probe Users Manual . Disponible en http://www.stevenswater.com/catalog/products/soil_sensors/manual/Hydra%20Probe%20Manual%2092915%20June%202007.pdf. Leído 20 de agosto de 2011.

Vaz, C., Jones, S., Meding M. y Tuller, M. 2013. Evaluation of Standard Calibration Functions for Eight Electromagnetic Soil Moisture Sensors. *Vadose Zone J.*, 12(2).

Ware, C. 2004. *Information Visualization: Perception for Design* Second Edition. Morgan Kaufmann, San Francisco, EEUU. 486 p.

Widrow, B., Kollár, I. 2008. *Quantization Noise: Roundoff Error in Digital Computation, Signal Processing, Control, and Communications*. Cambridge University Press, UK. 751p.