

## **Estimación de la fracción evaporativa a partir de registros de humedad de suelo y un lisímetro de pesada**

D. Ocampo<sup>1,2</sup>, R. Rivas<sup>1,2</sup>, M. Silicani<sup>1,2</sup>, F. Carmona<sup>1,3</sup>, M. Holzman<sup>1,3</sup> y C. Mancino<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Jorge Usunoff"

<sup>2</sup>Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires

<sup>3</sup>Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica

e-mail: [dora.ocampo@rec.unicen.edu.ar](mailto:dora.ocampo@rec.unicen.edu.ar)

### RESUMEN

*La fracción evaporativa (FE), es un indicador del estado de humedad del suelo (Hs) que interviene en la compleja relación suelo-vegetación-atmósfera, actuando como superficie de control en el proceso de evapotranspiración. Esta Hs disponible puede determinarse mediante diversos métodos directos o indirectos. Entre los directos, la sonda de neutrones y el gravimétrico son los de uso más generalizado, siendo éste último el de mayor precisión. En los últimos años, los sistemas de medición basados en la tecnología de Reflectometría de Dominio de Frecuencia (RDF) acapararon el interés en diferentes campos de aplicación. Estos sistemas RDF permiten medir con precisión la Hs, independizándose de la textura y conductividad eléctrica del medio. También es posible determinar el contenido y la variación de agua de suelo a partir de registros de variación de peso en un lisímetro de pesada (LP). El objetivo de este trabajo fue estimar la FE de un suelo argiudol típico a partir de medidas registradas por sensores de Hs basados en la tecnología RDF y compararlos con el valor promedio del contenido de agua en el suelo registrado en el LP. Se diseñó, construyó e instaló un LP, en el cual se ubicaron tres sensores de Hs que integraron el perfil. A partir de la Hs máxima y mínima se calcularon la FE con los sensores ( $FE_{HS}$ ) y con el LP ( $FE_{LP}$ ). Los resultados mostraron un alto grado de asociación entre los valores de FE lograda con el LP en relación a la RDF con un RMSE de 0,06. Se concluyó que las medidas de RDF fueron apropiadas para estimar la Hs y pueden ser de utilidad para la validación de datos de satélite.*

### INTRODUCCIÓN

La humedad de suelo (Hs) juega un rol fundamental en el ciclo hidrológico y en el balance energético del sistema terrestre. Esta puede ser monitoreada a partir de diferentes índices o indicadores que señalan cuanta es el agua disponible en el sistema para que se produzca el proceso de evapotranspiración (ET). En los últimos años, la teledetección ha contribuido de forma positiva al estudio de la Hs, brindando información a diferentes escalas espaciales y temporales (Verstraeten et al. 2008), siendo clave para la planificación, gestión y manejo de los recursos naturales, en particular la vegetación y el agua. Sin embargo, es importante señalar que al momento de aplicar cualquier técnica de teledetección es un requerimiento contar con datos puntuales para la validación de los resultados (Ceballos Barbancho et al. 2004). Nuevos enfoques abordan el estado de humedad de suelo a partir de la Fracción Evaporativa (FE), definida como un indicador del estado de humedad de la superficie. Dicho indicador, interviene en la compleja relación suelo-vegetación-atmósfera, donde la evapotranspiración se rige por la energía disponible (de alta periodicidad), la turbulencia (de mayor variabilidad pero menos periodica), y la superficie de control (de

variación lenta). La superficie de control se refiere a la humedad del suelo en la zona radicular, y corresponde al agua disponible para las plantas la cuál varía a una escala de tiempo mayor que el día (Gentine et al. 2011), es decir comprende la fracción de agua disponible para las plantas, de la cual estas extraen tanto el agua como los nutrientes. Desde el punto de vista energético, cuando el sistema dispone de humedad, la energía es utilizada en el proceso de evapotranspiración. Al contrario con poca o nula humedad de suelo, toda la energía se destina al flujo de calor sensible y la fracción evaporativa se aproxima a cero (Vogt et al. 2011).

El estado de humedad de suelo, y en consecuencia la FE, puede determinarse mediante diversos métodos. Entre los directos, la sonda de neutrones y el gravimétrico son los de uso más generalizado, siendo éste último el de mayor precisión. En los últimos años, los sistemas de medición basados en la tecnología de Reflectometría de Dominio de Frecuencia (RDF o por sus siglas en inglés, FDR) acaparan el interés en diferentes campos de aplicación. Estos sistemas de RDF permiten medir con precisión la Hs, independizándose de la textura y conductividad eléctrica del medio. Otra forma de determinar la disponibilidad de agua en suelo es a partir del balance de agua. Y este último se determina a partir de la ayuda de lisímetros (Santa Olalla Mañas et al. 2005). Según el [Glosario Hidrológico Internacional de la UNESCO](#), un lisímetro consiste en una vasija que contiene una muestra del suelo local con su parte superior a nivel con la superficie del terreno, para el estudio de varias fases del ciclo hidrológico, por ejemplo infiltración, escorrentía, evapotranspiración, eliminación de componentes solubles por el drenaje, entre otros (<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/aglo.htm>). Es decir, un lisímetro simula la relación natural que existe entre el suelo, la vegetación y la atmósfera, donde la FE cumple una función determinada: constituye la fracción de agua disponible para el desarrollo del proceso de evapotranspiración. Existen diferentes tipos de lisímetros (Aboukhaled et al. 1986; Parisi et al. 2009) entre los que se pueden citar a los lisímetros de drenaje (LD) y a los lisímetros de pesada (LP). Los últimos, proporcionan datos sobre la variación promedio del contenido de agua en el suelo ( $\Delta S$ ), que viene dada por la diferencia en el peso del lisímetro antes y después de un período determinado de tiempo (t). Los LP proveen datos continuos o discretos. La diferencia entre éstos es que los primeros registran datos en un logger y los segundos corresponden a medidas, por lo general manuales, que se realizan con un cierto intervalo de tiempo (medidas intermitentes, del orden de días) (Howell et al. 1991). Estas medidas manuales son registradas por un sistema de pesaje portátil que permite el pesado de la muestra de la vasija que contiene el suelo.

El objetivo de este trabajo es estimar la fracción evaporativa de un suelo arguidol típico a partir de medidas registradas por sensores de humedad de suelo y validar los datos a partir de la variación promedio del contenido de agua en el suelo registrada en un lisímetro de pesada.

## **DESARROLLO EXPERIMENTAL Y ÁREA DE ESTUDIO**

### **Planteo del Problema**

La necesidad de contar con medidas precisas de la Hs es prioridad en diferentes disciplinas científico-técnicas. Los diversos métodos existentes cuentan con determinadas capacidades y precisiones aptas para diferentes estudios de la dinámica de la Hs. Ésta puede determinarse a partir de diversos métodos. Entre los directos, la sonda

de neutrones y el gravimétrico son los de uso más generalizado, siendo el segundo el de mayor precisión. El método gravimétrico consiste en una metodología poco práctica y menos rápida que otras, además de ser “destruktiva” y no permitir medidas continuas de la misma porción de suelo. Por otro lado, la sonda de neutrones, además del costo que implica el equipo, requiere de la capacitación de su operador. A esto se suma que en los últimos años se le está otorgando cierta desconfianza por la contaminación que genera sus materiales radioactivos (Florentino, 2006). Ante esta situación, nuevas metodologías toman relevancia, tal es el caso de las sondas de capacitancia y los métodos dieléctricos. Consisten en tecnologías económicas, de manejo sencillo y de buena precisión, además de constituirse en métodos “no destructivos”. En los últimos años, los sistemas de medición basados en la tecnología de RDF han acaparado el interés en diferentes campos de aplicación, particularmente en agronomía. Sin embargo, en áreas como la Teledetección podrían presentarse como métodos adecuados para la validación de datos. Misiones actuales, como la misión SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) instalaron un red permanente de sensores de Hs utilizada para la validación de los datos obtenidos por un radiómetro interferométrico de dos dimensiones aplicado a la banda L (Mattar et al. 2011).

La principal ventaja que presentan este tipo de sensores, es que permiten medir con precisión la Hs, independizándose de la textura y conductividad eléctrica del medio. Además son adecuados para su instalación a diferentes profundidades, permitiendo hacer un seguimiento de la Hs del perfil hasta aproximadamente los 100 cm.

Se propone en este trabajo determinar si las sondas RDF son adecuadas para estimar un índice que señale el estado de humedad de un suelo, como la fracción evaporativa.

### **Área de aplicación**

El ensayo se realizó con datos registrados desde septiembre de 2011 a mayo 2012 en un predio ubicado en el Campus de la Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires, Tandil (UNCPBA-Buenos Aires, Campus Tandil, 37° 19' S y 59° 08' O, 214 m). Dicho predio es manejado por personal del Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo J. Usunoff” y se encuentra cubierto de pastura natural. El suelo corresponde a un arguidol típico, profundo, formado en el Cuaternario sobre loess pampeano. Estudios realizados por el Laboratorio de Análisis de Suelos de la Facultad de Agronomía-UNCPBA determinaron que corresponde a un suelo de textura franco arcillosa (45% de arcilla). Además, según el mapa de suelos 1:50000 del INTA, dicho suelo forma parte de la Unidad cartográfica SP (Sierra de los Padres) 6, una consociación que incluye los suelos serie Mar del Plata, serie Tandil y serie Cinco Cerros.

En cuanto al clima del área es sub húmedo-húmedo (precipitación anual aproximada a  $\approx 900$  mm, Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, periodo 2000-2011, 37° 14' S y 59° 15' O, 175 m) y templado (14,0 °C de temperatura media anual). Las precipitaciones se concentran en los meses de enero, marzo, noviembre y diciembre, superando cada mes en promedio los 80 mm.

### **Caracterización del instrumental y equipos de medición utilizados**

El instrumental y equipos utilizados en este trabajo se describen en la Tabla I. Se utilizaron 3 sensores de humedad de suelo, que registraron las medidas en milivoltios (mV). Luego, a partir de ecuaciones específicas para el suelo, se convirtieron los mV a contenido volumétrico de agua ( $\theta$ , por su siglas en inglés, VWC, Volumetric Water

Content) (Rivas y Ocampo, 2009). El principio de funcionamiento de este tipo de sensores está basado en la relación existente entre el agua y la constante dieléctrica del suelo, utilizando la tecnología de Reflectometría de Dominio de Frecuencia (Florentino, 2006). Además presentan la particularidad de integrar la humedad de suelo tanto a 5, 10 y 20 cm, según el sensor que se trate.

Instrumental/equipo	Medida/función	Precisión/Rango
Balanza digital	Peso del lisímetro	±200 g
Pluma de ginche hidráulico	Levantar el lisímetro	Hasta 2000 Kg.
Pluviómetro	Precipitación	± 0,05 litros (según OMM)
Sensor Decagon Devices, Inc EC-10 y Sensor Cavadevices SHC-20	Humedad de suelo	± 3% de VWC sin calibrado, ±1 % con calibración específica. Rango: 0-100 % VWC.

Tabla I. Sensores y equipo de medición empleado.

### Diseño del lisímetro de pesada y ubicación de los sensores RDF

El lisímetro de pesada se construyó e instaló en septiembre de 2011 en un predio experimental del Campus Tandil. Tiene una superficie de 0,27 m<sup>2</sup> y una profundidad de 0,85 m. Está compuesto por un contenedor cilíndrico con ranurado en el fondo, donde el piso del lisímetro presentó una chapa soldada en ángulo para facilitar el drenaje del excedente de agua. El LP se apoyó sobre placas de cemento (estructura de soporte) separadas verticalmente una de la otra a 5 cm (Figura 1).

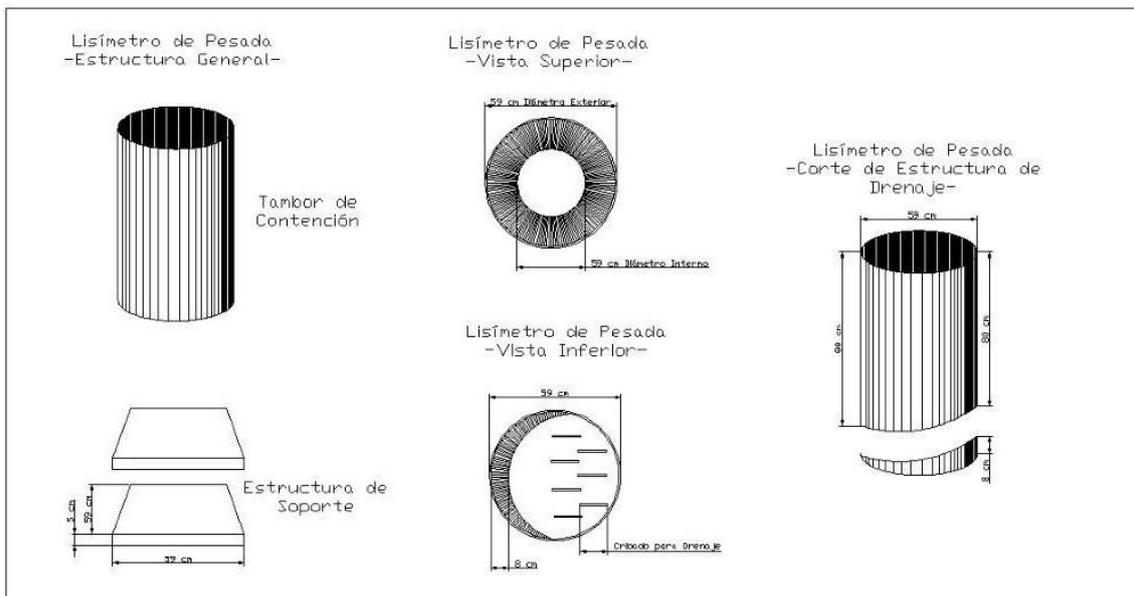


Figura 1. Detalle del diseño del lisímetro de pesada (adaptado del proyecto de tesis de especialización de Silicani, 2011).

El cilindro se rellenó con el suelo del lugar de la siguiente forma:

- 1) 15 cm de grava de tamaño 12-24 mm sobre el fondo ranurado.
- 2) Espesor de suelo ubicado a 40-60 cm de profundidad. Luego se instaló un sensor de humedad (SHC-20).
- 3) Espesor de suelo ubicado a 20-40 cm de profundidad. Luego se instaló el segundo sensor de humedad de suelo (SHC-20).

- 4) Espesor de suelo a los 0-20 cm de profundidad. Finalmente, se instaló el tercer sensor de humedad de suelo (EC-10 Decagon Devices).

Los sensores de humedad de suelo se conectaron a un logger marca CAVADEVICES. Este presenta 8 canales de conexión, con capacidad de almacenamiento de 2000 datos con una resolución temporal horaria (Figura 2).

En el Apéndice se presenta el protocolo de medición del LP paso a paso para realizar correctamente la medida del registro de variación de peso.

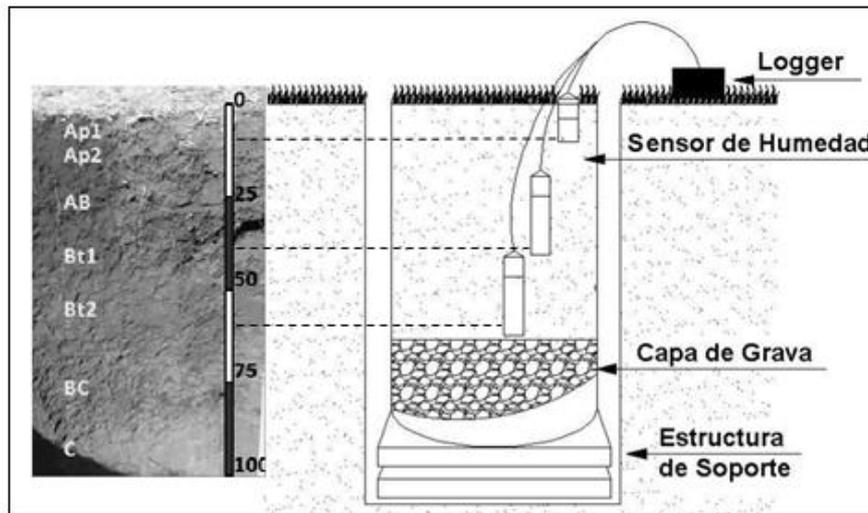


Figura 2. Perfil del suelo y esquema representativo del lisímetro de pesada.

### Metodología utilizada para la obtención de la fracción evaporativa

La fracción evaporativa del suelo se determinó según dos metodologías, por un lado, a partir de la variación del peso del lisímetro, la cual se consideró como la medida real “observada” de la disponibilidad de agua en el suelo; y por otro, a partir del registro de humedad detectado por los sensores RDF ubicados en el lisímetro, considerado en este caso la disponibilidad de agua en suelo “estimada”.

- **La Ecuación 1 permitió el cálculo de la FE a partir de los registros de la variación del peso del lisímetro ( $FE_{LP}$ ):**

$$FE_{LP} = \frac{P_{di} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \quad (1)$$

donde  $P_{di}$  es el peso del LP registrado el día  $i$ ,  $P_{\min}$  es el peso mínimo (sin agua en el perfil del suelo) y  $P_{\max}$  es el peso máximo registrado en el lisímetro (capacidad de campo).

- **La Ecuación 2 permitió el cálculo de FE a partir de los registros de humedad de suelo medidos en el lisímetro ( $FE_{HS}$ ) (Rivas y Ocampo, 2009):**

$$FE_{HS} = \frac{HS_{di} - HS_{\min}}{HS_{\max} + HS_{\min}} \quad (2)$$

donde  $HS_{di}$  es la humedad de suelo promedio registrada por los sensores a tres profundidades el día  $i$  - a escala diaria-,  $HS_{\min}$  es la humedad mínima de suelo,  $HS_{\max}$  es la humedad máxima de suelo.

Para esta investigación se utilizaron 30 medidas correspondientes a registros puntuales del lisímetro realizados con una periodicidad de entre 3 y 4 días.

## Análisis de Datos

Los valores de humedad de suelo detectados por los sensores RDF (a diferentes profundidades) y de precipitación se analizaron a partir de gráficos de líneas y barras. Obtenidos los valores de FE a partir de los métodos propuestos (Ecuaciones 1 y 2), la comparación entre la  $FE_{HS}$  y  $FE_{LP}$  se realizó considerando 3 criterios: la inclusión de un procedimiento gráfico que represente la comparación entre valores obtenidos por ambos métodos, un índice adimensional que exprese la bondad del ajuste y un indicador de error (Legates and McCabe, 1999; Ritter et al. 2011). Se utilizó para ello, un diagrama de dispersión simple que representó la comparación entre valores obtenidos por el método  $FE_{HS}$  (eje de la Y) versus  $FE_{LP}$  (eje de las X). Y se calcularon el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y el índice estadístico Root Mean Square Error (RMSE), interpretando al método  $FE_{LP}$  como el de referencia y al método  $FE_{HS}$  como el método a evaluar.

## RESULTADOS

### Comportamiento de la humedad en el perfil del suelo

La Figura 3 muestra la evolución temporal del  $\theta$  (%v/v) a diferentes profundidades del perfil (0-10 cm, 20-40 cm y 40-60 cm) y la precipitación (mm) desde el 20 de septiembre de 2011 hasta el 19 de abril de 2012. Se observa como respondieron los sensores de humedad de suelo ante eventos de precipitación, donde se destaca la respuesta inmediata del sensor ubicado a 10 cm, y un retraso para los sensores ubicados a mayor profundidad.

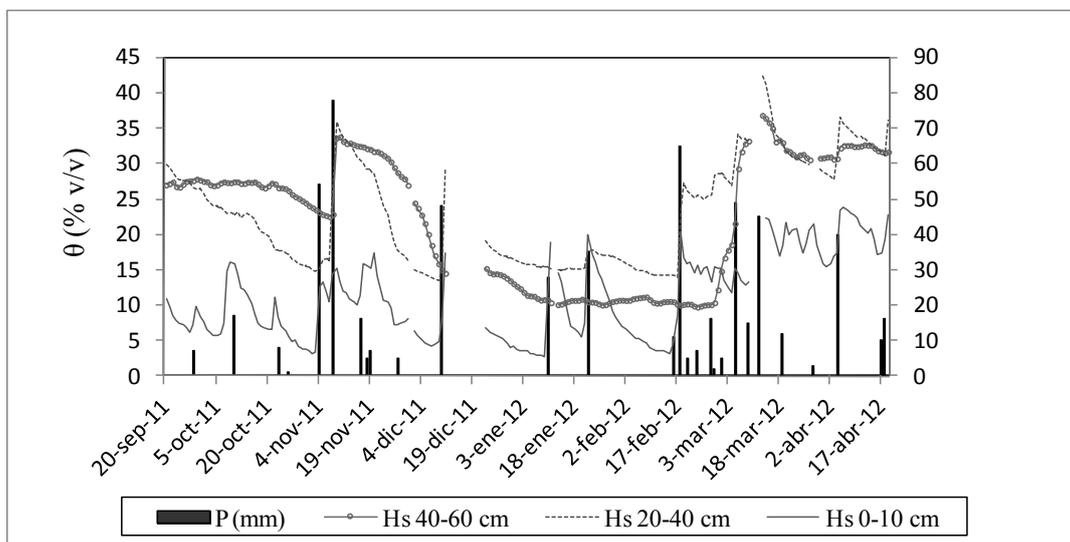


Figura 3. Contenido volumétrico de agua en el lisímetro a tres profundidades y precipitación registrada.

La precipitación del periodo correspondió a 610 mm (que representó el 70 % del total anual). Las mayores precipitaciones se concentraron en noviembre-diciembre 2011 y enero-febrero-marzo-abril-mayo 2012, siendo este comportamiento representativo del régimen hídrico del área de estudio (Tandil, provincia de Buenos Aires-Argentina). Sin embargo, se observó un importante déficit hídrico durante el mes de octubre, donde la precipitación fue 70 % inferior al promedio histórico (Figura 4).

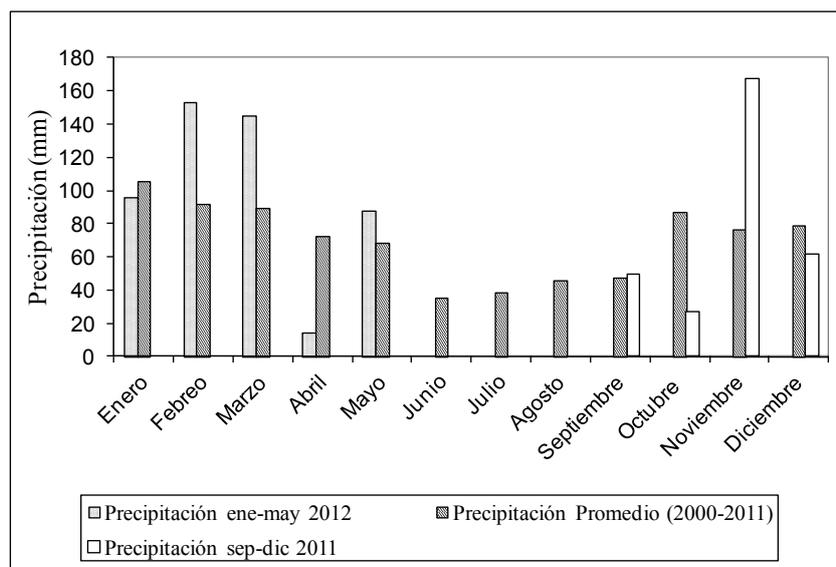


Figura 4. Precipitación mensual registrada durante el periodo septiembre 2011 mayo 2012.

En la Tabla II se observan los valores máximos y mínimos de la Hs y del peso del lisímetro registrados para el periodo de estudio. Estos valores se utilizaron para la estimación de la FE a partir de la aplicación de las Ecuaciones 1 y 2. El valor de máxima de Hs correspondió a marzo (13 de marzo de 2012) y de peso del lisímetro a mayo (22 de mayo de 2012). El valor mínimo de Hs se registró en enero (16 de enero de 2012) y el peso en febrero (15 de febrero de 2012).

Método de medición	Valor máximo	Valor mínimo
Sensores de Hs (automático)	34 %	9 %
Peso del LP (manual)	303,2 Kg	262,4 Kg

Tabla II. Registros máximos y mínimos de Hs y pesos del LP en el ensayo experimental.

### Comparación de los valores de la $FE_{Hs}$ y la $FE_{LP}$

La Figura 5 representa el diagrama de dispersión entre los valores de  $FE_{LP}$  (“método de referencia”) y los de  $FE_{Hs}$  (“método a evaluar”). Se observó que los puntos del diagrama de dispersión están relativamente cerca de la recta de ajuste. Dicha recta describió la relación lineal existente entre ambas variables.

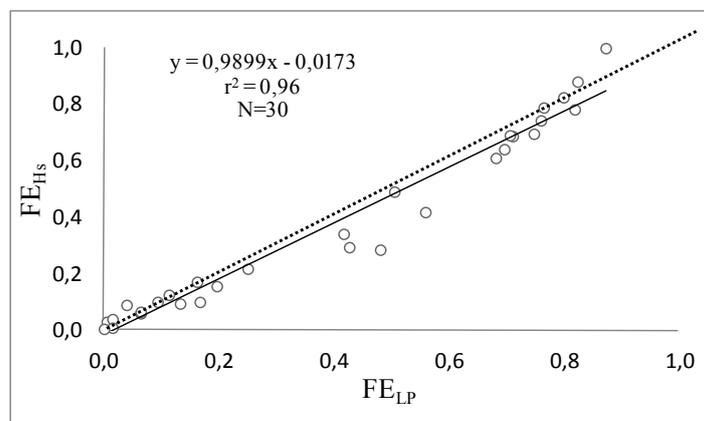


Figura 5. Comparación de la  $FE_{Hs}$  y  $FE_{LP}$  (línea punteada recta 1:1).

Para valores muy bajos ( $< 0,1$ ) y muy altos ( $> 0,8$ ) la  $FE_{HS}$  sobrestimó en relación a  $FE_{LP}$  y para valores bajos e intermedios ( $0,1 < FE_{LP} < 0,8$ ) subestimó (Figura 5). De la comparación entre los valores de la  $FE_{HS}$  y la  $FE_{LP}$ , se desprende un alto coeficiente de determinación y un RMSE de 0,06.

## DISCUSIÓN

A partir del comportamiento de las precipitaciones se pudieron identificar para el periodo de estudio los valores máximos y mínimos de humedad de suelo, es decir excesos y déficit.

Las curvas de comportamiento de humedad de suelo a diferentes profundidades y su respuesta ante eventos de precipitación, describieron de forma generalizada la sensibilidad que presentaron los sensores RDF. Se detectaron particularmente importantes diferencias para el sensor ubicado a 10 cm de profundidad en relación a las instaladas a mayor profundidad. La rápida respuesta (o su retardo) del sensor se relacionó con la velocidad de avance del agua en el perfil. Dicha velocidad depende no solo de las características del suelo (textura y estructura) sino también del contenido inicial de humedad en éste.

Los registros de humedad posteriores indicaron que el frente de humedad avanzó en el perfil, siendo detectado por los sensores ubicados a mayor profundidad.

A partir de los registros en las tres profundidades, se pudo estimar la  $H_s$  promedio y la  $FE_{HS}$  para todo el perfil.

Del diagrama de dispersión (Figura 5), se desprende que sobre la nube de puntos se determinó una función lineal de ajuste de los datos de  $FE$ . Como pudo observarse, cada valor tomado de  $FE_{HS}$  varió en función de los valores de  $FE_{LP}$ , donde el patrón de comportamiento demostró una baja dispersión de los puntos indicando un alto grado de asociación entre ambas variables cuantitativas. Por otro lado, el alto valor del coeficiente de determinación ( $r^2=0,96$ ) indicó la bondad del ajuste sumado a un bajo error en la estimación representado por un RMSE de 0,06.

En conjunto, el patrón de dispersión, el buen ajuste y el bajo error logrado demostraron la buena capacidad de los sensores RDF para determinar la disponibilidad de agua en el mismo, es decir, la fracción evaporativa, de forma no destructiva, económica y sencilla. Estas capacidades son significativas al momento de considerarlo como potencial método de validación de datos de satélite.

Debe destacarse que, para este estudio, los registros de variación del peso del lisímetro forman parte de una metodología “directa” para determinar la disponibilidad de agua en suelo y la evapotranspiración. En este estudio se lo consideró como el método “de referencia” para compararlo con el basado en la tecnología de RDF.

## CONCLUSIONES

El estudio demuestra que a partir de sensores basados en la tecnología de Reflectometría de Dominio de Frecuencia, ubicados a diferentes profundidades de un perfil de suelo, es posible determinar la fracción evaporativa de forma no destructiva y simple, con alta precisión (RMSE=0,06) y bajo costo. Los sensores empleados conforman alternativas a instrumental complejo, costoso, destructivo y contaminante (radiactivos), como las

sondas de neutrones. Esto último no indica que se recomiende su reemplazo, sino que conforman “alternativas” de alto grado de precisión, menor costo y que no requieren de un entrenamiento especializado por parte del operador.

Los datos de fracción evaporativa logrados son apropiados para estudiar la dinámica de la humedad de un perfil de suelo y pueden ser de utilidad para la validación de datos de satélite. Y es en este último punto donde la metodología empleada adquiere mayor relevancia, ya que puede reproducirse sin mayores inconvenientes, por ser de sencilla aplicación y de bajo costo.

### **AGRADECIMIENTOS**

*Esta investigación fue financiada con fondos del Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo J. Usunoff”, la Comisión de Investigaciones Científicas y la Agencia de Promoción Científica y Tecnológica. Nuestro agradecimiento al técnico Hugo Ringuelmam, al Mg. Martín Bayala y a la Dra. Silvia Mestelan del Laboratorio de Análisis de Suelos de la Facultad de Agronomía (UNCPBA) por la colaboración brindada durante el estudio.*

### **REFERENCIAS**

- [1] Verstraeten, W.W.; Veroustraete, F. and Feyen, J. 2008. Assessment of Evapotranspiration and Soil Moisture Content Across Different Scales of Observation. *Sensors*, 8:70-117.
- [2] Ceballos Barbancho, A.; Martínez Fernández, J.; Casado Ledesma, S., Morán Tejeda, C. and Hernández Santana, V. 2004. Estimación de la humedad de suelo a partir de la señal de radar (ERS-Scatterometer): experiencia, resultados y aplicaciones en la Cuenca del Duero (España). En: Territorio y Medio Ambiente: *Métodos Cuantitativos y Técnicas de Información Geográfica*. (Eds.) C. Conesa García y J.B. Martínez Guevara. Universidad de Murcia y Asociación de Geógrafos Españoles.
- [3] Gentine, P.; Entekhabi, D. and Polcher, J. 2011. The Diurnal Behavior of Evaporative Fraction in the Soil-Vegetation-Atmospheric Boundary Layer Continuum. *Journal of Hydrometeorology*, 00: 1-17.
- [4] Vogt, J-V; Niemeier, S. and Viau, A.A. 2011. Monitoring water stress at regional scales. *Proceedings of the 23rd Canadian Symposium on Remote Sensing*, Canada. 315-321.
- [5] Santa Olalla Mañas, López Fuster, F. y Calera Belmonte, A. 2005. *Agua y Agronomía*. (ed.) Mundi-Prensa Libros S.A., 606 pp.
- [6] Aboukhaled, A. A.; Alfaro, A.; M. Smith. (1986). *Los lisímetros*. Irrigation and Drainage Paper No. 39, FAO. Rome, Italy. 68p.
- [7] Parisi, S.; Mariani, L.; Cola, G. and Maggiore, T. 2009 Mini-Lysimeters evapotranspiration measurements on suburban environment. *Italian Journal of Agrometeorology*, 3:13-16.
- [8] Howell T.A.; Schneider A.D. and Jensen M.E. 1991. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements. In: *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*, Allen, R.G; Howell, T.A.; Pruitt, I.W. and Jensen, M.E (Ed.), Proceedings of International Symposium on Lysimetry, ASCE, New York.
- [9] Florentino, A. 2006. Métodos para medir el contenido de agua en suelo. *Venesuelos*, 14(1): 48-70.
- [10] Mattar, C., Sobrino, J.A., Wigneron, J.C., Jiménez-Muñoz, J.C. y Kerr, Y. 2011. Estimación de la humedad del suelo a partir de índices de vegetación y microondas pasivas. *Revista de Teledetección*, 36: 62-72.
- [11] R. Rivas, y D. Ocampo. 2009. Comportamiento del balance de energía en un cultivo de Avena sativa L. En: *Estudios de la zona no saturada del suelo. Área Temática III ZNS'09*. O.

Silva y J. Carrera (Ed.), ED. CIMNE (Barcelona, España), Vol IX: 336-343, <http://congress.cimne.com/zns09/frontal/papers.asp> ISBN 978-84-96736-83-2.

[12] Silicani, M. 2011. Proyecto de tesis de Especialización en Riego y Drenaje: *Diseño, construcción y operación de un lisímetro de bajo costo*. Facultad de Ciencias Agrarias, UNCU.

[13] Legates, D.R and McCabe, G.J. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit measures in hidrologic and hidroclimatic model valiation. *Water Resources Research*, 35, 233-241.

[14] Ritter, A., Muñoz-Carpena, C. y Regalado, C.M. 2011. Capacidad de predicción de modelos aplicados a la ZNS: herramienta informática para la adecuada evaluación de la bondad de ajuste con significación estadística. En: *Estudios de la zona no saturada del suelo. Área Temática IV ZNS'11*. J. Martínez Fernández y Nilda Sánchez Martín (Ed.), Salamanca (España), Vol X: 259-264, <http://www.zonanosaturada.com/zns11/publications.html> ISBN 978-84-694-6642-1.

## APÉNDICE

### Procedimiento empleado para el registro de variación ( $\Delta S$ ) de peso del lisímetro

Paso 1. Colocadas la pluma de ginche hidráulico y la balanza digital en el lugar, se procedió a colgar el lisímetro a partir de las tres cadenas ubicadas en el borde superior del contenedor del lisímetro, colocadas en ángulo de  $120^\circ$ .

Paso 2. Lograr la elevación de la porción de suelo a partir de la fuerza hidráulica del ginche y evitar que la estructura roce con las paredes internas del pozo (Figura 6).

Paso 3. Lograda esta última situación, se procede al registro del peso del lisímetro. La frecuencia de las pesadas es dos veces a la semana durante los meses donde el proceso de evaporación es más importante (octubre-abril aproximadamente). La frecuencia se reduce a una vez a la semana durante el resto del año.

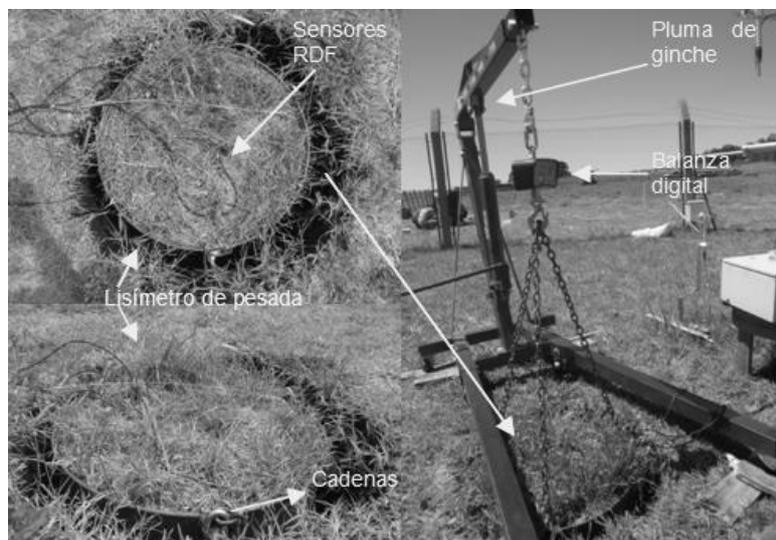


Figura 6. Imágenes del lisímetro de pesada y representación del procedimiento de medición.