

DISPOSITIVO DE AUTOMATIZACIÓN PARA UN INFILTRÓMETRO DE CAMPO CON FUNCIONAMIENTO DE MARIOTTE

Automation Device for a Mariotte Based Field Infiltrometer

Alberto Gómez-Tagle Chávez^{1‡}, José Antonio Gutiérrez Gnecci² y Hugo Zepeda Castro³

RESUMEN

La infiltración es el proceso en el cual el agua pasa de la superficie hacia el interior de un medio poroso. El estudio de este proceso desde la perspectiva de la medición directa consume gran cantidad de tiempo y dinero, debido a que requiere de toma de datos en intervalos que van de 1 a 5 min durante lapsos de tiempo entre 0.5 a 4 h. En este trabajo se presenta un dispositivo capaz de reducir la demanda de tiempo e incrementar la cantidad de datos que pueden registrarse por unidad de tiempo. El dispositivo consiste en una unidad de automatización digital para medir la altura de una columna de agua, que emplea un sensor de presión diferencial MPX2010DP conectado a un circuito de entrega de energía y acondicionamiento de señal con memoria no volátil programable con interfase USB. La unidad de automatización se acopló a un infiltrómetro portátil de carga constante y anillo sencillo. El infiltrómetro automatizado tuvo una desviación estándar de aproximadamente 0.2 cm para un rango de medición de 0 a 85 cm. Se evaluó su funcionalidad y aplicación en 4 sitios con suelos de textura contrastante del sur de la Cuenca del Lago de Cuitzeo. La conductividad hidráulica saturada calculada por el método de Wu (Wu *et al.*, 1999), a partir de datos obtenidos automáticamente, no mostró diferencia significativa con aquella calculada a partir de datos obtenidos manualmente. Sin embargo, se observó una disminución de la desviación estándar

del método automatizado, respecto del manual. Esta unidad de automatización permitió la adquisición de datos de infiltración útiles en la estimación de propiedades hidráulicas con una supervisión mínima.

Palabras clave: *sensor de presión diferencial, infiltrómetro de anillo sencillo, conductividad hidráulica, infiltración, datalogger.*

SUMMARY

Infiltration is the process in which water flows from the surface of a porous medium into its interior. Studying this process from a direct measurement perspective is highly demanding in terms of time and economic resources, because data recording must be done in time intervals of one to five minutes within lapses ranging from 0.5 to 4 hours. In this paper we present an electronic device capable of increasing the amount of data acquired per time unit, reducing direct time investment. The device consist of an automation unit capable of measuring the height of a water column by means of a differential pressure sensor (MPX2010DP) with a signal conditioning and constant delivery of energy circuit as well as a non volatile programmable USB memory as logger. The automation unit was coupled to a constant head single ring infiltrometer. The automated infiltrometer had a measurement error of 0.2 cm for a range of 0 to 85 cm. Its performance was evaluated in four different soil formations with contrasting textures in the Cuitzeo watershed. Saturated hydraulic conductivity was calculated using the Wu method (Wu *et al.*, 1999) from data acquired automatically. There were no statistical differences between the results from data calculated automatically and those from data calculated manually. Nevertheless, we found consistent reduction in standard deviation for the automated method. The automation unit presented here allowed the acquisition of infiltration data useful in the estimation of hydraulic properties with minimal supervision.

¹ Laboratorio de suelos. INIRENA. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av San Juanito Itzicuaró sn. 58030 Morelia, Michoacán, México.

[‡] Autor responsable (alberto.gomeztagle@gmail.com)

² Ingeniería Electrónica. Instituto Tecnológico de Morelia. Av. Tecnológico 1500, Colonia Lomas de Santiaguito. 58120 Morelia, Michoacán, México.

³ Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente del Estado de Michoacán. Escarcha 272, Fracc. Prados del Campestre. 58290 Morelia, Michoacán, México.

Recibido: julio de 2008. Aceptado: julio de 2009.

Publicado en Terra Latinoamericana 28: 193-202.

Index words: *differential pressure sensor, single ring infiltrometer, hydraulic conductivity, infiltration, datalogger.*

INTRODUCCIÓN

La infiltración es el proceso en el cual el agua que se encuentra en la superficie pasa hacia el interior de un medio poroso (Campos-Aranda, 1987; Maderey y Jiménez, 2005). Este proceso es controlado por las propiedades hidráulicas de los suelos (Berndtsson y Larson, 1987; Russo y Bresler, 1981), que a su vez se relacionan con otras propiedades, como la densidad aparente (Ball *et al.*, 1997), la estabilidad del sistema poroso, su continuidad (Soracco, 2003) incluyendo la macro (Mbagwu, 1995), meso (Bodhinayake *et al.*, 2004) y microporosidad (Eynard *et al.*, 2004).

El uso de infiltrómetros o permeámetros para estudiar las propiedades hidráulicas de los suelos, en condiciones de campo (Angulo-Jaramillo *et al.*, 2000; Meadows *et al.*, 2008) o laboratorio (Johnson *et al.*, 2005; Wilson *et al.*, 2000) se ha popularizado entre los investigadores, ya que el conocimiento de las propiedades hidráulicas es clave para entender su influencia en procesos hidrológicos como la infiltración (Descroix *et al.*, 2008; Esteves *et al.*, 2005) y la producción de flujo superficial (Descroix *et al.*, 2007; Descroix *et al.*, 2001), la recarga de acuíferos (Kwicklis *et al.*, 2005).

Los métodos manuales de medición del flujo de agua que entra en el suelo durante los experimentos de infiltración son, por lo general, altamente demandantes de tiempo, por lo que diversos autores mencionan la necesidad de automatizar los dispositivos (infiltrómetros y permeámetros) con el fin de agilizar la adquisición de datos, minimizar los errores humanos y reducir el tiempo invertido en realizar los registros (Amézketa Lizarraga *et al.*, 2002; Johnson *et al.*, 2005; Spongrová *et al.*, 2009). Los dispositivos automatizados dependen de unidades de registro de datos (dataloggers) externos limitando su autonomía en condiciones de campo (Spongrová *et al.*, 2009). Es de nuestro conocimiento que existe la necesidad de equipo automatizado para este fin, sin embargo a nivel nacional la principal limitante es la disponibilidad, seguido por el costo. En muchos casos los investigadores implementan sus propios dispositivos sin automatizar, siendo los más comunes los infiltrómetros de anillo doble como por ejemplo, Nívar y Synnott (2000).

La automatización de infiltrómetros y permeámetros requiere básicamente la medición precisa de la altura de una columna de agua en el tiempo y se han explorado diversas aproximaciones para conseguir este objetivo. Algunas son la celda de tensión para condiciones de laboratorio de Nightingale y Bianchi (1970), el uso de detectores infrarrojos pareados en un cilindro plástico (Wilson *et al.*, 2000), el sistema de válvula y flotador con carrito medidor del infiltrómetro de anillo sencillo de Amezketa Lizárraga *et al.* (2002), el uso de reflectometría de dominio de tiempo (TDR por sus siglas en inglés) en infiltrómetros de disco (Moret *et al.*, 2004), los detectores infrarrojos y materiales flotantes para infiltrómetros de doble anillo (Milla y Kish, 2006) o los sensores de presión para infiltrómetros de anillo sencillo o de disco (Ankeny *et al.*, 1988; Casey y Derby, 2002; Prieksat *et al.*, 1992; Spongrová, 2006).

Éstos últimos constituyen una de las opciones más comunes debido a su simplicidad, fácil implementación y confiabilidad. La primera aplicación de este tipo data de la década de los años 60, en la que Overman *et al.* (1968) emplearon un transductor de presión para implementar un infiltrómetro de carga variable en laboratorio, diseñado específicamente para materiales de baja permeabilidad. Ejemplos posteriores incluyen los dispositivos de Constanz y Murphy (1987), Ankeny *et al.* (1988), Prieksat *et al.* (1992), Casey y Derby (2002), Johnson *et al.* (2005) y Spongrová (2006), que se detallan a continuación.

Constanz y Murphy (1987) generaron un sistema que podría medir la altura de una columna de agua a partir de los cambios de presión en un reservorio de Mariotte y a partir de esto derivar la infiltración. Éste dispositivo incorporaba transductores de presión 4-312 de CEC Transamérica Delval, con rango de presión ± 86.2 kPa (12.5 PSI), la automatización permitía adquirir datos de una forma rápida con baja supervisión.

Ankeny *et al.* (1988) reportaron que el sistema de automatización basado en un transductor inducía errores con el burbujeo y adaptaron el diseño de Constanz y Murphy (1987) a un infiltrómetro de tensión (disco) utilizando 2 transductores PX-136 con rango de medición de 0-34.5 kPa (0-5 PSI) (Omega Engineering, Standford, CT) y un data logger Campbell 21X (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT). Este montaje de 2 transductores requería de una sincronización precisa, minimizaban la variabilidad generada por el burbujeo y medía tasas de infiltración entre 0.04 y 1800 mm h⁻¹. Además de reducir

la desviación estándar de 6.2 mm para el diseño de un solo transductor a 2.2 mm.

Prieksat *et al.* (1992) emplearon el diseño de los 2 transductores y lo aplicaron a un infiltrómetro de anillo sencillo, que midió exitosamente infiltraciones de 79.2 a 630 mm h⁻¹ en campo y de 0.06 a 13 320 mm h⁻¹ en laboratorio. La automatización permitió obtener datos en varios sitios simultáneamente, facilitando la caracterización de la infiltración y algunas propiedades hidráulicas en la escala de parcela.

Casey y Derby (2002) utilizaron un sensor de presión diferencial (PX26-001DV, Omega Engineering, Standford, CT) y lo evaluaron en condiciones de campo, alcanzando desviaciones estándar de 0.05 mm. Los autores mencionan que la mejora en resolución podría no modificar significativamente la estimación de las propiedades hidráulicas del suelo, pero podría ser útil cuando los datos son procesados con métodos que asumen relaciones exponenciales como los de Ankeny *et al.* (1991) o Reynolds y Elrick (1991).

Johnson *et al.* (2005) construyeron 6 permeámetros de laboratorio con carga variable, utilizando sensores de presión PX236 (Omega Engineering) y tubos de acrílico, para trabajar con muestras inalteradas. Utilizaron un datalogger programado para grabar lecturas a intervalos regulares. La comparación con el método manual no mostró diferencias significativas para las texturas analizadas.

Spongrová *et al.*, (2009) diseñó, construyó y probó un infiltrómetro de tensión completamente automatizado, que comprendía tanto la medición del nivel del agua como el control de las tensiones aplicadas. Para ello utilizó transductores de presión diferenciales Honeywell con rango de 0 a 34.4 kPa (0 a 5 PSI), conectados a un datalogger Campbell 21X datalogger (Campbell Scientific Inc.) y a una computadora portátil. Los resultados mostraron que el equipo redujo el tiempo de supervisión al mínimo, obteniéndose mediciones de infiltración para 8 tensiones distintas, en 3 puntos, en un día.

Aún cuando existen diversas propuestas comerciales, como el infiltrómetro de tensión automatizado o de medición manual, dependen de unidades de registro de datos externos. Es de nuestro conocimiento que aún cuando existe la necesidad de equipo automatizado para este fin, la disponibilidad y el costo son las limitantes a nivel nacional. Si bien pueden adquirirse equipos para cuantificar la infiltración saturada o no saturada, como el infiltrómetro de disco, DIPER del IMTA de fabricación

nacional, o el Permeámetro de Guelph Soil Moisture Systems Inc. vía importadores especializados. Para el caso de México, no encontramos referencias de construcción o aplicación de infiltrómetros o permeámetros automáticos. Por lo que el objetivo de este trabajo fue diseñar, construir y probar un dispositivo de automatización para infiltrómetros con reservorio de Mariotte.

MATERIALES Y MÉTODOS

Infiltrómetro a Automatizar

Se utilizó un infiltrómetro portátil de carga constante y anillo sencillo (Gómez-Tagle *et al.*, 2008), éste es una variante de los infiltrómetros de presión descritos por Elrick y Reynolds (1992). El infiltrómetro consta de una botella de Mariotte con diámetro de 63.5 mm de plástico acrílico transparente (Plexiglas). El Mariotte tiene adosada una regla graduada en milímetros, una manguera con válvula de paso que comunica la parte inferior del Mariotte y un anillo de acero inoxidable de 88 mm de diámetro y 80 mm de longitud de tapa hermética, que se conecta a la llave de paso. El anillo tiene un tubo de purga soldado herméticamente y un mango de inserción que permite montar y desmontar el anillo fácilmente en el suelo. En el tubo de purga se inserta una manguera de goma como empaque y un tubo de acrílico de 12 mm de diámetro y 200 mm de longitud, que sirve para medir la carga hidráulica aplicada.

Dispositivo de Automatización

El dispositivo de automatización comprende 3 partes. Primero, un sensor de presión diferencial MPX2010DP (Motorola/Free Scale Inc.) el cual es un circuito integrado piezométrico compensado por temperatura. El rango de respuesta se encuentra entre los 0 y 0.025 volts, para presiones entre 0 y 10 kPa (equivalente a 0 y 1.0197 m H₂O) con operatividad entre - 40 y 125 °C e histéresis de presión ± 0.1 kPa (Motorola, 2002). Este sensor tiene una relación lineal entre la presión diferencial aplicada y el voltaje de salida (Motorola, 2002). En la Figura 1 se muestra el sensor en su presentación de caja plástica 344C, con tomas de fluido paralelas, y el esquema de compensación por temperatura.

La segunda parte es un circuito de entrega de energía y acondicionamiento de señal, el cual mantiene

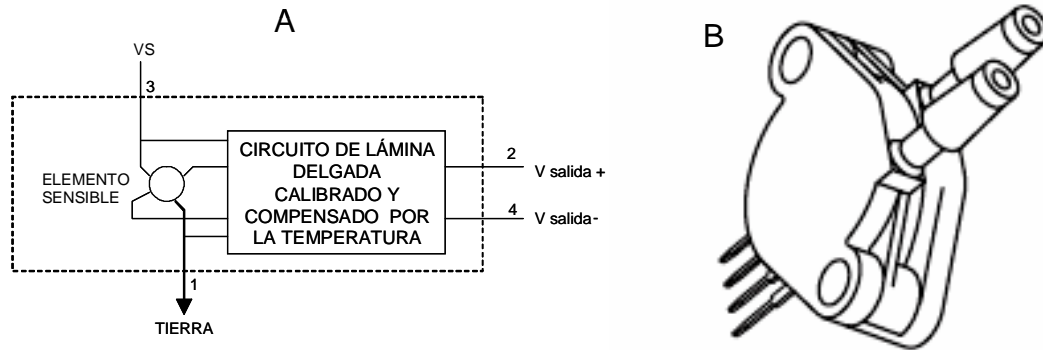


Figura 1. Sensor de presión diferencial MPX2010DP: A) Esquema del sensor de presión calibrado y compensado por la temperatura, B) apariencia del sensor en presentación 344C (cubierta plástica) con entradas de fluido paralelas.

la alimentación del sensor constante y elimina las variaciones del voltaje, junto con un escalamiento de la señal del sensor de 0 a 0.025 volts a 0 a 33 volts. Este circuito funciona con una batería estándar de 9 volts.

La tercera parte es un dispositivo de almacenamiento de datos no volátil (datalogger) EL-USB-3 (Lascar, 2007) programable con un rango de recepción de 0 a 30 voltios. El dispositivo de almacenamiento se habilita para la adquisición y registro de datos en intervalos preprogramados que van desde un segundo hasta 12 h, alcanzando a almacenar 32 510 registros. La unidad EL-USB-3 se conecta fácilmente al circuito mediante 2 cables que se insertan en entradas estándar de 1.5 mm de diámetro. La información analógica se digitaliza y almacena con formato de 10 bits. La hora de inicio de adquisición de datos y el intervalo de toma (1, 10 s, 1, 5, 30 min, 1, 6 y 12 h) se programa desde una computadora personal a través del puerto USB. El datalogger tiene una demanda autónoma de energía, utiliza una batería de litio tamaño ½ AA de 3.6 volts, que dura hasta un año bajo uso normal (Lascar, 2007). En este estudio se empleó una computadora portátil Gateway modelo MA7 con MS Windows XP. La transferencia de datos se realizó empleando el programa compatible para MS Windows XP proporcionado por el fabricante (Lascar, 2007).

En el infiltrómetro, la implementación del dispositivo de automatización con sensor diferencial requiere de un segundo tubo dentro del Mariotte, que conecte el sensor con la cámara de aire en la parte superior del reservorio principal. Además de sistemas de montaje y aseguramiento para el sensor montado en una placa de baquelita y el contenedor del circuito (caja plástica 50 x 150 x 70 mm). La Figura 2 esquematiza el infiltrómetro modificado para automatización, armado y montado en campo.

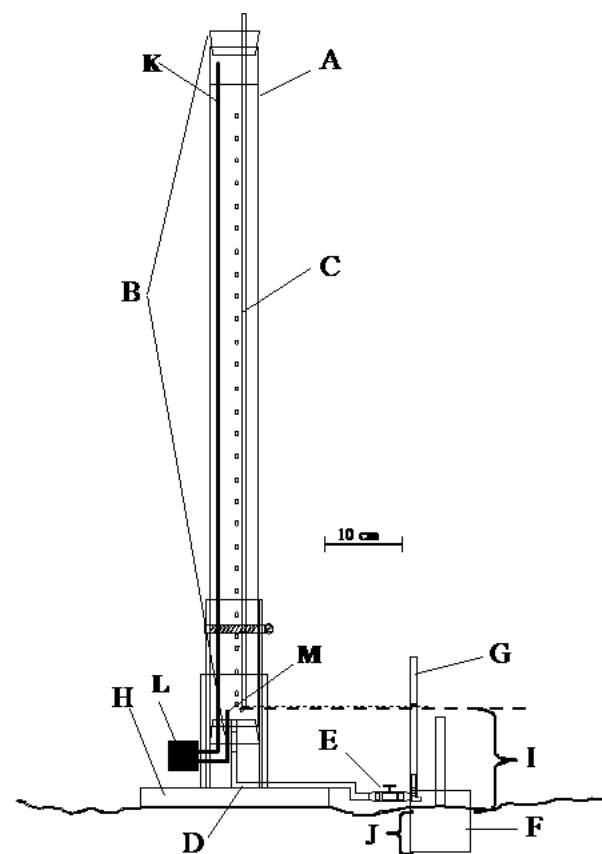


Figura 2. Esquema del infiltrómetro con el dispositivo de automatización armado y montado en campo; A) reservorio principal (Mariotte 63.5 mm diámetro), B) tapones de goma No. 12, C) tubo de burbujeo (9 mm diámetro), D) tubo de salida de agua, E) válvula de paso, F) anillo sencillo (88 mm diámetro y 80 mm longitud), G) tubo de purga y medición de la carga hidráulica, H) base de soporte, I) carga hidráulica constante, J) profundidad de inserción del anillo (60 mm), K) tubo para sensor diferencial (cámara de aire), L) dispositivo de automatización, M) tubo para sensor diferencial (columna de agua).

Calibración del sensor. El sensor se calibró previo al ensamblado de la unidad de automatización, aplicando un voltaje de 9 volts de entrada y columnas de agua entre 0 y 85 cm incrementando en intervalos de 5 ó 10 cm aplicando técnicas de regresión lineal en el análisis.

Eficiencia y medición con la unidad de automatización. Se realizaron pruebas de medición de altura de la columna en laboratorio con niveles estáticos, con burbujeo, de ascenso y descenso. Estas pruebas tienen la finalidad de conocer la eficiencia del dispositivo de automatización en la correcta medición de la altura de la columna de agua con y sin burbujeo, así como en condiciones ascendentes y descendentes como ocurre en los ensayos de infiltración en campo. Se utilizó un montaje similar al propuesto por Ankeny (1992), que difiere en la sustitución de la línea de vacío por una segunda botella de Mariotte (Figura 3, R2). El dispositivo de automatización se programó para registrar información cada 1 y 10 s durante 10 min. La Figura 3 muestra el montaje del sistema de burbujeo. Este funciona con dos reservorios o botellas de Mariotte interconectadas. El primer reservorio (R1) mantiene un nivel constante, este reservorio tiene las mismas dimensiones y características del Mariotte del infiltrómetro a automatizar (Figura 3, a y b). El burbujeo (c) se genera cuando la columna de agua del segundo reservorio (R2) desciende (h) al abrir la válvula de regulación (j). Este descenso genera una succión en la cámara de aire de R1, interconectada con el tubo de burbujeo de R2 (d, e, f, g). El sensor diferencial se encuentra ubicado en la parte inferior de R1 (Figura 3, k) y tiene 2 tomas, (m) a la cámara de aire de R1 y (n) a la base de la columna de agua en el mismo reservorio. El sensor está conectado mediante un cable (l) de 4 líneas al circuito de acondicionamiento de señal, acoplado al datalogger.

Las pruebas de descenso y ascenso de la columna tuvieron lugar en laboratorio con un montaje similar al empleado en campo (Figura 2), pero sin insertar el anillo en el suelo. En las pruebas se llenó el infiltrómetro y se abrió la válvula de paso, la prueba se repitió varias veces con distintos niveles de apertura de la válvula registrando en forma automática y manual para comparar la eficiencia en la medición de altura de la columna.

Pruebas de Campo

Se llevaron a cabo pruebas en diferentes suelos, del sur de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán, dentro de las formaciones denominadas Arcilla Atécuaro, Limo

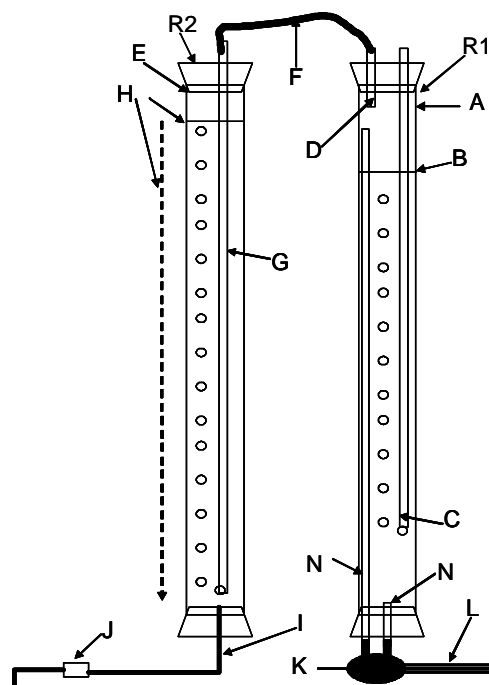


Figura 3. Esquema de montaje para prueba de sensibilidad al burbujeo. A) reservorio 1 (R1), B) nivel de agua constante en R1, C) tubo de burbujeo en R1, D) tubo en cámara aérea R1, E) reservorio 2 (R2), F) conexión entre los dos reservorios R1 y R2, G) tubo de burbujeo en R2, H) nivel de agua descendente R2, I) tubo de salida de agua R2, J) válvula de regulación, K) sensor diferencial, L) conexión al data logger, M) tubo de referencia cámara de aire-sensor, N) tubo de columna de agua-sensor.

Umécuaro, Franco Cointzio y Arena la Joya, los detalles se presentan en el Cuadro 1. Estos suelos abarcan un amplio rango de texturas y conductividades hidráulicas. Con excepción de la Arena la Joya, los sitios se muestrearon previamente para la calibración de campo de el infiltrómetro de anillo sencillo (Gómez-Tagle *et al.*, 2008).

Atécuaro presentó cobertura herbácea de especies anuales. Umécuaro uso agrícola de temporal y cobertura herbácea de especies anuales. Cointzio cobertura herbácea y de arbustos espinosos (<10%). La Joya vegetación incipiente (gramíneas). Los ensayos de infiltración se realizaron en áreas con pendientes menores al 10%. Los sitios de prueba poseen un clima templado subhúmedo con lluvias en verano con temperatura promedio anual de 16.7 °C y precipitación total promedio anual de 849.3 mm (García, 2004).

Para cada ensayo de infiltración el anillo se insertó en el suelo a una profundidad de 60 mm empleando

Cuadro 1. Relación de sitios de muestreo, repeticiones e intervalo de adquisición de datos para las pruebas de campo en forma manual y automatizada.

Sitio	Manual	Automatizada
	Intervalo de adquisición	
	Repeticiones	
Arcilla Atécuaro	5 minutos (N = 5)	5 minutos (N = 5)
Limo Umécuaro	1 minuto (N = 7)	1 minuto (N = 7)
Franco Cointzio	1 minuto (N = 8)	1 minuto (N = 8)
Arena La Joya	1 minuto (N = 5)	10 segundos (N = 5)

un martillo de goma. Se ajustó la carga, entre 4 y 10 mm. Una vez estabilizada, se midió y se tomaron lecturas de la altura de la columna de agua en forma manual con intervalos de 1 y 5 min, y automáticamente con intervalos entre 1 s y 5 min. Los ensayos de infiltración se llevaron a 2.5 h o hasta alcanzar un gasto estable de acuerdo con lo reportado previamente (Gómez-Tagle *et al.*, 2008), excepto en la Arena La Joya, donde se realizaron ensayos de 0.75 h. El cálculo de la conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}) se hizo con el método Wu2 (Wu *et al.*, 1999) que utiliza datos de la fase estacionaria de la curva de infiltración acumulada (tiempo contra lámina acumulada) y los parámetros a y b de la ecuación generalizada (Wu y Pan, 1997). Para el análisis estadístico y comparación se empleó la transformación logarítmica de los datos de conductividad hidráulica saturada, debido a que diversos autores reportan que esta propiedad hidráulica presenta

una distribución log-normal (Gómez-Tagle *et al.*, 2008; Mallants *et al.*, 1997; Russo y Bresler, 1981).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración del Sensor

La calibración permitió obtener 2 ecuaciones para describir la relación entre la altura de la columna y el voltaje de salida, la primera adquiere la forma $y = 0.04091 x + 1.16627$ con $R^2 = 0.9996$ y $P < 0.0001$ ($N = 18$), mientras que la segunda adquiere la forma $y = 0.04126 x + 1.179$, con $R^2 = 0.9986$ y $P < 0.0001$ ($N = 9$). Ambas ecuaciones permiten calcular la altura de la columna de agua a partir de un voltaje de salida.

Eficiencia de Medición con la Unidad de Automatización

En la Figura 4A se presenta la gráfica de nivel de la columna de agua obtenida manual (30 s) y automáticamente (1 s), mientras que en la Figura 4B se presenta la relación entre la medición manual y automática para la altura de la columna. Las mediciones de las alturas medición manual y la automatizada se encontraron desfasadas, debido a la distancia entre la base del Mariotte y el lugar de ubicación del sensor. Esto ocasionó que el modelo lineal ($y = ax + b$) entre altura manual y automatizada no tuviera como ordenada al origen (b) el punto 0, sino que ésta fue de 7.04 cm (Figura 4B). La ecuación lineal obtenida arrojó un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.9981$, con un valor de la pendiente $a = 0.9986$, correspondiendo ésta al incremento en la altura medida manualmente con respecto

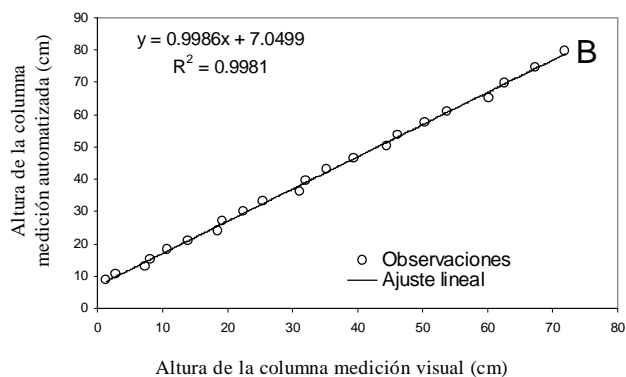
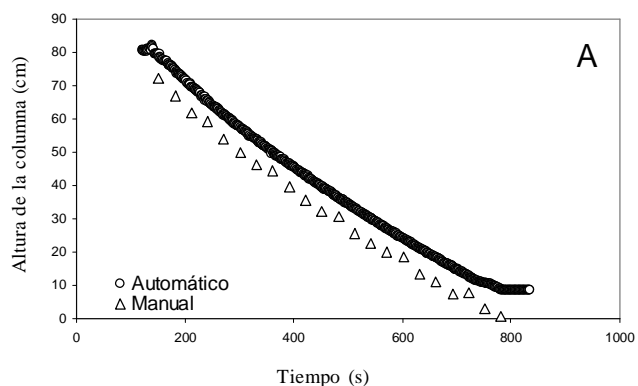


Figura 4. Registro de altura de columna manual (30 s) y automática (1 s). A) comparación entre formas de registro en columna descendente, B) registro manual contra registro automático con ajuste lineal.

a la obtenida mediante automatización. Ésta relación fue de 1:0.9986, muy cercana a la relación 1:1 idónea.

La variación en la medición de la columna de agua con burbujeo se realizó con una altura de 60 cm. El intervalo de adquisición de 1 s mostró un error sistemático en la altura medición automatizada de la columna de agua, con valores entre 59.68 y 60.56 cm (Figura 5A), mientras que con intervalo de 10 s mostró un comportamiento sin un patrón definido (Figura 5C). Ankeny (1992) reporta patrones similares para los permeámetros de disco automatizados con dos transductores, y explica que la altura de la columna medida por los transductores varía debido a la modificación en la tensión dentro de la cámara del Mariotte. Durante las pruebas, el ascenso de la burbuja (Figura 3C) genera una disminución en la tensión registrándose un cambio en la presión, que se registra como variación de altura en la columna. La amplitud de los cambios de tensión inducidos por el burbujeo dependen tanto del diámetro del tubo de burbujeo como la frecuencia del burbujeo. Un tubo de burbujeo de diámetro pequeño reduciría la amplitud en los cambios de tensión registrados, ya que las burbujas serían pequeñas y uniformes. Sin embargo, un tubo de burbujeo demasiado pequeño restringirá inevitablemente el flujo

de aire, limitando la funcionalidad del Mariotte (Constanz y Murphy, 1987).

Para ambos intervalos de registro (1 y 10 s) se observa una desviación de 1 cm para el primer intervalo y de 0.4 cm para el segundo (Figura 5B, D). El Cuadro 2, muestra los estadísticos descriptivos para ambos intervalos de registro de datos. Puede apreciarse que la desviación estándar es de 0.22 y 0.17 cm. Ankeny (1992) menciona que una calibración puede considerarse exitosa cuando las diferencias se separan entre 0.1 y 0.2 cm de la altura estática de la columna. En nuestro caso, las desviaciones se encuentran en el rango mencionado por este autor, mientras que los coeficientes de variación para ambos intervalos de adquisición fueron menores a 0.5%.

La Figura 6 muestra el funcionamiento en registro continuo de altura de la columna de agua del infiltrómetro, las literales indican distintas partes del ensayo, puede incluso apreciarse un falso contacto durante la prueba (Figura 6G) el cual generó registros fuera de rango.

El análisis de los datos de campo indicó que la mayor K_{fs} se obtuvo en la Arena La Joya, y la menor en la Arcilla Atécuaro (Cuadro 3), no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre el $\ln K_{fs}$ obtenido por método manual o automático (Cuadro 4)

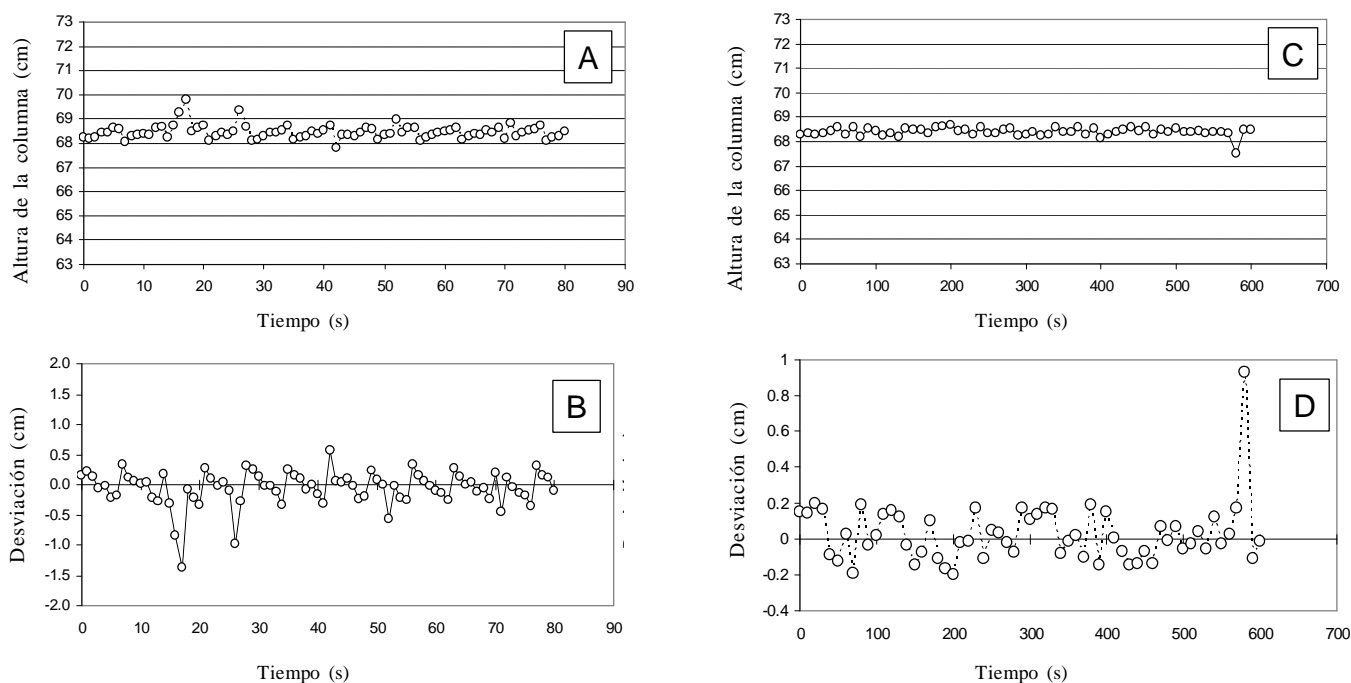


Figura 5. Variación en la medición de altura de una columna de agua estática (60 cm) por burbujeo inducido. A) intervalo de toma cada 1 s y B) desviación respecto a la altura fija con intervalos cada 1 s. C) intervalo de toma cada 10 s, D) desviación respecto a la altura de toma con intervalos cada 10 s.

Cuadro 2. Estadística descriptiva para la variación en la altura de una columna de agua estática, inducida por burbujeo, con dos intervalos de adquisición de datos para el infiltrómetro automatizado.

Altura	Intervalo de adquisición de datos	
	1 s	10 s
cm		
Visual	60	60
Mínima	66.7	67.5
Máxima	70.38	68.7
Promedio	68.46	68.4
Desviación estándar	0.22	0.17
N	600	60
Coefficiente de variación (%)	0.32	0.24

y los datos de K_{fs} se encontraron dentro de los intervalos reportados previamente para los mismos sitios (Gómez-Tagle *et al.*, 2008). El no encontrar diferencias estadísticas respecto al método manual en este estudio indica que el infiltrómetro automatizado es igualmente capaz de detectar las diferencias de K_{fs} relacionadas al cambio textural.

Sin embargo, para varias de las formaciones analizadas el coeficiente de variación fue menor con el método automatizado. Esta diferencia la atribuimos a que la obtención de datos de la altura de la columna de agua con el módulo de automatización reduce el error en la medición, tanto en suelos con K_{fs} elevadas como

Cuadro 3. Estadística descriptiva para las conductividades hidráulicas saturadas calculadas a partir de datos obtenidos por método manual o automático en cuatro sitios.

Sitio	Método	Promedio	Desviación estándar	N
		mm h ⁻¹		
Arcilla	Automático	107.04	45.26	7
Atécuaro	Manual	155.56	47.05	7
Limo	Automático	5.81	1.67	5
Umécuaro	Manual	12.14	3.44	5
Franco	Automático	49.65	21.72	7
Cointzio	Manual	68.31	42.85	7
Arena	Automático	2282.2	429.98	5
La Joya	Manual	1671.82	793.56	5

en aquellos con K_{fs} bajas. En nuestra experiencia, con el método manual, es necesario registrar en forma sistemática la lectura de nivel ya sea en la parte inferior o superior del menisco de agua. Si se hacen las lecturas indistintamente, el error es de aproximadamente ± 2 mm además de aquel inducido por el burbujeo.

Aún cuando el dispositivo automatizado, también está sujeto a error en la medición de la columna de agua, como se mostró previamente, la capacidad de adquirir los datos en tiempos en intervalos cortos predefinidos, permitió obtener una mayor cantidad de puntos que se tradujo en mejores ajustes lineales de las fases estacionarias. Wu *et al.* (1999) recomiendan emplear

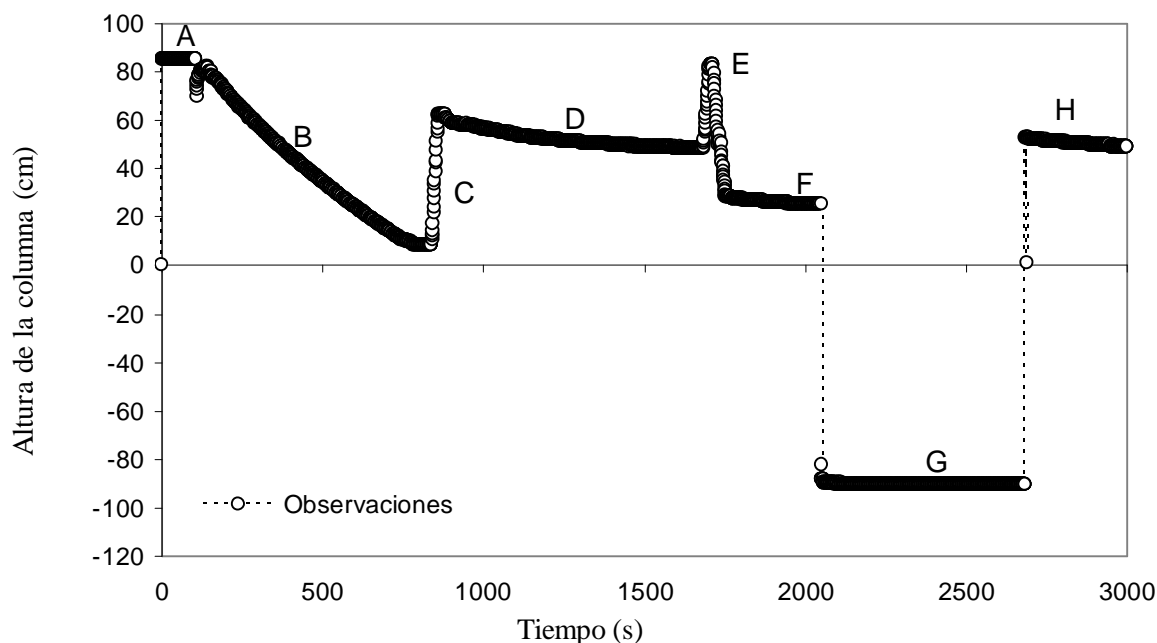


Figura 6. Prueba de infiltrómetro automatizado (adquisición 1 s). A) Encendido, B) Vaciado de reservorio, C) Llenado de reservorio, D) Vaciado lento, E) Llenado y vaciado rápido, F) Cambio a vaciado lento, G) Falso contacto durante llenado, H) Vaciado lento.

Cuadro 4. Pruebas de Tukey, análisis de varianza de una vía y formación de grupos homogéneos para los dos métodos de adquisición de datos y cuatro sitios. Misma letra indica pertenencia al mismo grupo, distinta letra indica pertenencia a grupos diferentes con $\alpha = 0.05$.

Sitio	Método				<i>P</i>	Significancia
	Manual		Automático			
	Media In K_{fs}	Ds	Media In K_{fs}	Ds		
Arcilla Atécuaro	2.46 a	0.29	1.71 a	0.31	0.4393	No
Limo Umécuaro	3.98 b,c	0.82	3.79 b	0.54	0.9937	No
Franco Cointzio	4.98 c	0.41	4.52 b,c	0.69	0.7888	No
Arena La Joya	7.29 d	0.62	7.71 d	0.19	0.9277	No

Ds = desviación estándar, K_{fs} = conductividad hidráulica saturada.

la mayor cantidad de registros en fase estacionaria como sea posible.

Si bien la unidad de automatización es funcional y autónoma, consideramos que sería recomendable que pudiera ser programada sin requerir una computadora personal portátil.

CONCLUSIONES

- El dispositivo de automatización permitió obtener datos con una supervisión mínima, lo cual simplifica los muestreos con varios infiltrómetros en simultáneo, facilitando así la obtención de información para la caracterización de algunas propiedades hidráulicas de los suelos como la conductividad hidráulica saturada (K_{fs}).
- No se presentaron diferencias significativas entre la K_{fs} calculada a partir de mediciones manuales o automatizadas.
- La unidad de automatización es capaz de medir una columna de agua entre 0 y 85 cm con un error de ± 2 mm.

AGRADECIMIENTOS

La investigación fue financiada a través de una beca doctoral para el primer autor CVU 168649 y el proyecto: CONACYT-SEMARNAT (SEMARNAT-2002-C01-00012) "Diagnóstico integrado y priorización de alternativas de rehabilitación para la sustentabilidad de la cuenca de Morelia (Cuitzeo)".

LITERATURA CITADA

- Amézketa Lizarraga, E., R. Aragüés Lafarga y R. Gazol Lostao. 2002. Desarrollo de un infiltrómetro automático y su aplicación en campo. *Investigación agraria. Producción y Protección Vegetales* 17: 131-142.
- Angulo-Jaramillo, R., J. P. Vandervaere, S. Roulier, J. L. Thony, J. P. Gaudet, and M. Vauclin. 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: A review and recent developments. *Soil Tillage Res.* 55: 1-29.
- Ankeny, M. D. 1992. Methods and Theory for Unconfined Infiltration Measurements. *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. Special publication series. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 30: 123-141.
- Ankeny, M. D., M. Ahmed, T. C. Kaspar, and R. Horton. 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 467-470.
- Ankeny, M. D., T. C. Kaspar, and R. Horton. 1988. Design for an automated tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 893-896.
- Ball, B. C., D. J. Campbell, J. T. Douglas, J. K. Henshall, and M. F. O'Sullivan. 1997. Soil structural quality, compaction and land management. *European J. Soil Sci.* 48: 593-601.
- Berndtsson, R. and M. Larson. 1987. Spatial variability of infiltration in a semi-arid environment. *J. Hydrol.* 90: 117-133.
- Bodhinayake, W., B. C. Si, and K. Noborio. 2004. Determination of hydraulic properties in sloping landscapes from tension and double-ring infiltrometers. *Vadose Zone J.* 3: 964-970.
- Campos-Aranda, D. F. 1987. Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.
- Casey, F. X. M. and N. E. Derby. 2002. Improved design for an automated tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 64-67.
- Constanz, J. and F. Murphy. 1987. An automated technique for flow measurement from Mariotte reservoirs. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 252-254.
- Descroix, L., J. L. González Barrios, D. Viramontes, J. Poulénard, E. Anaya, M. Esteves, and J. Estrada. 2008. Gully and sheet erosion on subtropical mountain slopes: Their respective roles and the scale effect. *CATENA* 72: 325-339.
- Descroix, L., D. Viramontes, J. Estrada, J.-L. Gonzalez Barrios, and J. Asseline. 2007. Investigating the spatial and temporal boundaries of Hortonian and Hewlettian runoff in Northern Mexico. *J. Hydrol.* 346: 144-158.
- Descroix, L., D. Viramontes, M. Vauclin, J. L. Gonzalez Barrios, and M. Esteves. 2001. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico). *CATENA* 43: 115-135.

- Elrick, D. E. and W. D. Reynolds. 1992. Infiltration from constant-head well permeameters and infiltrometers. *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice*. Soil Sci. Soc. Am. J. 30: 1-24.
- Esteves, M., L. Descroix, N. Mathys, and J. M. Lapetite. 2005. Soil hydraulic properties in a marly gully catchment (Draix, France). *CATENA* 63: 282-298.
- Eynard, A., T. E. Schumacher, M. J. Lindstrom, and D. D. Malo. 2004. Porosity and pore-size distribution in cultivated Ustolls and Usterts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1927-1934.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5. Insituto de Geografía UNAM. México, D. F.
- Gómez-Tagle, C. A., R. A. F. Gómez-Tagle, J. Batlle-Sales, H. Zepeda-Castro, M. A. Guevara-Santamaría, S. Maldonado-López y J. E. Pintor. 2008. Conductividad hidráulica saturada de campo: uso de un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo. *Terra Latinoamericana*. 26: 287-297.
- Johnson, D. O., F. J. Arriaga, and B. Lowery. 2005. Automation of a falling head permeameter for rapid determination of hydraulic conductivity of multiple samples. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 828-833.
- Kwicklis, E., M. Witkowski, K. Birdsell, B. Newman, and D. Walther. 2005. Development of an infiltration map for the Los Alamos Area, New Mexico. *Vadose Zone J.* 4: 672-693.
- Lascar. 2007. EI-USB-3, Datasheet. 6: 3.
- Maderey, L. E. y R. Jiménez. 2005. Principios de hidrogeografía, estudio del ciclo hidrológico. 1. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F.
- Mallants, D., B. P. Mohanty, A. Vervoort, and J. Feyen. 1997. Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. *Soil Technol.* 10: 115-131.
- Mbagwu, J. S. C. 1995. Saturated hydraulic conductivity in relation to physical properties of soils in the Nsukka Plains, southeastern Nigeria. *Geoderma* 68: 51-66.
- Meadows, D. G., M. H. Young, and E. V. McDonald. 2008. Influence of relative surface age on hydraulic properties and infiltration on soils associated with desert pavements. *CATENA* 72: 169-178.
- Milla, K. and S. Kish. 2006. A low-cost microprocessor and infrared sensor system for automating water infiltration measurements. *Comput. Electron. Agric.* 53: 122-129.
- Moret, D., M. V. Lopez, and J. L. Arrue. 2004. TDR application for automated water level measurement from Mariotte reservoirs in tension disc infiltrometers. *J. Hydrol.* 297: 229-235.
- Motorola, I. 2002. MPX2010, MPXV2010G Series. 12.
- Návar, J. and T. J. Synnott. 2000. Soil infiltration and land use in Linares, N.L., Mexico. *Terra* 18: 255-262.
- Nightingale, H. I. and W. C. Bianchi. 1970. Rapid measurement of hydraulic conductivity changes in slowly permeable soils. *Soil Sci.* 110: 221-228.
- Overman, A. R., J. H. Peverly, and R. J. Miller. 1968. Hydraulic conductivity measurements with a pressure transducer. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 884-886.
- Prieksat, M. A., M. D. Ankeny, and T. C. Kaspar. 1992. Design for an automated, selfregulating, single-ring infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1409-1411.
- Reynolds, W. D. and D. Elrick. 1991. Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 633-639.
- Russo, D. and E. Bresler. 1981. Soil hydraulic properties as stochastic processes: I. An analysis of field spatial variability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 682-687.
- Soracco, G. 2003. Relación entre la conductividad hidráulica saturada y la densidad aparente en tres situaciones de manejo contrastantes. *Evaluación de Parámetros y Procesos Hidrológicos en el Suelo*. UNESCO. Paris, Francia.
- Spongrová, K., C. Kechavarzi, M. Dresser, S. Matula, and R. J. Godwin. 2009. Development of an automated tension infiltrometer for field use. *Vadose Zone J.* 8: 810-817.
- Wilson, M. A., R. J. E. Brown, W. D. Hoff, and M. A. Carter. 2000. A falling head permeameter for the measurement of the hydraulic conductivity of granular solids. *Rev. Sci. Instrum.* 71: 3942-3946.
- Wu, L. and L. Pan. 1997. A generalized solution to infiltration from single-ring infiltrometers by scaling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1318-1322.
- Wu, L., L. Pan, J. Mitchell, and B. Sanden. 1999. Measuring saturated hydraulic conductivity using a generalized solution for single-ring infiltrometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 788-792.