

3

Medición de la infiltración en el suelo. Infiltrómetro de anillo simple y simulador de lluvias

1. CONCEPTOS BÁSICOS

La entrada de agua en la matriz del suelo a través de la interfase suelo-atmósfera se denomina infiltración (Lal & Shukla, 2004). La infiltración del agua en la zona vadosa o no saturada del suelo es una propiedad física muy importante para muchas disciplinas de la ciencia del suelo, tales como las agronómicas, ingeniería civil y ciencias ambientales (Verbist et al., 2010). Interviene en la mayoría de los modelos de transporte de agua-solutos y de crecimiento de cultivos y es ampliamente usada en la evaluación de la calidad física del suelo. El conocimiento de las propiedades hidráulicas del suelo (conductividad hidráulica saturada y parámetros de retención) es esencial para resolver un conjunto de problemas, como predicción de escurrimientos de eventos de precipitación, transporte de sedimentos y control de inundaciones y para el modelado de procesos hidrológicos y su relación con el transporte de contaminantes (Xu et al., 2012). Además, es utilizada para la estimación de la disponibilidad de agua para el crecimiento de las plantas, estimaciones de recarga de los acuíferos y evaluación del potencial de contaminación de acuíferos (Ravi & Williams, 1998).

Las mediciones de las propiedades hidráulicas pueden ser conducidas en laboratorio o bajo condiciones de campo usando diferentes métodos, siendo preferidos aquéllos con mínimo disturbio del suelo, bajo consumo de tiempo (i.e. de rápida determinación) y bajo costo económico (Xu et al., 2012). Si bien, la infiltración es un proceso investigado desde hace mucho tiempo, existe mucha incertidumbre cuando se intenta modelar el proceso bajo condiciones de campo (Verbist et al., 2010).

La tasa a la cual el agua ingresa y se mueve a través del perfil del suelo está influenciada por el condicionamiento físico del mismo (Walsh & McDonnell, 2012). Entre las propiedades físicas se enumeran textura, estructura, densidad aparente, la porosidad y el contenido de humedad del suelo. Otros factores también influyen la tasa de infiltración potencial afectándola, como por ejemplo las características de la superficie, proporción de suelo cubierto por vegetación, propiedades hidrodinámicas del suelo, tales como la conductividad hidráulica saturada (K_s), la relación conductividad hidráulica-humedad del suelo, la curva de retención hídrica, y el contenido de agua del suelo al comienzo del evento de precipitación. Asimismo, las prácticas de manejo también afectan al proceso de infiltración. Un suelo que es continuamente labrado, pisoteado o sometido a otras actividades antropogénicas desarrollan una pobre estructura conduciendo al sellado superficial de poros y encostramiento, restringiendo el movimiento del agua e incrementando el escurrimiento superficial (Walsh & McDonnell, 2012; Lal & Shukla, 2004).

La humedad del suelo tiene un efecto significativo sobre la capacidad de infiltración del suelo, encontrándose que a mayor humedad edáfica la infiltración es menor (Lowery et al., 1996). El contenido de humedad del suelo es el factor que domina la tasa de infiltración durante la primera hora y el efecto disminuye a medida que transcurre más tiempo de ensayo. Asimismo, el efecto de flujo lateral se ve reducido a mayor contenido de humedad en el suelo, reduciendo las diferencias en las tasas de infiltración observadas entre infiltrómetros de anillo simple y doble (Chowdary et al., 2006).

Tabla 1. Cuadro comparativo de tres metodologías para la medición de la infiltración en el suelo: Infiltrómetro de anillo simple, simulador de lluvias e Infiltrómetro de disco. Adaptado de Michelena et al. (2010).

Infiltrómetro de anillo simple	Simulador de lluvias	Infiltrómetro de disco
Con carga hidráulica.	Sin carga hidráulica. Con impacto de gota.	Con/Sin carga hidráulica. Sin impacto de gota.
Sencillo y operativo	Requiere más tiempo operativo.	Sencillo y operativo.
Infiltración instantánea y acumulada.	Infiltración instantánea y acumulada. Información sobre estado físico del suelo. Esguerramiento e Índice de Erosión	Infiltración instantánea y acumulada. Macro porosidad
Ambiente natural. Con y sin rastrojos.	Ambiente natural. Con y sin rastrojos. Con planta de cultivo	Ambiente modificado.
Posibilidad de muchas repeticiones.	Posibilidad de pocas repeticiones.	Posibilidad de muchas repeticiones.
Construcción sencilla.	Construcción compleja.	Construcción sencilla.
Bajo costo.	Alto costo.	Bajo costo.

La falta de homogeneidad de los perfiles de suelos tiene un efecto marcado sobre el proceso de infiltración. La infiltración en un primer momento depende de las relaciones entre la conductividad hidráulica y los gradientes de succión de cada capa u horizonte. En este sentido, los contenidos de humedad edáfica y las conductividades hidráulicas son diferentes para cada horizonte y ello podría generar una alteración en la velocidad del movimiento del agua en el perfil (Lal & Shukla, 2004).

El proceso de la infiltración puede describirse en forma cuantitativa resolviendo la ecuación de transporte completa (Richards, 1931; Hari Prasad et al., 2001) o considerando una relación entre la infiltración acumulada y el tiempo expresada en función de parámetros de base física o empíricos (Haverkamp et al., 1990). Las soluciones analíticas y simplificadas de la ecuación de Richard proveen herramientas útiles para estudiar sistemas de flujo insaturado sencillos con condiciones iniciales y límites relativamente simples. Las soluciones de esos modelos están basadas en los siguientes supuestos: i) el suelo es homogéneo, ii) el contenido de humedad inicial es uniforme a través del perfil, y iii) el contenido de humedad en la superficie es constante y cercano a la saturación y, la precipitación o el nivel de riego son constantes

(Hari Prasad et al., 2001). Todos los modelos de infiltración integran esta información usando varios parámetros y variables cuyos valores necesitan ser determinados por medición o por calibración (Chahinian et al., 2005) aunque existe cierto desconocimiento acerca de cuáles son los mejores modelos y bajo qué condiciones (de laboratorio o de campo), ya que cada una de ellos muestra comportamientos diferentes en cada situación (Mishra et al., 2003). Eiza et al. (2008) compararon la capacidad para describir la infiltración del agua en el suelo de dos variantes al modelo de Philip y Horton en suelos de diferentes texturas, de la Región Pampeana. El modelo Horton fue el más adecuado para todos los tipos de suelos, y demostró ser una herramienta de utilidad para analizar de manera sencilla sistemas de flujo insaturado.

El método de medición de la infiltración seleccionado dependerá de distintos factores, tales como el objetivo principal del experimento, el tipo de suelo, impacto del rastrojo superficial, sencillez, operatividad, costos, número posibles de repeticiones y disturbio del suelo, entre otros (Michelena et al., 2010). A modo ilustrativo, en la Tabla 1 se presenta un cuadro comparativo de tres metodologías para la medición de la infiltración en el suelo: Infiltrómetro de anillo simple, simulador de lluvias e Infiltrómetro de disco. De

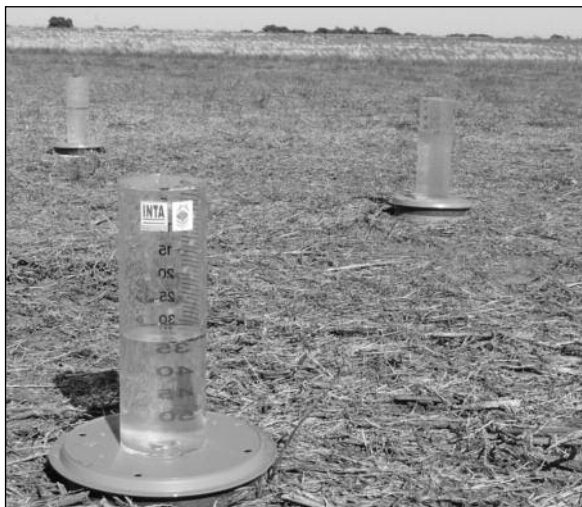


Figura 1. Vista del equipo de infiltrómetros de Anillo Simple.

todas maneras, se debe tener en cuenta que el método utilizado también hará que el resultado sea distinto (Walsh & McDonnell, 2012). Entre los métodos propuestos el Infiltrómetro de Anillo Simple ofrece una técnica simple de medición de la infiltración en el suelo; aunque debido a que el flujo total medido considera tanto el flujo vertical como el flujo horizontal, podría sobreestimar, por lo cual, se ha recomendado utilizar un doble anillo como *buffer* al flujo lateral. De todas maneras, Bouwer (1986) no encontró beneficios por utilizar un anillo como *buffer*, aunque como precaución se debe usar un diámetro grande, superior a los 20 cm, para el anillo simple (Söderberg, 2015).

En este capítulo describiremos los métodos de Anillo Simple y de Micro-simulador de lluvias. Los equipos y metodologías fueron desarrolladas en el Instituto de Suelos (INTA). A fin de obtener los valores de infiltración básica o final ajustados para cada situación, se puede aplicar los lineamientos establecidos en Eiza et al. (2014), en el que se explica el desarrollo de un programa que utiliza el modelo Horton en base a los datos observados de infiltración o escurrimientos en una planilla de cálculo desarrollada para obtener el parámetro de infiltración final del suelo.

2. INFILTRÓMETROS DE ANILLO SIMPLE

El método para medir infiltración por anillo simple probablemente es el método más versátil de todos los disponibles (Johnson, 1963). Estos equipos son de construcción sencilla y se compo-

nen de las siguientes partes (Fig. 1):

- *Anillo Infiltrómetro*: es un cilindro metálico de 21 cm de diámetro y 12 cm de alto y 4,1 mm de espesor.
- *Disco Soporte*: son discos de plásticos de un diámetro levemente mayor al cilindro metálico y un reborde que le permite calzar sobre él. Tiene una perforación central que permite la entrada de la botella de forma invertida.
- *Botella graduada o Mariotte*: es una botella de acrílico transparente sobre la que se imprime una escala graduada en mm de lámina de agua.
- *Placa de acero*: es una placa maciza que permite clavar el Infiltrómetro de manera pareja en el suelo, evitando agrietamientos que pudieran generar errores en las lecturas.

Los ensayos de infiltración se caracterizan por la periodicidad, repeticiones y tiempo de medición, parámetros que se describen a continuación.

2.1. Periodicidad de la determinación

La determinación de la infiltración debe realizarse sobre suelo no disturbado, luego de transcurrido al menos un mes desde la última labranza. Se proponen determinaciones de caracterización inicial y con una frecuencia que dependerá a los objetivos en estudio. Se sugieren dos momentos de muestreos: antes de la siembra y luego de la cosecha del cultivo.

2.2. Repeticiones

El número de repeticiones dependerá principalmente del tamaño de las unidades experimentales y de las condiciones estructurales del suelo (cuanto mayor porosidad y estabilidad de la estructura tenga el suelo, mayor será la variabilidad). Sin embargo, el número mínimo de repeticiones sugeridos, es de 4 por tratamiento.

2.3. Tiempo de medición

La duración total del ensayo dependerá de la humedad inicial, textura y estructura, y de estas variables con relación a los objetivos del estudio. Se sugiere realizar lecturas con una frecuencia de 5 min y extenderlas por un tiempo mínimo de 1 hora para suelos de texturas finas y de 2 horas para suelos de texturas gruesas (arenosos).

Tabla 2. Planilla de registro de lecturas de infiltración con anillo

Ubicación: Humedad inicial promedio:				Fecha: Textura:			Cultivo: Rotación:		
TIEMPO Minutos	LECTURA R I (mm)	INF.ACUM mm	INF.INST. mm/h	LECTURA R II (mm)	INF.ACUM mm	INF.INST. mm/h	LECTURA R III (mm)	INF.ACUM mm	INF.INST. mm/h
5									
10									
15									
20									
25									
30									
35									
40									
45									
50									
55									
60									

2.4. Procedimiento

Se comienza clavando en el suelo cada uno de los anillos infiltrómetros. Para ello se debe seleccionar un sitio homogéneo, tomando la precaución de evitar pisadas de vehículos, pisoteo de animales, corridas de agua. Utilizando la placa de acero, se apoya sobre el Infiltrómetro y se golpea con un martillo hasta la marca indicada en el cilindro, quedando enterrado 5 cm. Esta marca es una línea ancha y se debe clavar hasta la parte inferior de dicha línea, permitiendo que dentro del Infiltrómetro se genere una carga de agua homogénea. Una vez clavados todos los infiltrómetros se disponen botellas graduadas junto a cada uno de ellos, se colocan los Discos de soporte plásticos y con la asistencia de un cronómetro y en un orden que se respetará durante todo el ensayo, se invierten sobre cada soporte las botellas. Transcurridos 5 minutos se realiza la primera lectura, registrando toda la información en planilla (Tabla 2). Las lecturas en cada botella se deben hacer siguiendo el orden en el que se colocaron. Las lecturas se repiten cada 5 minutos o de acuerdo a un tiempo preestablecido.

Para dar por finalizado un ensayo de infiltración es de vital importancia alcanzar la infiltración básica, final o estabilizada. En este sentido se deberían registrar 3 mediciones consecutivas similares (la tasa de entrada de agua en el suelo es constante). Como norma general este tiempo se fija en 1 hora, aunque en algunos suelos muy arenosos con más de 80% de arenas, no se alcanza fácilmente la infiltración estabilizada, lo que exige prolongar el tiempo de toma de lecturas. Al inicio de cada ensayo de infiltración es recomendable realizar un muestreo de la humedad inicial del

perfil de suelo. Esto permitirá realizar mejores interpretaciones de los resultados.

El ajuste de los datos se realiza siguiendo el protocolo de ajuste de datos al modelo de Horton, según se describió previamente.

2.5. Ejemplos de ensayos de infiltración con Anillo Simple

Para ejemplificar la explicación previa se presentan resultados de ensayos de infiltración con Anillo Simple para diferentes provincias de Argentina (Fig. 2). Se observa que existe una gran variabilidad entre los diferentes sitios. La misma es producto de los distintos tipos de suelos y los manejos realizados previo al ensayo de infiltración. En todos los casos se obtuvo un ajuste satisfactorio de la variable, lo cual permite realizar una correcta interpretación de los resultados.

3. MICROSIMULADOR DE LLUVIAS

El marcado interés por el estudio de las propiedades físico-hídricas de los suelos, condujeron al desarrollo de mecanismos e instrumentos que tratan de simular los efectos de la lluvia natural. Entre estos, los simuladores de lluvia son herramientas aplicadas desde hace bastante tiempo en investigaciones sobre infiltración, escurrimiento y erosión hídrica, a campo y en laboratorio (Bryan & Ploey, 1983). A diferencia de la lluvia natural, en las lluvias simuladas el tamaño de gota es uniforme e independiente de la intensidad. Asimismo, es difícil simular el efecto del viento, que puede incrementar la energía cinética de la gota. Meyer & Monke (1965) condiciona el uso del simulador de lluvia principalmente a la obtención de evaluaciones comparativas bajo distintas condiciones de

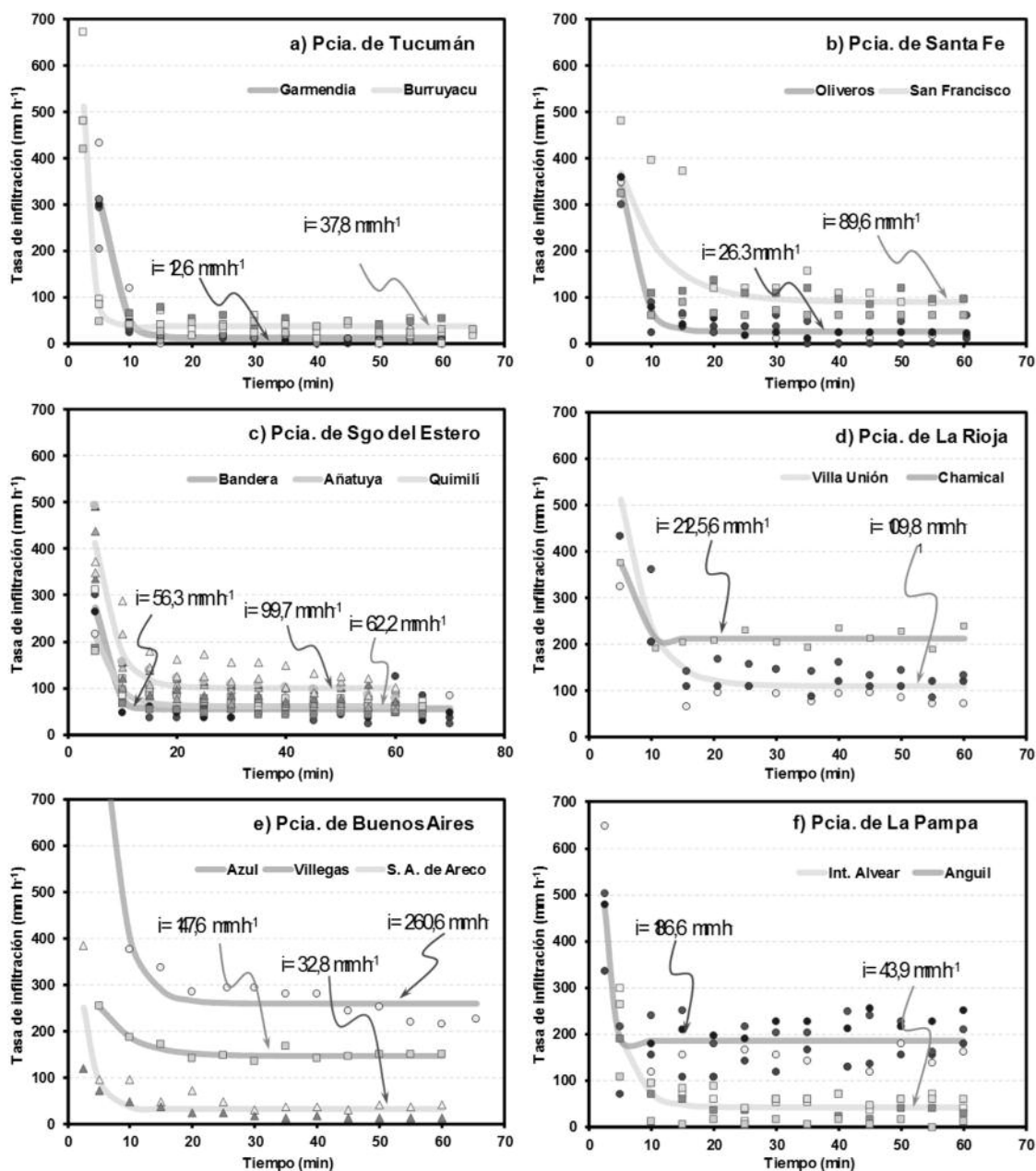


Figura 2. Ensayos de infiltración con Anillo Simple para diferentes provincias de Argentina. a) Tucumán; b) Santa Fé; c) Santiago del Estero; d) La Rioja; e) Buenos Aires; y f) La Pampa

suelos, cultivo y manejo. Según Slattery & Bryan (1992) la medición de la infiltración en un suelo con dispositivos que apliquen el agua en forma de gotas, son instrumentos válidos para observar el efecto de las lluvias como generador de costras o sellos superficiales. Esto es particularmente importante considerando que, dentro de la gama de impactos ambientales de las tecnologías aplicadas, el deterioro de la condición superficial de los

suelos, reflejado en la formación de costras y sellos, es una de las degradaciones que más influyen a todo el sistema de producción (Bricchi et al., 1996). En este sentido, Cisneros et al. (1997) evaluaron el grado de deterioro de algunas propiedades físicas (densidad aparente, conductividad hidráulica saturada, velocidad de infiltración, resistencia mecánica, entre otras) de un suelo Haplustol típico sin uso agrícola ni gana-

dero y uno bajo agricultura continua. Esta evaluación mostró que los suelos analizados presentaban un grado relativo de alteración de las variables estudiadas entre el 85 y 90%, es decir muy próximos a la degradación máxima posible.

Dentro de la amplia variedad de simuladores de lluvia interesa destacar a los micro-simuladores. Éstos son particularmente adecuados para relevamientos de suelos debido a que son livianos para transportar y fáciles de manejar a campo (Kamphorst, 1987). La limitación del micro-simulador es que al ser un instrumental que requiere tiempo de armado, se dificulta aumentar el número de repeticiones. Por otro lado, se necesita tener una alta provisión de agua para llevar a cabo el ensayo. No obstante, es un instrumento expeditivo que permite evaluar en el terreno la infiltración, el escurrimiento, las pérdidas de suelo correspondiente a lluvias simuladas de lámina total con intensidad y energía conocidas, en dis-

tintas condiciones de pendiente, roturación y cobertura de suelo (Irurtia & Mon, 1994). En este sentido, entre las determinaciones más frecuentes que se realizan se mencionan: a) Infiltración total de una lluvia (mm); b) Tasa de infiltración final (mm hora⁻¹); c) Escurrimiento total de una lluvia (mm); d) Distribución del escurrimiento durante una lluvia (mm); e) Relación lluvia/escurrimiento; f) Pérdida de suelo (t ha⁻¹); g) Índice de erosión en g.KJ⁻¹ (IE); g) Sortividad (S); h) Grado de cobertura superficial (COB); e i) Índice de Rugosidad superficial (RR).

En comparación con las parcelas expuestas a la lluvia natural estos experimentos ofrecen la ventaja de alta calidad de los datos y la resolución en condiciones bien definidas. Esto es especialmente cierto con respecto a las propiedades de la lluvia, que por lo general se mantienen constantes dentro de un conjunto de datos para facilitar las comparaciones entre tratamientos, que comúnmente



Figura 3. a: Micro-simulador de lluvias. b) Detalle del micro-simulador de lluvias mostrando una modificación para adaptarlo a terrenos con mucha pendiente.

son difíciles de comparar bajo condiciones de lluvia natural, las que pueden variar incluso en distancias cortas (Fiener & Auerswald, 2009).

El micro-simulador de lluvias desarrollado en el Instituto de Suelos (CIRN INTA) (Irrurtia et al., 2013) es un equipo que está conformado por una estructura metálica (Fig. 3 a y b) que se compone de:

- *Base de hierro*: es una estructura reforzada cuadrada de 50 cm de lado que se clava en el suelo objetivo definiendo la micro-parcela que se evaluará (Fig. 4). Esta posee tres de sus lados más elevados y una bandeja prolongada en el cuarto lado, que permite la salida de los escurrimientos.

- *Columnas de hierro ángulo*: tienen una altura de 1,5 m y permiten unir la base con una estructura cuadrada en la parte superior que sirve de soporte para la placa portagoteros. Todo este conjunto se une mediante tornillos.

- *Placa portagoteros*: es una placa doble de acrílico transparente en la que se disponen 169 goteros distribuidos en forma de cuadrícula separados regularmente. Los goteros consisten en un pequeño capilar recubierto por otra manguera de mayor diámetro que permite la formación de gotas de 4,7-5,1 mm de diámetro. Con este tamaño de gota y 1,5 m de altura, en el momento del impacto con la superficie del suelo se alcanza una energía máxima teórica de 15 KJ.m².m (15 kilojoules por metro cuadrado de superficie por m de lámina de lluvia), que considerando la fricción del aire se reduce a 13 KJ.m².m (aproximadamente 48% del valor de una lluvia real).

- *Válvulas de regulación y corte*: dos válvulas conectadas a la manguera que une la placa portagoteros con la botella graduada permiten regular la intensidad de la lluvia aplicada y cerrar o abrir el paso de agua.

- *Botella graduada*: está construida en acrílico transparente y tiene impresa una escala en mm de lámina de agua y desde la cual se puede calibrar la intensidad de la lluvia. Se monta en una caja, también de acrílico, que estabiliza la presión de agua que reciben los goteros a los que abastece.

- *Cortinas transparentes*: son cuatro paños contruidos de film plástico transparente de manera de poder hacer un seguimiento visual del estado de la superficie del suelo. Tienen la función de proteger a la parcela de medición de la acción del viento. Se adhieren a la estructura metálica

mediante un tejido de velcro.

- *Recipientes recolectores*: permiten la recolección del escurrimiento generado en la parcela. Este escurrimiento debe ser medido con probeta y colocado en un recipiente mayor. De esta manera, al finalizar el ensayo se podrá tomar una alícuota a fin de hacer estudios físicos y químicos, determinando cantidad de suelo perdido (Ver apartado Índice de Erosión), nutrientes, contaminantes, etc.

- *Adaptación para pendientes*: extensión de hierro que se coloca en la parte delantera para nivelar la placa portagoteros en aquellas situaciones de elevada pendiente (>10%).

3.1. Procedimiento

Al encarar un ensayo con simulador de lluvias se recomienda fijar una intensidad de lluvia que sea superior a la tasa de infiltración del suelo. En general, para la mayoría de los suelos estudiados se encontró que 120 mm h⁻¹ resulta ser adecuado. Sin embargo, en suelos de textura gruesa podría no ser suficiente y se deberá incrementar la intensidad. Antes de iniciar la determinación es necesario hacer un muestreo de la humedad inicial del suelo. En estudios específicos pueden efectuarse ensayos de simulación de lluvias con y sin presencia de rastrojos sobre la superficie.

Se comienza clavando la base de hierro en el suelo. Se debe seleccionar un sitio homogéneo, tomando la precaución de evitar pisadas de vehículos, pisoteo de animales, corridas de agua, etc. La entrada en el suelo deber hacerse de forma pareja hasta que la bandeja de salida quede a nivel del suelo. Se cava un hoyo al frente de la bandeja, donde se coloca el recipiente recolector. Se atornillan las columnas de hierro y se monta el soporte superior y la placa portagoteros sobre este, junto a la caja de acrílico con la botella graduada. Se conecta la manguera con las válvulas de regulación y corte. Se carga con agua considerando que la placa portagoteros tiene un orificio de salida del aire que debe estar abierto y una vez lleno de agua se cierra. Se colocan las lonas laterales y se procede a calibrar la intensidad seleccionada. Para ello, se debe controlar el tiempo con la ayuda de un cronómetro, considerando que 1 mm de lámina suministrado es equivalente a 60 mm h⁻¹ de intensidad de lluvia. Para que el agua caída durante la calibración no modifique la superficie



Figura 4. Detalle de la parcela del micro-simulador de lluvias con salida de escurrimientos.

del suelo, se debe colocar la lona del frente cubriendo la superficie del suelo. Para ello, en el lado interno del bastidor hay velcros que permiten el amarre de dicha lona. El simulador de lluvias permite experimentar con una sola intensidad de lluvia por evento o puede variarse la intensidad durante un ensayo. Permite simular lluvias de entre 10 a 200 mm h⁻¹ en forma ininterrumpida.

Una vez calibrado el equipo a la intensidad deseada se inicia el experimento, registrando la cantidad de escurrimiento cada 5 minutos o a la frecuencia elegida. El escurrimiento de cada lectura se debe medir con probeta, registrando los datos en planillas. El escurrimiento es guardado en recipientes del que luego se puede retirar una alícuota para analizar. El volumen medido en unidad de litros en cada lectura es transformado a lámina multiplicando dicho dato por 4. Al igual que lo mencionado para Infiltrómetros de Anillo Simple, se deberán considerar los parámetros de periodicidad, repeticiones y tiempo de medición.

3.2. Periodicidad de la determinación

La determinación de la infiltración con simulador de lluvia debe realizarse sobre suelo no disturbado, transcurridos al menos un mes desde la últi-

ma labranza. Se proponen determinaciones de caracterización inicial a un ensayo determinado y con una frecuencia que dependerá de la alteración que ocurra en superficie con relación al tratamiento. Se sugieren dos momentos de muestreos: previo a la siembra y luego de la cosecha del cultivo.

3.3. Repeticiones

Las determinaciones con simulador de lluvias implican un disturbio del suelo y un tiempo operativo de alrededor de 2 ó más horas. Por lo tanto, a fin de contemplar el menor disturbio posible se recomienda una determinación por unidad experimental, siendo óptimo 4 determinaciones por tratamiento. En los casos que por el tipo de estudio se requiera un seguimiento de alta intensidad de muestreos se recomienda que al diseño previo del ensayo se incorpore un bloque o repetición extra o se incremente el tamaño de las unidades experimentales

3.4. Tiempo de la medición

El tiempo durante el cual se debe realizar la experiencia dependerá de la humedad inicial, textura, estructura y manejo realizado sobre el suelo. Se sugiere una duración mínima de 1 hora para suelos de texturas finas y de 2 horas para suelos de texturas gruesas (arenosos), considerando importante alcanzar la infiltración básica a través de la observación de 3 mediciones de escurrimiento similares (la tasa de entrada de agua en el suelo es constante). En algunos suelos con más de 80% de arenas, no se alcanza fácilmente la infiltración básica, lo que exige prolongar el tiempo de toma de lecturas.

3.5. Perfil de humedad

Luego de finalizada la aplicación de la lluvia, se toman muestras en estratos de profundidad a fin de registrar la distribución de la humedad en el perfil del suelo luego de la simulación de lluvia. Con ello se logra una mejor interpretación de los resultados a través de la identificación de capas de baja conductividad hidráulica.

4. PROCESAMIENTO DE DATOS. AJUSTE POR MODELO HORTON

Inicialmente la infiltración depende de la succión, que a su vez es función del contenido de humedad del suelo, mientras que el potencial de

gravedad apenas influye. Esto explica que al comenzar el proceso de infiltración el valor de infiltración es alto, decreciendo más tarde cuando aumenta el contenido de humedad hasta alcanzar un valor casi constante. Por ello en suelos secos el agua se infiltra más rápidamente que en suelos húmedos. Al comienzo el proceso de entrada de agua en el suelo sigue condiciones de régimen variable, ya que el contenido de humedad y por tanto la succión varía. A medida que el proceso continúa, el gradiente de succión en la parte alta del perfil decrece (siendo máximo en el frente de humectación), hasta llegar a ser despreciable, por lo que la gravedad es la única fuerza que permite el movimiento de agua en la parte más superficial del perfil. Cuando el gradiente llega a ser la unidad (potencial mátrico = 0) la infiltración tiende a ser constante e igualar a la conductividad hidráulica (k) vertical, que es el factor limitante del proceso. Por lo tanto, el valor de infiltración depende no solamente del contenido de humedad sino del valor de k. Una vez que el proceso de infiltración ha comenzado, se inicia la redistribución de la humedad en el perfil del suelo (Negro, 1998). El comportamiento que existe entre la velocidad de infiltración y el tiempo está representado por una función exponencial inversa. Así también, cada cambio en las características del suelo provocará instantáneamente un comportamiento singular del proceso de infiltración. De esta representación se puede derivar el valor de k saturada (k_s), cuando el valor de infiltración llega a una constante (Coello Granda, 2005). El valor de velocidad de infiltración constante cuando el suelo se humede-

ce, es llamado infiltración básica (I_b). Esta última coincide con la conductividad hidráulica a saturación del horizonte menos permeable del suelo.

Horton (1939) desarrolló la siguiente ecuación de infiltración (Ecuación 1):

$$I_{\text{tiempo}} = I_b + (I_i - I_b)e^{-kt} \quad [1]$$

Donde I_{tiempo} es la tasa de infiltración en función del tiempo; I_b es el valor de equilibrio de infiltración; I_i es el valor de infiltración al tiempo $t=0$, y k es el factor de caída de la infiltración. La ecuación es derivada del supuesto simple que la capacidad de reducción de la infiltración durante la lluvia es directamente proporcional a la tasa de infiltración y es aplicable solo cuando la intensidad de lluvia efectiva es mayor que la I_b . Para aplicaciones de campo, los parámetros del modelo son generalmente estimados por ajuste empírico (Mishra et al., 2003).

Este modelo tiene como ventajas que, a $t = 0$, la capacidad de infiltración no es infinita, sino que toma valores finitos de infiltración inicial. Además, a medida que t se hace infinito, la capacidad de infiltración se aproxima a un valor mínimo constante de I_b distinto de cero (Turner, 2006). La ecuación de Horton ajusta de forma adecuada el proceso experimental desde el momento en que el exceso de agua aparece en la superficie del suelo, presentando en general, valores de R^2 superiores a 0,80 para la mayoría de los suelos en los que se ha ajustado el modelo.

Para las pruebas de ajuste se utilizaron datos generados a través de ensayos de infiltración lle-

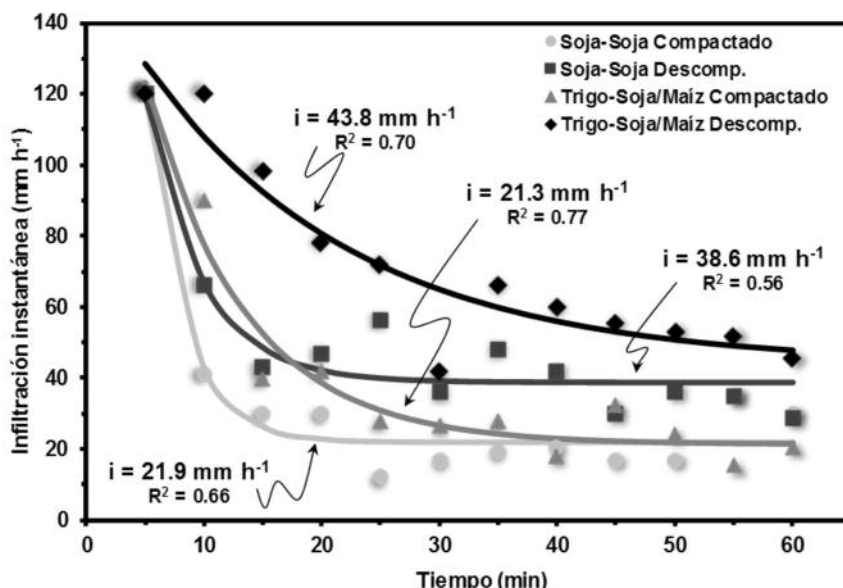


Figura 5. Curvas de ajuste de infiltración medida con micro-simulador de lluvia y ajustados por el modelo Horton para un suelo Argiudol Típico bajo cuatro situaciones de manejo. Los valores representan la tasa de infiltración final (i) y el coeficiente de correlación (R^2).

vados a cabo desde el Instituto de Suelos (INTA Castelar) en suelos de texturas contrastantes, bajo diferentes condiciones de humedad inicial y sometidos a manejo agrícola, ganadero y situaciones sin alteración por la actividad antrópica. Los ensayos de infiltración se realizaron con el método de anillo simple (Bouwer, 1986) y con simulador de lluvias desarrollado en el Instituto de Suelos (Irurtia & Mon, 1994; Irurtia et al., 2013). Las pruebas de infiltración se realizaron, generalmente, de forma simultánea con ambos métodos y con 4 a 10 repeticiones de anillos.

A modo de ejemplificar la aplicación del modelo de Horton, en la Figura 5 se presentan las curvas de ajuste de datos de tasas de infiltración tomados con simulador de lluvias y ajustados para un suelo Argiudol Típico de Oliveros, Santa Fe, bajo cuatro situaciones de manejo diferentes dadas por la combinación entre rotaciones (Soja-Soja; Trigo/Soja-Maíz) y grado de compactación del suelo (Compactado y Descompactado). Los valores representan la tasa de infiltración final (i) y el coeficiente de correlación (R^2). Metodológicamente el ajuste fue realizado en unos pocos minutos y es a modo interpretativo muy satisfactorio. En este sentido, el ejemplo no solo muestra que la infiltración final estabilizada o básica es diferente en cada situación, sino también que el tiempo en el que se alcanza dicha infiltración es diferente y primordial para el conocimiento de la generación de escurrimientos superficiales.

5. INDICE DE EROSIÓN OBTENIDO CON SIMULADOR DE LLUVIA

Además de determinar la tasa de infiltración en los ensayos con simulador de lluvia se puede obtener un índice de erosión. El índice de erosión es un indicador que representa la cantidad de material (g) que es removida de la superficie del suelo cuando se hace impactar sobre la misma un Kilojoule (KJ) de energía en forma de impacto de gotas de lluvia (Ecuación 2). Para ello es necesario recoger y pesar la cantidad total de suelo removido al finalizar la simulación de lluvia y relacionarlo con intensidad de lluvia aplicada. Como ya se mencionó, el simulador de lluvias, por construcción, altura y tamaño de gota, genera una descarga energética (E) de 13 KJ.m².m. Este valor es la constante para este simulador de lluvia.

$$IE = \frac{\text{Sed} \times 4}{\text{mm} \times 0,013} \quad [2]$$

Donde:

IE: índice de erosión;

Sed: sedimentos recogidos, corresponde a la cantidad de suelo recogido luego de finalizado el ensayo de simulación de lluvia en la superficie de 0,25 m²;

mm: lámina de lluvia aplicada durante el ensayo de simulación

valores 4 y 0,013: factores de conversión

6. INDICE DE RUGOSIDAD

La rugosidad del suelo se define como la desviación estándar de las elevaciones superficiales del suelo (Porta Casanellas et al., 2003). La importancia de su medición radica en que la erosión hídrica a la que está sometido un suelo determinado está altamente influenciada por la rugosidad superficial del mismo, a través de la emisión y recepción de partículas (Hagen, 1988) o modificando la velocidad de escorrentía, arrastre y transporte durante la erosión hídrica (Cogo et al., 1983).

Con el objetivo de adaptar una metodología de medición práctica y de bajo costo, se construyó un dispositivo anexo al simulador de lluvias que se aplica sobre la base del mismo. Este anexo permite realizar una medición precisa del porcentaje de cobertura y también realizar un relevamiento altimétrico del microrrelieve. Para su determinación, mediante una grilla nivelada de 196 puntos se toma la cota de cada uno de los micrositios separados entre sí a 35 mm. El conjunto de cotas permite representar el microrrelieve y determinar la rugosidad aleatoria a través del Índice de Rugosidad (RR), que es la desviación estándar de las cotas (Vidal Vázquez et al., 2005). Por otra parte, con el número de intercepciones de cada púa con el follaje verde o rastrojo seco, se calcula el porcentaje de cobertura (COB).

$$RR = \sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{n-1}} \quad [3]$$

Donde:

RR: índice de rugosidad

σ : desvío estándar del número total de cotas

X_i : cota observada en la i -ésima posición

m : promedio de cotas observadas

n : número total de cotas observadas

$$\text{COB} = \frac{n \text{ intercepciones}}{196} \cdot 100 \quad [4]$$

Donde:

COB: índice de cobertura

n: número total de intercepciones determinadas sobre suelo cubierto

7. CONCLUSIONES

Al abordar estudios sobre el suelo y el agua, se debe considerar la importancia de estos recursos por su valioso valor agrícola y ambiental. Teniendo en cuenta que la intervención humana sobre el ambiente ha propiciado graves consecuencias tanto ecológicas como socioeconómicas y productivas, y que el agua es una parte integral del paisaje, su uso eficiente debería ser interpretado de forma global, con implicancia a nivel de cuencas.

La caracterización del proceso de infiltración de forma correcta es de gran importancia porque permite conocer o predecir con gran exactitud la cantidad de agua que se mueve desde la superficie a través del suelo, quedando de forma disponible para el crecimiento de las plantas o percolando hacia las capas más profundas.

Las metodologías de estudio de la infiltración propuestas en este capítulo, junto con las propiedades que la regulan, permiten identificar de forma sencilla y relativamente a bajo costo, aquellos sitios con mayor y menor infiltración, como resultado de las características intrínsecas del sitio y por la actividad antrópica sobre el suelo. Tanto el equipo de infiltrómetro de Anillo Simple, como el Simulador de Lluvias pueden ser operados por cualquier persona luego de un rápido entrenamiento. Asimismo, las lecturas recogidas pueden ser interpretadas fácilmente para identificar situaciones de manejo más o menos favorables para el movimiento del agua. Gracias a las características mencionadas, son técnicas que se han adoptado rápidamente por los investigadores de la temática.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Bouwer, H. 1986. "Intake Rate: Cylinder Infiltrometer." *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods, Agronomy Monograph No. 9, 2nd Ed., Am. Soc. Agron., Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wis., 825-855.*
- Bricchi, E; F Formia & J Cisneros. 1996. Relación entre

la condición superficial y el régimen hídrico en un Haplustol típico, bajo diferentes manejos. XIII Congreso Latino Americano de Ciencia do Solo, Aguas de Lindoia, Brasil. Actas en CD-Room.

- Bryan, R & J de Ploey. 1983. Comparability of soil erosion measurements with different laboratory rainfall simulators. *Catena Supplement 4.*
- Chahinian, N; R Moussa; P Andrieux & M Voltz. 2005. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. *J. Hydrol. 306:191-214.*
- Chowdary, V; R Damodhara & C Jaiswal. 2006. Study of infiltration process under different experimental conditions. *Agricultural Water Management 83: 69-78.*
- Cisneros, J; C Cholaky; E Bricchi; O Giayetto & J Cantero. 1997. Efectos del uso agrícola sobre las propiedades físicas de un Haplustol típico del centro de Córdoba. *Rev. UNRC 17:13-22.*
- Coello Granda, C. 2005. Análisis de métodos de estimación de la conductividad hidráulica en suelos degradados. Tesis Magister de Ciencias en Manejo y Conservación del Agua y del Suelo. Universidad de Cuenca. Ecuador.
- Cogo, N; W Moldenhauer & G Foster. 1983. Effect of crop residue, tillage induced roughness and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates. *Soil Sci. Am. J. 47-5:1005-1008. 1983.*
- Eiza, M; C Irurtia; P Carfagno & F Babinec. 2008. Comparación de modelos de infiltración aplicados a eventos de simulación de lluvia en suelos de la Región Pampeana. En: Actas en CD del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 13 al 16 de Mayo de 2008. Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.
- Eiza, M; Carfagno, P & C Irurtia. 2014. Automatización de la ecuación de Horton aplicada a mediciones de infiltración con simuladores de lluvia e infiltrómetros utilizando Excel Solver. En: Actas del II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. 23 al 26 de septiembre de 2014.
- Fiener, P & K Auerswald, K. 2009. Spatial variability of rainfall on a sub-kilometre scale. *Earth Surf. Proc. Land. 34: 848-859.*
- Hagen, L. 1988. New wind erosion model development in de USA. In: 1988 Wind Erosion Conference Proceeding. Texas Tech. University, Lubbock. 11-13 April.
- Hari Prasad, K; M Mohan Kumar & M Sekhar. 2001. Modelling flow through unsaturated zones: Sensitivity to unsaturated soil properties. *Sadhana. Vol. 26 (6):517-528.*
- Haverkamp, R; J Pa; J Starr; G Schmitz & C Fuentes.

1990. Infiltration under ponded conditions: 3. A predictive equation based on physical parameters. *Soil Science*. 149:292-300.
- Horton, R. 1939. Approach toward a Physical Interpretation of Infiltration Capacity. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 23: 399-417.
 - Johnson, A. 1963. A field method for measurement of infiltration. En: *General groundwater techniques*. Geological Survey Water. Supply paper. 1544F.
 - Irurtia, C & R Mon. 1994. Microsimulador de lluvia para determinar infiltración a campo. SAGyP, INTA, CIRN. Publ. N° 176.
 - Irurtia, C; M Eiza & P Carfagno. 2013. El simulador de lluvias portátil: una herramienta aplicable para la conservación de los suelos. *Jornadas Argentinas de Conservación de Suelos 2013*. 2 al 4 de julio de 2013. Ciudad Autónoma de Buenos Aires y Castelar, Buenos Aires. Argentina.
 - Kamphorst, A. 1987. A small rainfall simulator for the determination of soil erodibility. *Netherlands Journal of Agriculture Science* 35: 407-412.
 - Lal, R & M Shukla. 2004. Water Infiltration in Soil. En: *Principles of soil physics*. The Ohio State University Columbus, Ohio, U.S.A. Marcel Dekker, Inc. Pag. 376.
 - Lowery B; W Hickey; M Arshad & R Lal. 1996. Soil water parameters and soil quality. p. 143-155. In: *JW Doran ; AJ Jones (Eds.), Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Science Society of America Special Publication 49, SSSA, Madison, WI.
 - Meyer, L & E Monke. 1965. Mechanics of soil erosion by rainfall and overland flow. *Transactions of the American Society of Agriculture Engineering* 8: 572-577, 580.
 - Michelena, R; C Irurtia; M Eiza; P Carfagno & T Pirolo. 2010. Manual de Procedimientos de análisis físico de suelos. Proyecto INTA AEGA 224012. INTA Castelar, noviembre 2010. 10 p. <http://inta.gob.ar/documentos/manual-de-procedimientos-de-analisis-fisicos-de-los-suelos/>
 - Mishra, S; J Tyagi & V Singh. 2003. Comparison of infiltration models. *Hydrol. Process*. 17: 2629-2652.
 - Negro, V. 1998. Apuntes de infiltración. Cátedra de Hidrología Agrícola. Universidad Nacional de Lomas de Zamora Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias.
 - Porta Casanellas, J; M López-Acevedo Reguerín & C Roquero de Laburu. 2003. *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Ed. Mundi Prensa. 930 pp.
 - Ravi V & J Williams. 1998. Estimation of infiltration rate in the vadose zone: Compilation of simple mathematical models. EPA/600/R-97/128a. UE Environmental Protection Agency. February 1998.
 - Richards, L. 1931. Capillary conduction through porous mediums. *Physics* 1: 313-318.
 - Slattery, M & R Bryan. 1992. Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: a laboratory experiment. *Earth Surface Proc. Landf.*, 17: 127-146.
 - Söderberg, M. 2015. Measuring soil infiltration rates in cultivated land. Master's thesis. Physical Geography and Quaternary Geology. Department of Physical Geography. Stockholm University.
 - Turner, E. 2006. Comparison of infiltration equations and their field validations with rainfall simulations. M.Sc. Thesis. University of Maryland. USA.
 - Verbist, K; S Torfs; W. Cornelis; R Oyarzún; G Soto & D Gabriels. 2010. Comparison of Single- and Double-Ring Infiltrometer Methods on Stony Soils. *Vadose Zone J.* 8: 462-475.
 - Vidal Vázquez, E; A Paz González & I de Maria. 2005. Descripción de la evolución del microrrelieve en función de la precipitación acumulativa mediante cuatro índices. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*. Revista de xeoloxía galega e do hercínico peninsular, ISSN 0213-4497, N° 30. Págs.181-192.
 - Walsh, E & K McDonnell. 2012. The influence of measurement methodology on soil infiltration rate. *International Journal of Soil Science* 7: 168-176.
 - Xu, X; C Lewis; W Liu; J Albertson & G Kiely. 2012. Analysis of single-ring infiltrometer data for soil hydraulic properties estimation: Comparison of BEST and Wu methods. *Agricultural Water Management* 107: 34- 41.
-