

Texto de apoyo para capacitación en riego



Medición de la infiltración del agua en el suelo

Método de la doble anilla

Oscar Delgadillo, Luís Pérez



Texto de apoyo para capacitación en riego

Medición de la infiltración del agua en el suelo

Método de la doble anilla

Oscar Delgadillo, Luís Pérez

Cochabamba, Bolivia

2016



Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA)
Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y Forestales
Universidad Mayor de San Simón
Av. Petrolera Km. 5
Teléfono: +591 4 4762382
Fax: +591 4 4762380
www.centro-agua.org
Cochabamba, Bolivia

Diseño y diagramación:
Oscar Delgadillo Iriarte

Formato digital

Este texto de apoyo para capacitación en riego fue elaborado en el marco del Programa de Posgrado del Centro AGUA y culminado con el Proyecto Cuenca Pedagógica Pucara (PCPP).

Cochabamba, agosto 2016

Medición de la infiltración del agua en el suelo

Método de la doble anilla

Oscar Delgadillo, Luís Pérez

Introducción

La infiltración, comúnmente definida como la entrada de agua dentro del perfil del suelo en forma vertical, es un proceso de gran importancia práctica para el diseño y la evaluación del riego en la parcela, pues la capacidad de infiltración del suelo es la que determina la tasa con la que el agua puede ser aplicada a su superficie sin escurrimiento (para el caso de riego por aspersión) y, en el caso del riego por superficie, ayudará a encontrar la longitud más eficiente del surco, de la melga o de la cajeta, pues dependen de esta capacidad de infiltración.

La falta de una adecuada consideración del proceso de infiltración puede resultar en una distribución de agua poco uniforme en la parcela, así como en una excesiva pérdida del agua debido a la percolación profunda o la escorrentía.

Muchos de los factores relacionados al suelo que controlan la infiltración también gobiernan el movimiento y la distribución del agua en el suelo, durante y después del proceso de infiltración. Por tanto, es muy importante entender la infiltración y los factores que lo afectan para un diseño y operación eficientes en los sistemas de riego (Skaggs, 1983).

La infiltración puede involucrar un movimiento unidimensional vertical del agua en el suelo, tal como ocurre durante el riego por superficie o por aspersión; en dos dimensiones, tal como sucede en el riego por surcos; o en tres dimensiones, como es el caso del riego por goteo.

Entre los principales métodos utilizados para determinar la infiltración en el suelo se encuentran (Chamorro et al., s.f.): el infiltrómetro de doble anilla (Forsythe, 1975), infiltrómetros de discos de tensión y los simuladores de lluvia (Porta, et al., 1994). Los modelos y las ecuaciones más utilizadas para el cálculo de la infiltración han seguido diferentes enfoques según se basen en la ecuación de Darcy, ecuación de Green-Ampt (1) o ecuaciones de difusión, modelo de Philip (2), también llamados modelos mecanicistas. Existen modelos empíricos, basados en una descripción analítica del proceso a partir de datos

empíricos de campo, entre los cuales se pueden mencionar la ecuación de Horton (3) y la de Kostiakov (4).

Este documento se concentrará en la determinación de la infiltración en el suelo que involucra solamente el movimiento unidimensional gravitacional, es decir aquel que es producido por el efecto de la gravedad. Como ya fue mencionado, la determinación de este movimiento en un suelo es de gran importancia para el riego por superficie y por aspersión, los cuales son los métodos de riego más empleados. El método de campo explicado será el de la doble anilla, por ser el método más popular en nuestro medio. El modelo empírico utilizado es el de Kostiakov ya que, “si bien no tiene un fundamento físico ni es dimensionalmente homogénea, se ajusta bien al fenómeno de infiltración dentro de los límites para interés agrícola” (Fernández, et al., 1971).

Conceptos básicos

Velocidad de infiltración y velocidad de infiltración instantánea

La velocidad de infiltración puede definirse como la capacidad de admisión de agua de un terreno desde la superficie al interior del mismo. En otros términos, es la relación entre la lámina de agua infiltrada y el tiempo que tarda en infiltrarse esa lámina. Comúnmente suele expresarse en cm/h ó mm/min.

La velocidad de infiltración no es uniforme, tiende a disminuir mientras transcurre el tiempo desde que comienza la aplicación de agua en el suelo cuando ésta es continua. Si se grafican las velocidades registradas en función del tiempo transcurrido, se obtendrá una curva que puede ser adecuadamente descrita mediante el modelo potencial de la ecuación 1.

Si, a su vez, se grafica este modelo potencial, se obtendrá la curva representativa de la velocidad de infiltración. La velocidad de infiltración instantánea es el valor puntual obtenido en un tiempo determinado, cuando se introduce este último en la curva representativa.

$$I = at^b \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

I = Velocidad de infiltración, expresada en mm/hora, cm/hora, etc.

t = Tiempo de oportunidad (tiempo de contacto del agua con el suelo) expresado en minutos u horas

a = Coeficiente que representa la velocidad de infiltración para el intervalo inicial de tiempo

b = Exponente adimensional que varía de acuerdo a las características del suelo entre 0 y -1

Este modelo fue propuesto por Kostiakov en 1932. Es evidente que existen otros modelos desarrollados para representar la infiltración en el suelo, sin embargo, la ecuación de infiltración empírica propuesta por Kostiakov ha resultado muy útil y práctica para aplicación con fines de riego. Los límites para los cuales se considera que esta ecuación reporta valores confiables oscilan entre 25 y 125 mm de infiltración acumulada, que es un rango que coincide razonablemente con los valores manejados en riego, sobre todo por superficie.

Infiltración acumulada

O también llamada lámina infiltrada acumulada. Considera la sumatoria de los valores puntuales de infiltración obtenidos de la curva de velocidad de infiltración instantánea. La ecuación de la infiltración acumulada (ecuación 2) se obtiene determinando el área formada entre dicha curva y los ejes, es decir integrando su ecuación entre los valores límites: $t_{inicial}=0$ y el t_{final} .

Partiendo de la ecuación 1:

$$I = at^b$$

Definiendo el área y la integral:

$$A = \sum_{t_0}^t dt * I = \int_{t_0}^t I * dt$$

Reemplazando en la integral:

$$A = I_{cum} = \int_{t_0}^t at^{b*}dt$$

Integrando:

$$I_{cum} = \left(\frac{a}{b+1} \right) \cdot t^{b+1}$$

Simplificando se obtiene:

$$I_{cum} = At^B \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

$$B = b + 1; \quad 0 < B < 1$$

$$A = a / B$$

Para una mejor comprensión de su relación, a continuación se grafican las curvas de velocidad de infiltración instantánea y de infiltración acumulada (Figura 1):

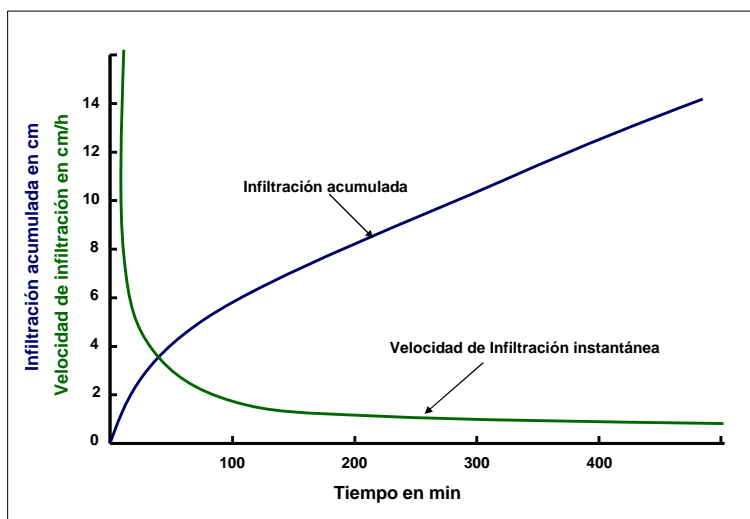


Figura 1. Curvas características de la velocidad de infiltración e infiltración acumulada de un suelo

Velocidad de infiltración básica

Inicialmente, al aplicar agua, el valor de infiltración es alto y, a medida que se incrementa el contenido de agua en el suelo, disminuye paulatinamente hasta llegar a un valor constante denominado velocidad de infiltración básica. Ésta es definida por el SCS del Departamento de Agricultura de los EUA, “como la velocidad de la infiltración del agua en el suelo, en el momento en que la variación de ésta con respecto al tiempo, es muy lenta y constante”. Generalmente, esta condición de la infiltración se consigue cuando el suelo ha alcanzado su capacidad de campo. Gráficamente, se puede observar la velocidad de infiltración básica cuando la curva de la velocidad de infiltración se vuelve asintótica con respecto a la horizontal. La velocidad de infiltración básica, depende fuertemente de la textura del suelo, así el tiempo para alcanzar esta velocidad y su valor dependerá de la textura (Figura 2).

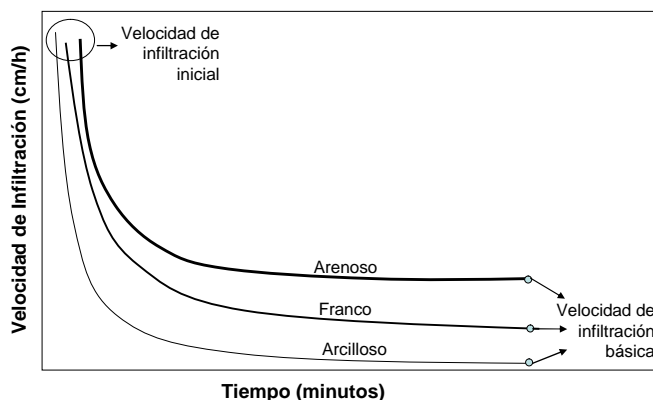


Figura 2. Variación de la curva de velocidad de infiltración por la textura del suelo

Esta velocidad tiene aplicación directa en el diseño y cálculos del riego por aspersión y el riego superficial. Para estos propósitos de riego es necesario determinar el valor de la velocidad de infiltración básica utilizando un criterio uniforme. En ese sentido, el SCS del Departamento de Agricultura de EUA establece que: “La velocidad de infiltración básica es el valor instantáneo que corresponde al tiempo en que la pendiente de la curva de la velocidad de infiltración en función del tiempo es igual a -10% de su valor”. O, dicho de otra forma, la infiltración básica es la velocidad de infiltración registrada cuando, en un periodo de una hora, se produce un cambio igual o menor al 10% en la velocidad de infiltración.

Entonces, el tiempo al cual se logra la velocidad de infiltración básica, se encuentra igualando la primera derivada de la ecuación (1) con la misma ecuación multiplicada por -0.1:

$$\frac{dI}{dt} = -0.1I$$

Reemplazando:

$$\frac{d(at^b)}{dt} = -0.1(at^b)$$

Simplificando se tiene que:

$$t_b = -10b \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

t_b es el tiempo en horas para alcanzar la infiltración básica

Luego, reemplazando el tiempo en alcanzar la infiltración básica (ecuación 3) en la ecuación general de la infiltración (ecuación 1), se obtiene la ecuación general de la velocidad de infiltración básica:

$$I_b = a(-10b)^b \quad \text{Ecuación (4)}$$

No hay que olvidar que b es el exponente que corresponde a la ecuación de velocidad de infiltración del suelo, sin embargo comúnmente se determina la función de la Infiltración acumulada, por tanto es necesario deducir los valores de b y a de la ecuación de Infiltración acumulada (A y B) de la siguiente manera:

De la ecuación de infiltración acumulada:

$$I_{cum} = \left(\frac{a}{b+1} \right) \cdot t^{b+1}$$

Tenemos que:

$$B = b + a; \quad 0 < B < 1$$

$$A = \frac{a}{B}$$

Entonces:

$$b = B - 1; \quad -1 < b < 0$$

$$a = A * B$$

Para tener una referencia, en la Tabla 1 se muestran rangos de infiltración básica para los diferentes tipos de suelo.

Tabla 1. Rangos de velocidad de infiltración básica de los diferentes tipos de suelo (Brouwer et al., 1988)

Tipo de suelo	mm/h
Arenoso	Más de 30
Franco arenoso	20-30
Franco	10 a 20
Franco arcilloso	5 a 10
Arcillo	1-5

Factores que afectan las tasas de infiltración

- Son varios los factores que afectan la velocidad de infiltración del agua en el suelo (Gurovich, 1985):
- **Sellamiento superficial:** La formación de una capa fina y compacta sobre la superficie del suelo reduce rápidamente la penetración de agua a través de la superficie. Esta capa resulta de un rompimiento de la estructura del suelo, producido en parte por la acción corrosiva de las lluvias o del riego por aspersión, y también por la acción del flujo del agua sobre la superficie, donde las partículas finas son fijadas alrededor de las partículas mayores formándose una capa impermeable.
- **Compactación del suelo:** Las labores de preparación de suelos – especialmente las araduras que se realizan en suelos húmedos- pueden producir compactación y formación de capas impermeables denominadas ‘pie de arado’ exactamente debajo de la profundidad a que penetra el implemento. Este ‘pie de arado’ impide el movimiento de agua y reduce la velocidad de infiltración.
- **Partículas o grietas del suelo:** Los suelos de texturas finas tienden a partirse cuando se secan; al aplicarse agua las partículas del suelo comienzan a aumentar de tamaño, sellando las partículas hasta disminuir considerablemente la velocidad de infiltración.

- **Preparación del suelo:** Se indicó que la velocidad de infiltración puede ser aumentada a través de araduras, rastrajes u otros procedimientos; sin embargo el efecto beneficioso en la porosidad del suelo producido por el paso de estos implementos dura solamente hasta que el terreno vuelve a su condición anterior de densidad, como consecuencia de riegos o lluvias subsecuentes. Es necesario considerar también la compactación producida por el excesivo paso de implementos, con la consiguiente disminución de la velocidad de infiltración.
- **Materia orgánica y rotación de cultivos:** La materia orgánica mantiene la porosidad del suelo durante periodos largos; éstos dependen del estado de descomposición en que aquella se encuentra. De este modo la velocidad de infiltración no se altera e incluso puede aumentar mediante la siembra de pastos y legumbres o utilizando prácticas que aumentan el contenido de materia orgánica en el suelo.
- **Sales del suelo y del agua:** Las sales que contiene el agua de riego se van acumulando en el perfil del suelo; esto se hace más notorio cuando las precipitaciones no son suficientes para lixiviar las sales más debajo de la zona de raíces.
- **Sedimentos en el agua de riego:** Las partículas de limo y arcilla que se mantienen en suspensión afectan la calidad del agua de riego y producen un encortamiento en el suelo, que disminuye en forma notoria la infiltración del agua en el suelo. Esto puede ser beneficioso en suelos arenosos pero es muy perjudicial en los de texturas finas.
- **Perfil del suelo:** La diferente disposición de los estratos en el perfil tiene también gran influencia en la velocidad de infiltración del suelo; evidentemente este factor no es manejable por el hombre, pero debe ser considerado como un elemento de análisis.

Otros autores como Gavande et al (1972), también señalan varios factores como el espesor de agua empleado para el riego o lluvia, la temperatura del agua y el suelo, la estructura y la compactación, textura, estratificación, contenido de humedad, agregación y actividades microbianas, que afectan la velocidad de infiltración del agua en el suelo.

Debido a que la infiltración puede cambiar mucho durante la temporada, los datos de infiltración deben usarse con precaución, así también con juicio atinado para interpretarlos. El uso de estos datos requiere conocimiento de los cultivos y de los patrones de cultivo, métodos y manejos de riego, labranza, tipo y estructura de suelo y época de la temporada de riego (Gandarillas, 1993).

Explicación del método

Las anillas de infiltración sirven para hacer pruebas que determinan la permeabilidad en suelo, simulando el proceso de infiltración del agua en el suelo. Las pruebas se realizan enterrando dos anillas de forma concéntrica, esto quiere decir que una es de diámetro mayor

que la otra. Las de mayor tamaño generalmente son de 60 cm de diámetro y las menores de 30 cm de diámetro. Se llenan ambas con agua y se mide la tasa de descenso de esta agua en la anilla interior. Se realiza así para que el flujo del agua en el suelo sea lo más vertical posible, dado que la infiltración en la anilla externa limita el flujo lateral del agua infiltrada por la anilla interna, disminuyendo la distorsión de los datos obtenidos.

Obtención de datos en campo

La prueba se realiza directamente “in situ” buscando un sitio (o sitios) representativo (s) dentro de la parcela agrícola que se quiere caracterizar.

Materiales y equipos requeridos

Los materiales y equipos requeridos para la determinación de la infiltración son:

- 2-3 juegos de anillas infiltrómetros (interno y externo)
- 1 Combo
- 1 Nivel de albañil
- 1 Flexómetro
- 1 Flotador o una regla de 30 cm
- Plástico (1-2 m²)
- Planilla de campo (Anexo 1)
- Cronómetro

Anotaciones previas

Es muy importante anotar previamente algunas características del sitio de la prueba, tales como: la ubicación precisa de la parcela en la zona (croquis), características de la superficie del suelo (condición de arado, vegetación existente, grietas, humedad), si se realizaron prácticas culturales recientemente, etc.

Previsiones para la prueba

Son algunos aspectos a considerar para iniciar las pruebas de infiltración, para garantizar la fiabilidad de los resultados y el adecuado manejo de los equipos.

Lugar representativo

Una vez definida la parcela donde se realizará la prueba se tendrá el cuidado de ubicar sitios representativos de la misma. Se sugiere realizar por lo menos dos pruebas de infiltración en forma simultánea, siendo deseables tres, localizadas en la cabecera, medio y pie de la parcela. El número de pruebas simultáneas se definirá también en función a algunas limitaciones que se podrían encontrar, por ejemplo, distancia al lugar de provisión de agua, personal

disponible, el nivel de precisión requerido o la representatividad de la prueba, el tiempo disponible para realizarlo así como el costo involucrado.

Provisión de agua

Es un aspecto muy importante para la realización de la prueba, por tanto se deberá llevar la cantidad suficiente y así garantizar la finalización de la prueba con éxito, o se deberá identificar previamente una fuente cercana de aprovisionamiento de agua (Foto 1).



Foto 1. Acarreo de agua

Otros cuidados

Se debe realizar una limpieza adecuada del sitio de la prueba sin dañar las condiciones iniciales del suelo, es decir, solamente retirar material vegetal grueso o basuras, cuidando de no dañar excesivamente la superficie del suelo (Foto 2).



Foto 2. Limpieza del lugar de la prueba

Un aspecto que hay que cuidar bastante es la integridad de las anillas al momento de hincar en el suelo, para ello si es posible trasladar la plancha metálica utilizada para este propósito o de lo contrario utilizar un trozo de madera para golpear el borde superior de las anillas sin dañarlo (Foto 3).



Foto 3. Hincado de las anillas

Instalación de las anillas

Las anillas se hincan en forma concéntrica (Figura 3 y Foto 4), de ahí que se conoce también como el método de las anillas concéntricas, asegurándose que se introduzcan por lo menos 10 cm de profundidad. Esto determinará el éxito de la prueba, pues sino se realiza un adecuado hincado el agua podría filtrar, lo cual significaría repetir la instalación e iniciar nuevamente la prueba.

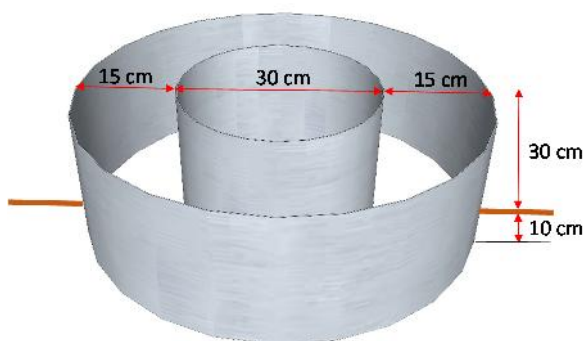


Figura 3. Instalación de las anillas en el campo



Foto 4. Anillas instaladas

Asimismo, se deberá controlar el nivel de las anillas (horizontalidad de los bordes superiores), sobre todo de la anilla interna (Foto 5), que es donde se realizarán las lecturas, y especialmente si se va a utilizar un flotador con un soporte, para cuya lectura se requiere nivel cero. En caso de utilizar una regla graduada pegada en la pared del cilindro, el nivel horizontal cero es deseable aunque no es imprescindible.



Foto 5. Nivelación de la anilla interior

Instalación del dispositivo de aforo

Una vez colocadas las anillas se debe considerar la instalación del dispositivo de aforo escogido, según la elección realizada previamente. Esta elección está motivada fundamentalmente por la disponibilidad de equipos. Existen dos opciones básicas: el uso de un flotador o el de una regla graduada.

La más recomendable es utilizar un flotador para realizar las lecturas del descenso de agua porque permite una mejor posición al registrador para visualizar la varilla; vale aclarar que se trata de lecturas indirectas. Nótese que, si este es el método escogido, se debe instalar el flotador y su soporte inmediatamente después de quitar el plástico que contiene el agua para la anilla interior. Este aspecto será desarrollado más adelante.

En cambio, si se opta por aforar mediante una regla graduada adherida a la anilla interior (Figura 4), su instalación debe ser posterior a la de las anillas y anterior a la utilización del plástico para la anilla interior. En este caso, la lectura será directa por registrarse el nivel del agua directamente sobre la regla graduada.

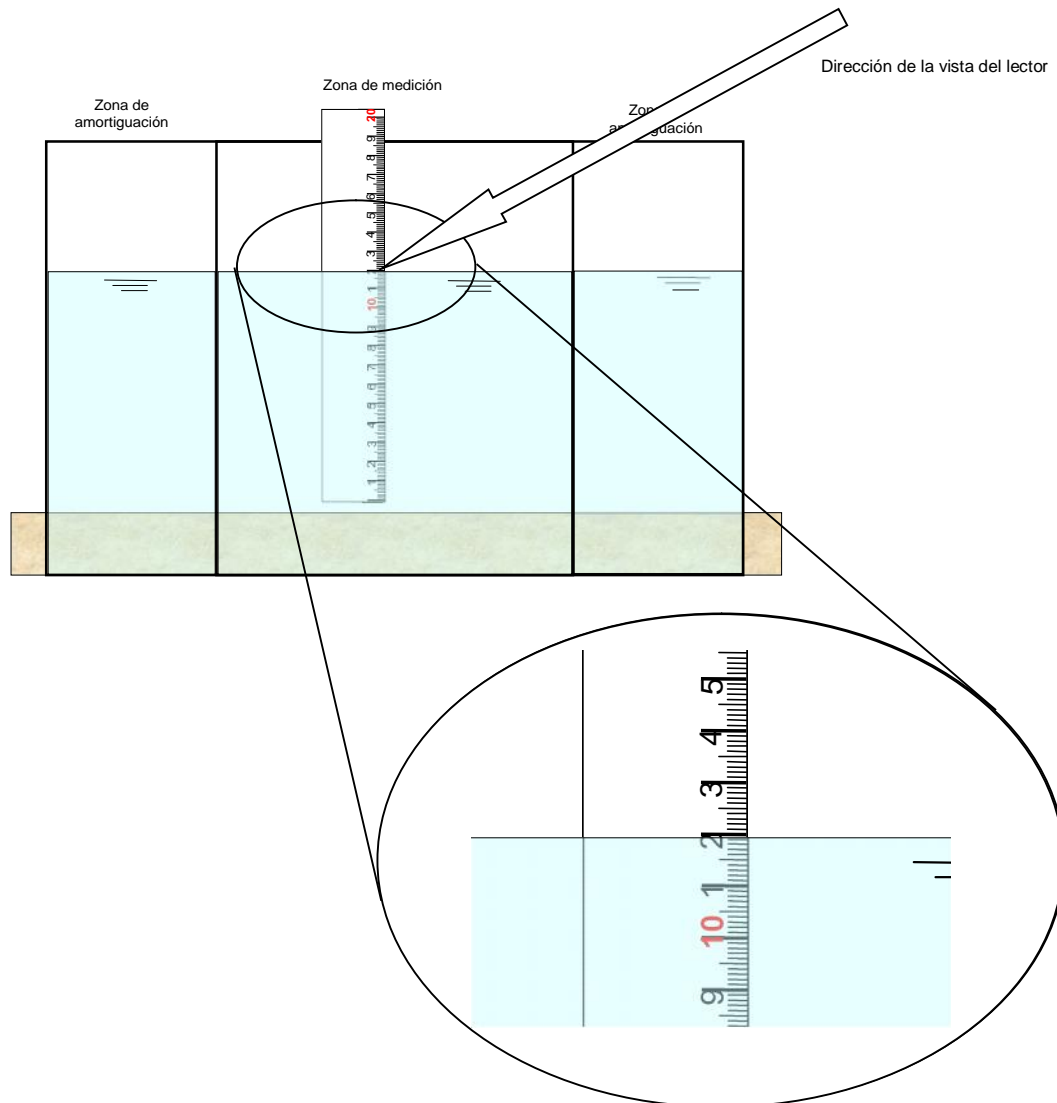


Figura 4. Lectura directa

En el ejemplo anterior, la lectura sería 11,9 cm, lectura realizada a nivel del agua. Sin embargo, por la posición incómoda de la persona que hace las lecturas, hay mayor probabilidad de cometer errores en las mismas. Utilizando el flotador la dirección de la vista del lector es prácticamente horizontal por tanto la probabilidad de cometer error en las lecturas disminuye (Figura 5).

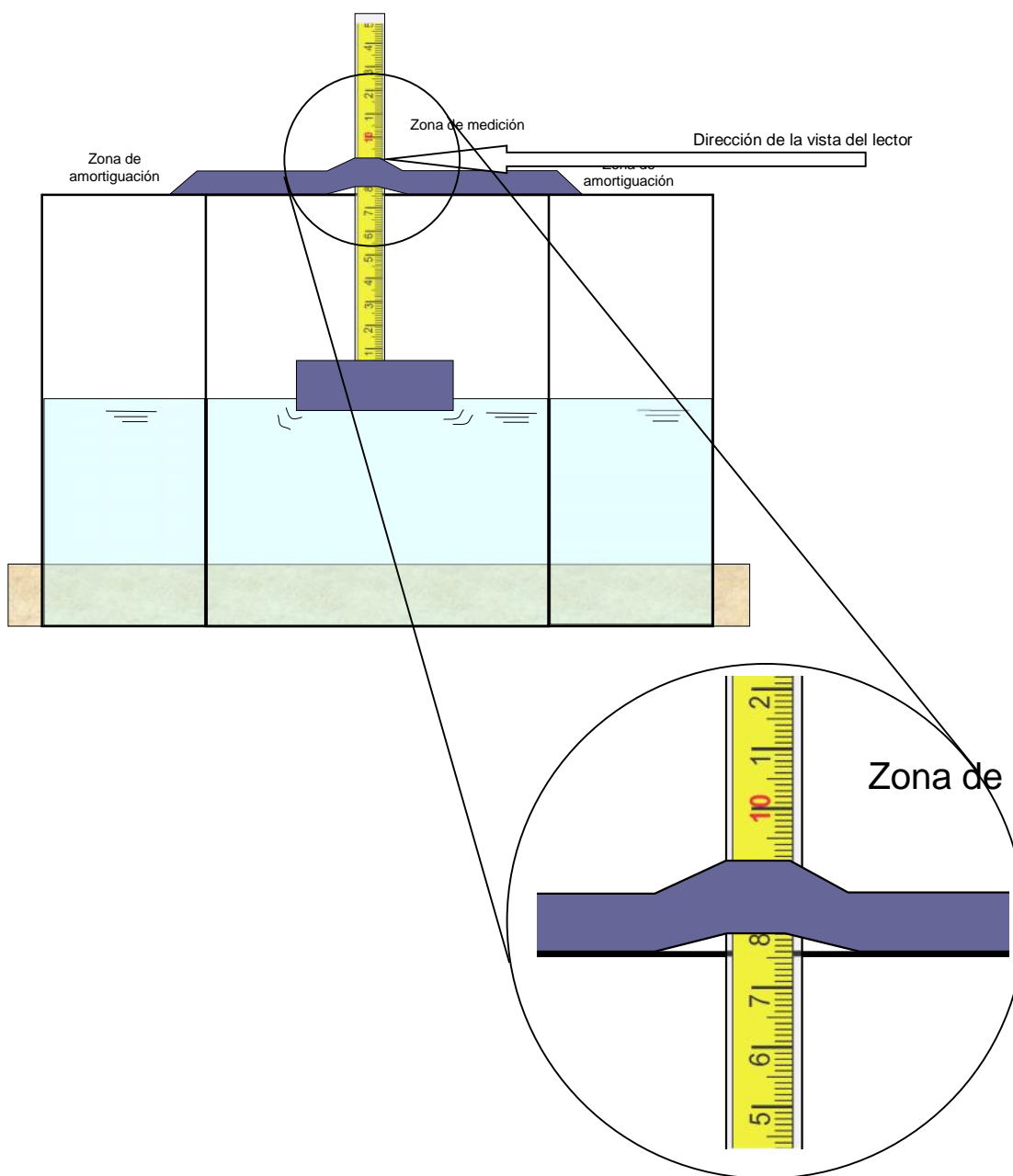


Figura 5. Lectura indirecta

En el ejemplo anterior, la lectura sería 9,15 cm con la ventaja de que la posición del lector es más cómoda y prácticamente horizontal.

Vertido de agua

Una vez instaladas las dos anillas en forma concéntrica, alistado el cronómetro o reloj y ubicada la regla graduada (si es el caso), se procede a verter el agua en ambos compartimentos creados por la disposición de las anillas (Foto 6). Como se ha visto en algunas figuras

anteriores, al compartimento formado entre ambas anillas se le llamará “zona de amortiguación” y el espacio del centro simplemente será mencionado como “la anilla interna o zona de medición”. En primer lugar se coloca el plástico en la anilla interna, cuidando que no permita filtraciones de agua, y se vierten al menos 20 cm de altura de agua en su interior.



Foto 6. Vertido del agua

Inmediatamente se vierte agua en la zona de amortiguación, procurando que la altura de agua sea la misma que en la anilla interna. Se debe evitar aplicar el agua directamente al suelo porque existe el riesgo de que el chorro socave su superficie, influyendo así la toma de datos. Para ello se puede echar el agua sobre una parte del plástico o las manos. En último caso, se aplicará directamente al suelo pero repartiendo el chorro en varios lugares de la zona de amortiguación y con suavidad.

Luego se procede a quitar el plástico. Se esperan algunos segundos para que se estabilice el agua y se inician las lecturas (Nivel inicial), ya sea colocando el flotador con su soporte o leyendo directamente en la regla pegada en la parte interna de la anilla (Foto 7).



Foto 7. Inicio de la prueba

Las lecturas iniciales se deberán realizar con mayor frecuencia (las primeras cinco lecturas cada minuto), debido a que normalmente al inicio la infiltración del agua es más rápida, para disminuir paulatinamente. Asimismo, el inicio es el momento crítico ya que es cuando se podrían presentar filtraciones por una mala instalación de las anillas. O sea que se debe vigilar esta posible situación. Si fuese así, hay que suspender la prueba, instalar las anillas en otro sitio e iniciar nuevamente.

Lecturas

La lectura es muy simple (Foto 8), pues solamente se anota la altura de agua mientras desciende, sea con el flotador o mediante la regla pegada a la pared de la anilla interna, a ciertos intervalos de tiempo definidos previamente (Planilla 1 en Anexo 1). Por lo general, se registran los datos durante aproximadamente cinco horas.



Foto 8. Anotaciones de las lecturas

Recarga de agua

Como el periodo de toma de datos es largo (5 horas), existe la posibilidad de que el agua aplicada infiltre en su totalidad antes de completarlo. Por eso, se debe vigilar constantemente la altura de la lámina de agua. Ésta nunca debe disminuir a menos de 3 cm. Cuando falte poco para que esto ocurra (cuando la lámina sea de 5 cm de altura), se debe recuperar el nivel de agua donde sea necesario: en la anilla interna, en la zona de amortiguación o en ambas.

Para la anilla interna se procede de la siguiente manera. Se realiza una última lectura del nivel de agua, anotando el tiempo correspondiente. Luego se vierte el agua, con los mismos cuidados expuestos al describir el llenado de la zona de amortiguación. Así se llega a un nuevo nivel e inmediatamente se procede a realizar la nueva lectura en la cual se considera el nuevo nivel de referencia (nuevo nivel inicial) y se anota en la segunda columna (Nivel de recuperación de agua). A partir de éste, se vuelven a registrar las lecturas en forma regular, anotándose nuevamente en la primera columna (Nivel de agua) y respetando los intervalos programados; esto quiere decir que no es necesario comenzar nuevamente las lecturas con periodos cortos de tiempo (Tabla 2).

Tabla 2. Lecturas de campo de la prueba de infiltración

Tiempo		Lectura de escala	
Intervalo de tiempo entre lecturas (min)	Tiempo acumulado (min)	Nivel de agua (cm)	Nivel de recuperación del agua (cm)
0		23,3	
1		22,5	
1		21,9	
1		21,4	
1		21	
1		20,6	
5		18,7	
5		17,4	
10		15,6	22,7
10		20,7	
15		18,5	
15		16,8	
30		14,2	23,2
30		20,3	
60		15,4	24
80		17,5	23
60		18,5	

El procedimiento se realiza las veces que sea necesario, como se ve en la tabla presentada a continuación a manera de ejemplo. Esto variará de acuerdo al tipo de suelo, es decir que en suelos de textura pesada las recargas de agua serán necesarias ocasionalmente, en cambio en suelos de textura liviana serán frecuentes.

Procesamiento de datos (Trabajo de Gabinete)

Este trabajo puede ser resumido en los siguientes pasos secuenciales:

- Paso 1. Calcular el tiempo acumulado, la lámina infiltrada según cada intervalo de tiempo y la lámina acumulada
- Paso 2. Calcular los coeficientes necesarios para determinar la ecuación de la infiltración acumulada, ya sea por el método de los mínimos cuadrados o mediante la hoja de cálculo de Microsoft Excel.
- Paso 3. Definir la ecuación de la velocidad de infiltración instantánea.
- Paso 4. Calcular el tiempo en alcanzar la velocidad de infiltración básica y la velocidad de infiltración básica

El objetivo de la prueba de infiltración, considerando fines de riego, es determinar la velocidad de infiltración básica en la parcela. Esto se debe a que es un dato necesario para calcular y realizar un adecuado diseño para sistemas de riego superficial y riego por aspersión.

Paso 1

Son cálculos bastante sencillos, cuyo objetivo es obtener datos más elaborados para ser utilizados en operaciones más complejas. El cálculo del tiempo acumulado se realiza sumando el intervalo de tiempo de la lectura al valor del tiempo acumulado correspondiente a la anterior lectura. Cuando se trata de la primera lectura, el tiempo acumulado de la anterior lectura es cero.

A continuación se calcula la lámina infiltrada para cada intervalo de tiempo. Para ello se debe calcular la diferencia entre cada valor de nivel de agua y el nivel de agua anterior, anotando el resultado en valor absoluto (sin signo negativo). Cuando exista el dato de nivel de recuperación del agua, éste será considerado el nivel de agua anterior. Para una mejor comprensión considérense los valores mostrados en la siguiente tabla. Allí se observa que la lámina infiltrada para los 35 minutos de tiempo acumulado, se ha calculado restando el nivel de agua correspondiente (20,7) del nivel de recuperación del agua (22,7), y no así del nivel anterior (15,6). A continuación se restan los valores del nivel anterior hasta que nuevamente existieron datos de nivel de recuperación del agua.

Para el cálculo de la lámina acumulada, se debe sumar cada valor de lámina infiltrada al valor anterior de lámina acumulada, de forma análoga al cálculo de tiempo acumulado. Una vez más, cuando se trata del primer dato, la lámina acumulada de la anterior lectura es cero.

Para una mejor comprensión de estos tres primeros cálculos, considérese la Tabla 3. En ella se muestran y procesan datos reales de una prueba de infiltración realizada en la población de Tiraque.

Tabla 3. Procesamiento de los datos de campo de la prueba de infiltración

Tiempo		Lectura de escala		Lámina		Infiltración
Intervalo de tiempo entre lecturas (min)	Tiempo acumulado (min)	Nivel de agua (cm)	Nivel de recuperación del agua (cm)	Lámina infiltrada para cada intervalo de tiempo (cm)	Lámina acumulada (cm)	Velocidad de infiltración instantánea (cm/h)
0		23,3		0	0	
1	1	22,5		0,8	0,8	48
1	2	21,9		0,6	1,4	36
1	3	21,4		0,5	1,9	30
1	4	21		0,4	2,3	24
1	5	20,6		0,4	2,7	24
5	10	18,7		1,9	4,6	22,8
5	15	17,4		1,3	5,9	15,6
10	25	15,6	22,7	1,8	7,7	10,8
10	35	20,7		2	9,7	12
15	50	18,5		2,2	11,9	8,8
15	65	16,8		1,7	13,6	6,8
30	95	14,2	23,2	2,6	16,2	5,2
30	125	20,3		2,9	19,1	5,8
60	185	15,4	24	4,9	24	4,9
80	265	17,5	23	6,5	30,5	4,88
60	325	18,5		4,5	35	4,5

Paso 2

Consiste en calcular los coeficientes necesarios para obtener la ecuación de la infiltración acumulada. Existen dos opciones: realizando cálculos siguiendo el método de los mínimos cuadrados o mediante el programa Excel de Microsoft Office.

Método de los mínimos cuadrados

El método de los mínimos cuadrados permite obtener los coeficientes necesarios para definir una curva representativa de la infiltración acumulada utilizando los datos obtenidos en

campo. Es decir, la curva que más se aproxima a los puntos obtenidos en la prueba cuando se grafican en un plano de coordenadas.

Como ya fue explicado, se partirá de la ecuación empírica de Kostiakov. Ésta es una función potencial, por lo tanto, lo primero es linealizarla utilizando logaritmos.

Así, partiendo de la ecuación 2:

$$I_{cum} = At^B$$

Aplicando logaritmos:

$$\log I_{cum} = \log A + B \cdot \log t$$

Nótese que la anterior igualdad es análoga a la ecuación de la recta:

$$Y = A + BX$$

Entonces, las fórmulas que se requerirán para determinar los valores de A y B, así como de r^2 (coeficiente de correlación) son los siguientes:

$$B = \frac{\sum \log t \log I - \frac{\sum \log t \sum \log I}{n}}{\sum \log^2 t - \frac{(\sum \log t)^2}{n}} \quad (5)$$

$$\log A = \frac{\sum \log I}{n} - B \frac{\sum \log t}{n} \quad (6)$$

Luego se calcula el antilogaritmo del resultado de la ecuación 6, y así se obtiene el valor de A.

$$r^2 = \frac{\left(\sum \log t \log I - \frac{\sum \log t \sum \log I}{n} \right)^2}{\left(\sum \log^2 t - \frac{(\sum \log t)^2}{n} \right) \left(\sum \log^2 I - \frac{(\sum \log I)^2}{n} \right)} \quad (7)$$

Lo primero, partiendo desde los datos obtenidos en el paso 1, será aplicar logaritmos a las columnas de tiempo acumulado y lámina acumulada en sus distintos componentes, tal como se aprecia en el Tabla 4.

Tabla 4. Aplicación de logaritmos y sumatoria de los distintos componentes

Número de datos	Tiempo acumulado (min)	Lámina acumulada (cm)	log t	log I	log ² t	log ² I
1		0				
2	1	0,8	0	-0,09691001	0	0,00939155
3	2	1,4	0,30103	0,14612804	0,09061906	0,0213534
4	3	1,9	0,47712125	0,2787536	0,22764469	0,07770357
5	4	2,3	0,60205999	0,36172784	0,36247623	0,13084703
6	5	2,7	0,69897	0,43136376	0,48855907	0,1860747
7	10	4,6	1	0,66275783	1	0,43924794
8	15	5,9	1,17609126	0,77085201	1,38319065	0,59421282
9	25	7,7	1,39794001	0,88649073	1,95423627	0,78586581
10	35	9,7	1,54406804	0,98677173	2,38414613	0,97371846
11	50	11,9	1,69897	1,07554696	2,88649908	1,15680127
12	65	13,6	1,81291336	1,13353891	3,28665484	1,28491046
13	95	16,2	1,97772361	1,20951501	3,91139066	1,46292657
14	125	19,1	2,09691001	1,28103337	4,3970316	1,64104649
15	185	24	2,26717173	1,38021124	5,14006765	1,90498307
16	265	30,5	2,42324587	1,48429984	5,87212057	2,20314601
17	325	35	2,51188336	1,54406804	6,30955802	2,38414613

El siguiente paso es simplemente aplicar las fórmulas anteriormente indicadas:

$$B = \frac{\sum \log t \log I - \frac{\sum \log t \sum \log I}{n}}{\sum \log^2 t - \frac{(\sum \log t)^2}{n}} = \frac{24.593680 - \frac{21.986098 * 13.536149}{16}}{39.694194 - \frac{(21.986098)^2}{16}}$$

$$B = 0.632$$

$$\log A = \frac{\sum \log I}{n} - B \frac{\sum \log t}{n} = \frac{13.536148}{16} - 0.632 * \frac{21.986098}{16}$$

$$\log A = -0.022441621$$

Aplicando el antilogaritmo se obtiene el valor de A

$$10^{(-0.022441621)} = 0.949 = A$$

$$r^2 = \frac{\left(\sum \log t \log I - \frac{\sum \log t \sum \log I}{n} \right)^2}{\left(\sum \log^2 t - \frac{(\sum \log t)^2}{n} \right) \left(\sum \log^2 I - \frac{(\sum \log I)^2}{n} \right)}$$

$$r^2 = \frac{\left(24.593680 - \frac{21.986098 * 13.536149}{16} \right)^2}{\left(39.694194 - \frac{(21.986098)^2}{16} \right) \left(15.256375 - \frac{(13.536149)^2}{16} \right)}$$

$$r^2 = 0.9956$$

Excel

Otra manera de obtener los valores de A , B y r^2 es mediante una planilla de Microsoft Excel. El método consiste en la inclusión de una línea de tendencia en base a la curva formada por los datos de campo. Para dicho procedimiento se utilizan sólo los datos de tiempo acumulado y lámina acumulada, tal como se aprecia en el Tabla 5.

Tabla 5. Selección de los datos necesarios para determinar la ecuación de infiltración

Tiempo		Lectura de escala		Lámina		Infiltración
Intervalo de tiempo entre lecturas (min)	Tiempo acumulado (min)	Nivel de agua (cm)	Nivel de recuperación del agua (cm)	Lámina infiltrada para cada intervalo de tiempo (cm)	Lámina acumulada (cm)	Velocidad de infiltración instantánea (cm/h)
0		23,3		0	0	
1	1	22,5		0,8	0,8	48
1	2	21,9		0,6	1,4	36
1	3	21,4		0,5	1,9	30
1	4	21		0,4	2,3	24
1	5	20,6		0,4	2,7	24
5	10	18,7		1,9	4,6	22,8
5	15	17,4		1,3	5,9	15,6
10	25	15,6	22,7	1,8	7,7	10,8
10	35	20,7		2	9,7	12
15	50	18,5		2,2	11,9	8,8
15	65	16,8		1,7	13,6	6,8
30	95	14,2	23,2	2,6	16,2	5,2
30	125	20,3		2,9	19,1	5,8
60	185	15,4	24	4,9	24	4,9
80	265	17,5	23	6,5	30,5	4,88
60	325	18,5		4,5	35	4,5

Luego de juntar estas dos columnas se procede a graficar estos datos mediante el asistente de gráfico, escogiéndose el tipo de gráfico XY (Dispersión), como se aprecia en la Figura 6.

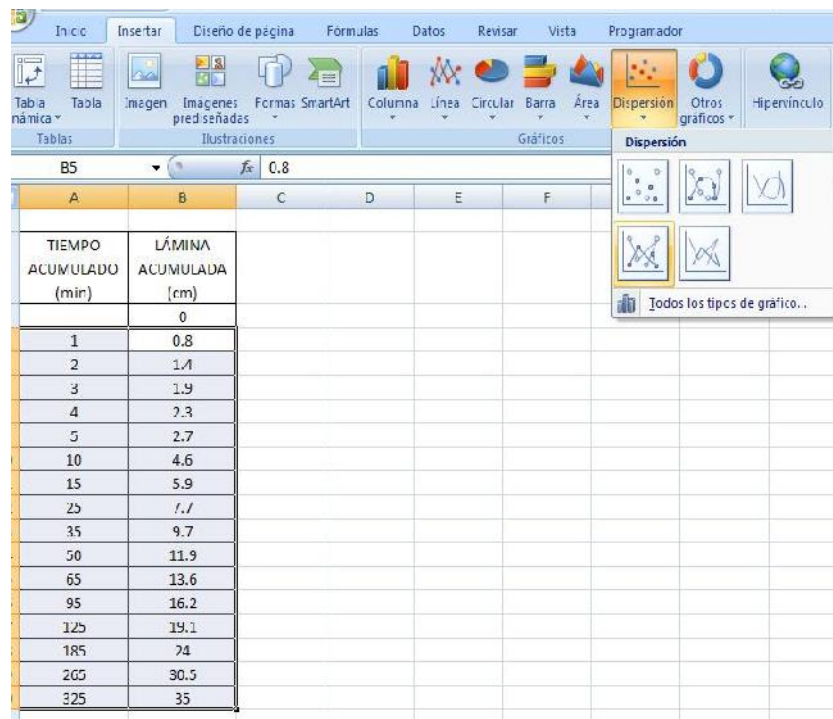


Figura 6. Selección del tipo de gráfico

Desde la Figura 7 hasta la Figura 10, se sigue el procedimiento rutinario para completar la construcción del gráfico de infiltración acumulada con la ayuda del asistente de gráficos de Excel, incluyendo la obtención de A , B y r^2 (ecuación de la línea de tendencia).

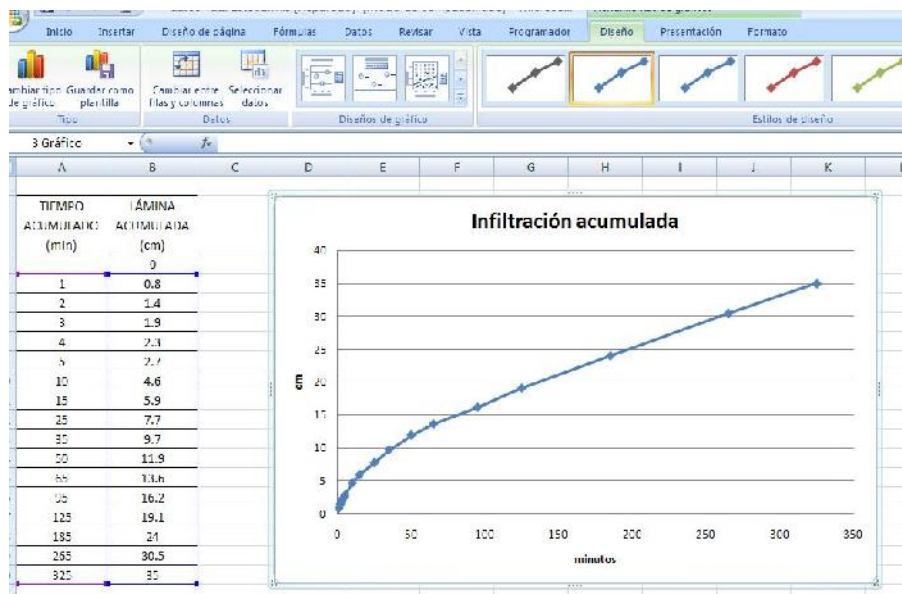


Figura 7. Obtención del gráfico de infiltración acumulada

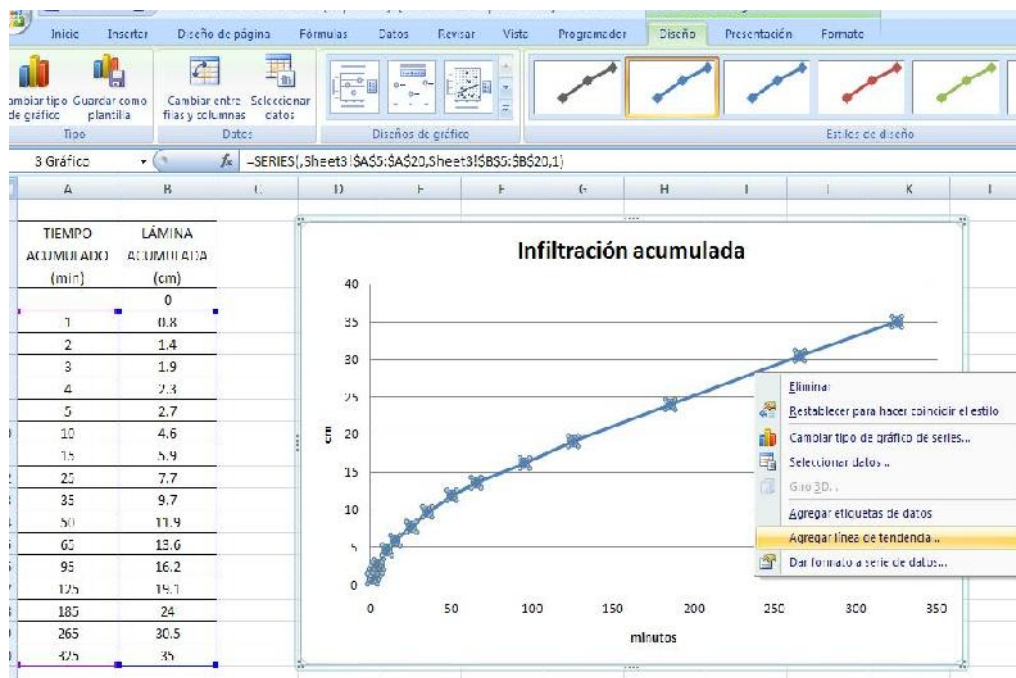


Figura 8 Primer paso para agregar línea de tendencia

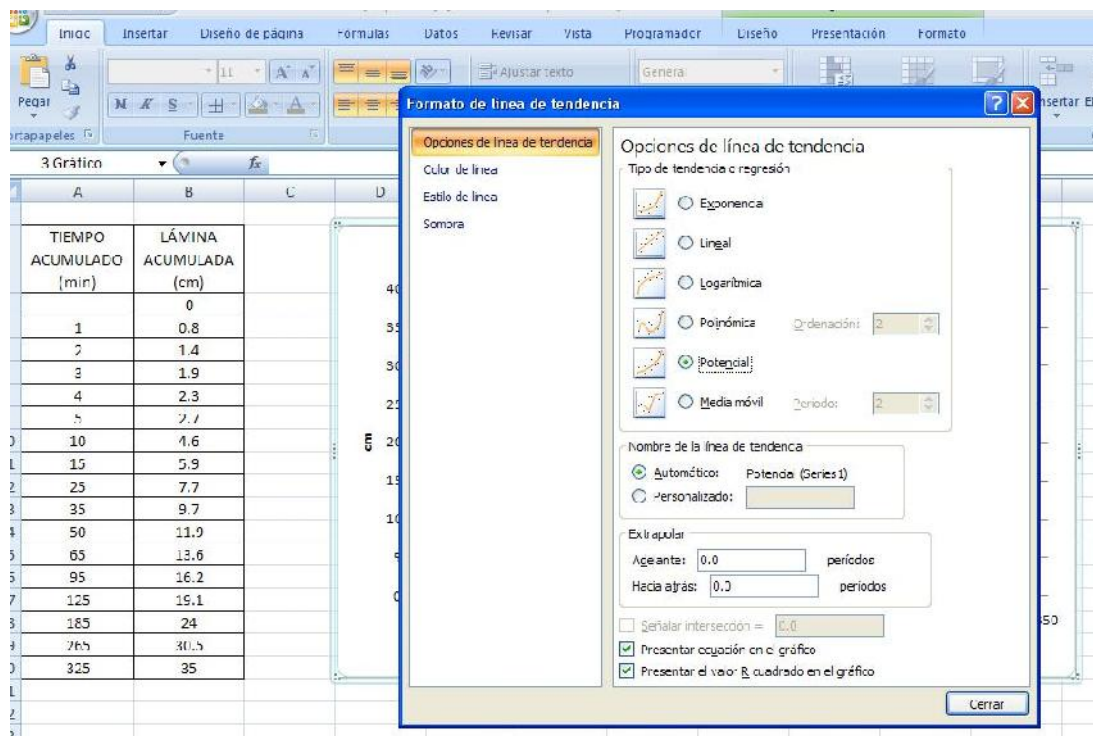


Figura 9. Opciones que se deben escoger para la línea de tendencia

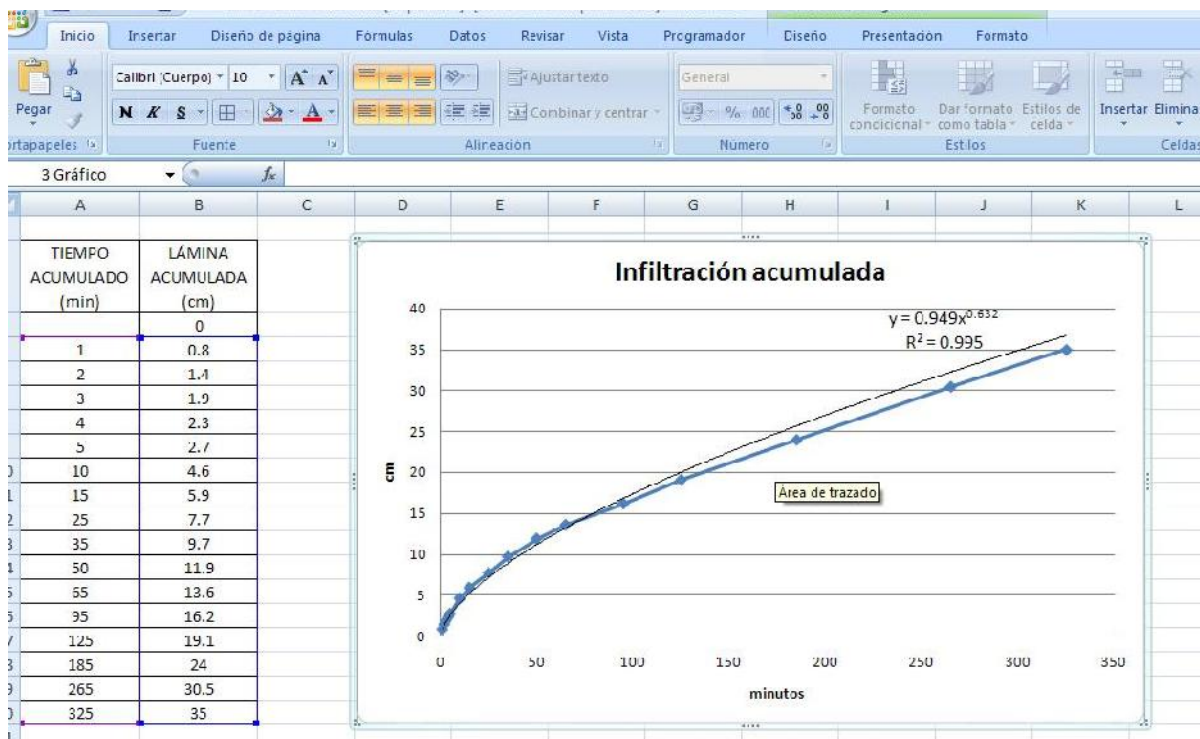


Figura 10. Gráfico de infiltración acumulada incluyendo línea de tendencia y ecuación

Nótese que los resultados obtenidos por ambos métodos son los mismos. Simplemente se debe reemplazar I_{cum} por y , además de t por x en la ecuación proporcionada por Excel, para definir la ecuación de la infiltración acumulada.

Paso 3

Consiste en definir la ecuación de la velocidad de infiltración instantánea (Vii). Es necesario porque, como se ha desarrollado previamente, se utilizan los valores que definen a la ecuación de la Vii para la determinación de la velocidad de infiltración básica. No se debe olvidar que esta última es la que será empleada en los cálculos para diseñar algunos sistemas de riego.

Para definir la ecuación de la velocidad de infiltración instantánea, se emplean las equivalencias definidas al obtener la ecuación 2. Es decir:

$$B = b + 1 \quad \text{de donde se obtiene que } b = B - 1$$

$$A = a / B \quad \text{de donde se obtiene que } a = A * B$$

Reemplazando los valores obtenidos en el ejemplo estudiado:

$$b = 0,632 - 1 = -0,368$$

$$a = 0,949 * 0,632 = 0,599768$$

Reemplazando a y b en la ecuación 1:

$$I = 0,599768 t^{-0,687}$$

Que es la ecuación de la velocidad de infiltración instantánea para el caso estudiado.

Paso 4

Consiste en dos cálculos. El primero es la determinación del tiempo que se tarda en alcanzar la velocidad de infiltración básica mediante la ecuación 3. El segundo es el reemplazo de dicho valor en la ecuación 4. El resultado final será la determinación de la velocidad de infiltración básica.

Así, reemplazando el valor determinado de b en la ecuación 3:

$$t_b = -10 * (-0,368)$$

$$t_b = 3,7 \text{ horas} = 222 \text{ min}$$

Y, finalmente, se reemplaza el valor del tiempo en minutos, en la ecuación 4:

$$I_b = 0,599768 * 222^{(-0,368)}$$

$$I_b = 0,08 \text{ cm/min} \quad \text{ó} \quad 4,94 \text{ cm/h}$$

Algunas consideraciones finales

El conocimiento de la teoría, los cálculos y la forma de determinación de la velocidad de infiltración tiene una gran importancia al momento de diseñar sistemas de riego, especialmente cuando se trata de sistemas de riego por aspersión. Por un lado, el valor de la infiltración básica interviene de forma directa en algunas fórmulas empleadas en tal diseño. Esta intervención puede obedecer al principio básico de que no se puede programar una aplicación de agua en una lámina tal que sobrepase la capacidad de infiltración de un suelo. De no ser así se formarán charcos de agua en el terreno y, muy probablemente, escurrimientos superficiales; esto tiene varias implicaciones tales como la disminución de la eficiencia en el uso del agua o el incremento en el riesgo de erosión.

En ese sentido, una consideración adicional importante es cuál de las velocidades de infiltración determinadas en una misma parcela es la que se debe emplear. Siempre que la determinación práctica haya sido correctamente realizada, es decir cumpliendo con las recomendaciones incluidas en el presente documento, lo mejor es utilizar el menor valor obtenido.

Bibliografía

- AMURRIO, F. 1999. Principios básicos de la ingeniería de riego y drenaje, y su aplicación. Cátedra de Riegos y Drenajes – Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias – UMSS. Cochabamba, Bol.
- CHAMORRO, V.; INGARAMO, C.; MORO, O.; OLESZCZUK, E.; DRGAN, E.; ASSELBORN, J. s.f. El proceso de infiltración en parcelas agrícolas de la provincia del Chaco. Cátedra de Conservación y Manejo de Suelos - Facultad de Ciencias Agrarias - UNNE. Corrientes, Arg. 4 p. (www.unne.edu.ar/Web/cyt/cyt/2001/5-Agrarias/A-069.pdf).
- FERNÁNDEZ, P.C.; LUQUE, J.A.; Paloni, J.D. 1971. Análisis de la Infiltración y su aplicación para diseños de riego en el valle inferior del Río Colorado. Ministerio de Agricultura y Ganadería del Nación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Suelos – publicación N° 130.
- GAVANDE SA. 1 972. Física de Suelos. Principios y Aplicaciones. Ed. Limusa Wiley. p 199–232.
- GUROVICH, L.A. 1985. Fundamentos y diseño de sistemas de riego. San José Costa Rica. IICA. 433 p.
- Programa de capacitación: Mejoramiento de riego parcelario Paracaya (PRIV) 20 de junio al 3 de julio de 1993 Preparado para la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Instructor Carlos Gandarillas Antezana. 1993. tomado de Relación suelo Agua Planta Manual de programación de riego, IIC-USU, 19987.
- SKAGGS, R.W. 1983. Soil Water. In: JENSEN, M.E. (Ed.). 1983. Design and operation of farm irrigation systems. ASAE. Michigan, USA. p.: 103-123.

PLANILLA DE CAMPO PARA DATOS DE UNA PRUEBA DE INFILTRACION

Fecha: _____ Hora: _____ Lugar: _____

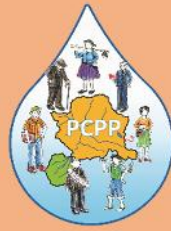
Responsable (s): _____

Características del sitio de la prueba: _____

Croquis de ubicación de las anillas

TIEMPO	LECTURA DE LA ESCALA	
LECTURAS (min)	Nivel del agua (cm)	Nivel de recuperación del agua (cm)
1		
1		
1		
1		
1		
5		
5		
10		
10		
15		
15		
30		
30		
60		
60		
120		
120		

Observaciones: _____



La infiltración, comúnmente definida como la entrada de agua dentro del perfil del suelo en forma vertical, es un proceso de gran importancia práctica para el diseño y la evaluación del riego en la parcela, por ello su determinación es de suma importancia. Este texto de apoyo se concentra en la determinación de la infiltración en el suelo que involucra solamente el movimiento unidimensional gravitacional, es decir aquel que es producido por el efecto de la gravedad. El método de campo explicado es el de la doble anilla, por ser el método más popular en nuestro medio y el modelo empírico utilizado es el de Kostiakov.

