TP Nº 2

UNIDAD N° 2

Hidrología aplicada al estudio y manejo de cuencas y de sistemas de riego y drenaje: Aplicación de metodologías para la medición y estimación del escurrimiento y la infiltración.

Equipo docente:
Ing. Agr. Leopoldo J. Génova (Dr. M. Sc.), Profesor Titular Ordinario
Ing. Agr. Ricardo Andreau, Profesor Adjunto Ordinario
Ing. Agr. Marta Etcheverry, Jefe de Trabajos Prácticos Ordinario
Ing. Agr. Pablo Etchevers, Jefe de Trabajos Prácticos
Ing. Agr. Walter Chale, Ayudante Diplomado
Ing. Agr. Luciano Calvo Ayudante Diplomado
Ing. Agr. Facundo Ramos, Ayudante Diplomado
Ing. Agr. Cecilia Pascual, Ayudante Alumna

INDICE GENERAL

1. Los procesos de infiltración y escurrimiento 3

1.1. Parámetros de la infiltración. 3

2. Estimación de la infiltración y del escurrimiento superficial no encauzado. 3

2.1. Modelos matemáticos que explican la infiltración. 4

K = factor parámetro de la ecuación, surge de la integración, calculado como K= k / 60 (n+1) 5

2.2. Infiltración promedio 5

2.3. Infiltración básica 6

3. Ensayos para la determinación de la velocidad de infiltración a campo. 6

3.1. Métodos e instrumentales de medición. 6

3.1.1. Infiltrómetro de doble anillo. 6

3.1.2. Determinación utilizando surcos. 8

3.1.3. Infiltrómetro de cubetas. 10

3.1.4. Infiltrómetro de aspersión. 10

3.1.5. Infiltrómetro de mini disco 10

4. Representación gráfica de la velocidad de infiltración (I) y de la infiltración acumulada (Iac) 11

5. Métodos de ajuste de los datos de campo para la construcción de las ecuaciones que caracterizan la infiltración. 12

5.1. Procedimiento gráfico para obtener los parámetros de las ecuaciones de infiltración (k y n). 12

5.2. Cálculo de los parámetros k y n, mediante la aplicación de la ecuación de mínimos cuadrados. 12

5.3. Determinación gráfica de la infiltración básica. 12

5.4. Ajuste de datos de infiltración aplicando técnicas de regresión y construcción de las ecuaciones de I e Iac. 13

6. Construcción del modelo de velocidad de infiltración a partir de datos de campo utilizando el método de surcos. 14

7. Determinación del escurrimiento superficial no encauzado. 17

8. Escorrentía 17

8.1. Estimación 17

8.2. Análisis de los componentes de los hidrogramas. 18

8.3. Concepto de Escorrentía 20

8.4. Tipos de escorrentía 20

8.5. Ciclo de escorrentía 20

8.6. Factores que influyen 23

8.7. Cálculo de la escorrentía. 23

9. Ejercicios 25

10. Bibliografía 26

1. Los procesos de infiltración y escurrimiento

El fenómeno de la infiltración, según Hillel (1971), se define como el ingreso vertical de agua al suelo desde su superficie.

Los aportes más comunes de agua al suelo son por lluvias y riegos. El agua inicia su penetración en los macroporos, desplazándose hacia abajo debido principalmente a gradientes de potencial gravitacional y mátrico, formando un frente húmedo, estableciéndose un flujo no saturado, salvo que el suelo estuviese saturado al comenzar a recibir el aporte de agua. Si continua el aporte, el agua irá ocupando todo el espacio poroso y su movimiento tenderá a convertirse en un flujo saturado, que ocurrirá cuando toda la porosidad esté ocupada con agua.

En esa situación de saturación del espacio poroso, la velocidad de infiltración tiende a ser constante y se explica como otra propiedad del suelo: la conductividad hidráulica vertical saturada Kv(w), que es una función de la humedad edáfica y caracteriza el comportamiento del medio poroso respecto al movimiento vertical del agua. También se reconoce la conductividad hidráulica horizontal Kh(w), que se refiere a las condiciones del suelo relacionadas con el movimiento horizontal del agua.

El frente húmedo profundizará dentro del suelo, a una velocidad y distribución gobernados mayoritariamente por características, propiedades y estado del suelo (textura, estructura, porosidad, agrietamiento, laboreo, humedad, cobertura vegetal, materia orgánica, etc.), las características del aporte de agua (intensidad de lluvia o aspersión, tamaño de gota, presión hidráulica, etc.) y en general, por los diferentes tipos y magnitudes de fuerzas que se establecen en el complejo agua–suelo.

El fenómeno de la infiltración es afectado por los siguientes factores:

- Textura: define número y tamaño de poros y la superficie específica de las partículas.
- Estructura: define tipo y distribución de la macro y microporosidad. Entre partículas primarias y agregados.
- Materia orgánica: incide directa e indirectamente en la estructura, porosidad y grado de humedecimiento.
- Humedad del suelo: la dinámica hídrica condiciona la velocidad del proceso de infiltración, debido a la interacción de dos factores: almacenaje y conductividad hidráulica..
- Salinidad y sodicidad del suelo y del agua: la salinidad favorece la infiltración, mientras que el exceso de sodio y magnesio la disminuye, debido a fenómenos de dispersión de las arcillas por defloculación coloidal.
- Estado físico del sistema: las diferentes situaciones de manejo que provocan alteraciones manifiestas en suelo (arado, compactado, surqueado, sembrado, regado, agrietado, etc.) hacen variar significativamente los ritmos de infiltración.

1.1. Parámetros de la infiltración.

- I = Velocidad de infiltración. Es la relación entre la lámina de agua que se infiltra y el tiempo que tarda en hacerlo; expresándose generalmente en mm/h ó cm/hora.
- Iac = Lámina acumulada. Es el volumen de agua infiltrado, expresado linealmente como una altura o profundidad de agua, en mm ó cm.
- Ib = Infiltración básica. Es la velocidad de infiltración cuya variación respecto al tiempo es muy lenta, tendiendo a constante e incluso constante.
- Ip = Infiltración promedio. Es el promedio de las velocidades de infiltración en un período de tiempo.

2. Estimación de la infiltración y del escurrimiento superficial no encauzado.

La infiltración y el escurrimiento son dos componentes del ciclo hidrológico, que es necesario caracterizar para estar en condiciones de comprender su funcionamiento y manejar algunos factores que los determinan.

La infiltración es tenida en cuenta para el diseño y operación de sistemas de riego, de canales y acequias, de embalses, en la construcción de modelos de balance hídrico y en el estudio y manejo de técnicas de conservación de suelos y de drenaje. El escurrimiento superficial no encauzado se suma a los escurrimientos encauzados de ríos, arroyos, desagües, canales, etc. y a los escurrimientos subsuperficial y subterráneo. Estos últimos, se estudiarán más adelante, en los capítulos dedicados al drenaje agrícola.

La caracterización de dichos fenómenos se realiza mediante la obtención de datos de campo, practicando mediciones en las condiciones experimentales más cercanas a la realidad que sean posibles,

para explicar sus tendencias a través de la construcción de modelos matemáticos, con los cuales pronosticar o estimar las variables dependientes involucradas.

La infiltración es particularmente un fenómeno que presenta una alta variabilidad espacial y temporal, asociado a:

A) Distintos tipos y estado de suelos (texturas, coberturas vegetales, pendiente, laboreo, fase de erosión, etc.)
B) Condiciones en que ocurra el ingreso del agua al suelo, como tipo y características del aporte,
   a. lluvia: tipo de tormenta, intensidad, duración, tamaño de gota, cantidad, intermitencia, ráfagas, etc.;
   b. riego: forma de aplicación: microaspersión, goteo, aspersión, surcos, amelgas, taipas arroceras, etc.;
   c. anegamiento o inundación: desborde de ríos, escurrimiento mantiforme, altura de agua, erodabilidad, duración, cantidad de agua, etc.).

Debido a la gran variabilidad, es necesario caracterizar la I de manera representativa, más allá de una observación y descripción. La herramienta más poderosa en la actualidad para realizar dicha caracterización, es a través de modelos matemáticos, que permitan estimar el proceso de la infiltración, explicando con cierto grado de probabilidad, el comportamiento del suelo frente al ingreso de agua y para ello se mide la lámina de agua, en unidades de longitud, que penetra en el suelo a medida que transcurre el tiempo, obteniéndose distintas velocidades de infiltración para intervalos de tiempo y durante un determinado período en que desea conocerse el comportamiento del fenómeno infiltración.

2.1. Modelos matemáticos que explican la infiltración.

En el campo de la Física de Suelos, han sido deducidas ecuaciones diferenciales de flujo, para explicar la infiltración, a partir de las leyes de difusión de masa. Estas ecuaciones generalmente son de escasa aplicabilidad en tecnología de riego, ya que requieren determinaciones de laboratorio rigurosas.

Por otro lado, existen metodologías de campo sencillas, accesibles y de bajo costo, que permiten caracterizar la infiltración adecuadamente, utilizando la información generada para la construcción de ecuaciones que explican el fenómeno en las condiciones experimentales cercanas a las que ocurren en el campo real, con aceptables resultados. Estos métodos requieren de modelos matemáticos empíricos y técnicas estadísticas, con los cuales realizar el ajuste de los datos de campo y elaborar las propias ecuaciones, referentes a las situaciones experimentales planteadas.

El modelo más ampliamente utilizado para caracterizar la infiltración, es el de Kostiakov (1932), modificado por Lewis (1979), que es:

$$I = k \cdot t^{n} \qquad (1) \qquad \text{donde}$$

I = velocidad de infiltración, en cm/h.
k = factor numérico adimensional, pero que representa la velocidad de infiltración en cm/h durante el intervalo inicial, se obtiene analítica o gráficamente y es el parámetro del ajuste de los datos de campo al modelo.
n: exponente que varía entre 0 y –1. Representa la tasa de cambio de la variable dependiente (I) respecto de la variable independiente (t), explicando la disminución de la I con el t. Cuando se grafican los datos de campo y se ajustan al modelo, es la pendiente de la curva de ajuste.
t = tiempo de infiltración, en minutos.

Una imprecisión del modelo (1) es que al aumentar el tiempo t, el valor de I tiende a cero, lo cual no explica la verdadera tendencia del fenómeno, conocido por abundante experimentación. El USDA modificó la ecuación (1) proponiendo:

$$I = k \cdot t^{n} + Ib \qquad (2) \qquad \text{donde}$$

Ib = constante de velocidad de infiltración, en cm/h, cuando el tiempo tiende a infinito o cuando las observaciones de campo de la I se realizan durante períodos de tiempo largos, en que la I llega a ser constante en el intervalo de tiempo en que se mide la I. Esta situación se alcanza generalmente cuando el suelo se satura y se produce la denominada infiltración básica o valor final de I, prácticamente constante respecto del tiempo.

Una vez construida la ecuación de velocidad de infiltración, ajustando los valores de campo al modelo (1), puede obtenerse la ecuación de la infiltración acumulada Iac (4), integrando (1) entre los límites de tiempo t = 0 y t = t que se proponga.

$$Iac = \int_0^t I\,dt = \int_0^t k.\,t^{\,n}$$

$$Iac = \frac{k}{n+1} * t^{(n+1)}$$

Para hacer congruente la dimensionalidad de las variables, considerando que en (1) la I está dada en cm/h y el t en minutos, hay que afectar el cociente por el factor 60 atendiendo a que 1 h = 60 min, por lo que:

$$Iac(cm) = \frac{k}{60(n+1)} * t^{(n+1)} \qquad (3)$$

Quedando entonces la ecuación de lámina infiltrada o infiltración acumulada como sigue:

$$Iac = K\,t^{\,N} \qquad (4) \qquad \text{donde}$$

Iac = infiltración acumulada, en cm.
K = factor parámetro de la ecuación, surge de la integración, calculado como K= k / 60 (n+1)
N = exponente parámetro, calculado en la integración como N = n + 1, representa la tasa de cambio de la variable dependiente Iac respecto del t, explica el crecimiento de Iac con el tiempo, a medida de continúa el proceso de infiltración.
t = tiempo, en minutos.

<u>Ejemplo numérico de integración, para transformar una ecuación de I en otra de Iac.</u>

Obtenida una ecuación de velocidad de infiltración I (cm/h)= 42,52 t (min) $^{-0.7}$, integrando y utilizando el factor de corrección dimensional 1 h = 60 min, se logra:

K = 42,52 / (-0,7 + 1) 60 = 2,362 y N = - 0,7 + 1 = 0,3

entonces Iac (cm) = 2,362 t (min) ^{0,3}

2.2. Infiltración promedio

La velocidad de infiltración promedio Ip se obtiene calculando la media de velocidades de infiltración ocurridas en el intervalo de tiempo que se proponga. Si se desea la Ip de todo el período en que ocurrió el proceso de infiltración, podrá calcularse haciendo el cociente entre la lámina total infiltrada y el tiempo total en que se acumuló la infiltración.

$$Ip\ (cm/h) = Iac\ (cm) / t\ (h) \qquad (5)$$

O también, puede calcularse reemplazando (4) en (5), generando la ecuación (6).

$$Ip = Iac/t = K\,t^{\,N}/\,t = K\,t^{\,(N-1)} = K\,t^{\,n} \quad (6)$$

Por ejemplo, dada Iac (cm) = 2,362 t (min) exp 0,3 , la Ip durante un proceso de infiltración de t = 120 minutos, resulta:

a) Iac (cm) = 2,362 * 120 min ^{0,3} = 9,93 cm
   Ip = Iac / t total = 9,93 cm / 120 min = 0,08275 cm min^{-1} 60 min h^{-1} = 4,96 cm h^{-1}

b) Ip = Iac / t total = K t $^{(N-1)}$ = 2,362 * 120 min $^{0,3-1}$ = 2,362 * 120 min $^{-0,7}$ =
   = 0,0827622 cm min^{-1} * 60 min h^{-1} = 4,96 cm h^{-1}

2.3. Infiltración básica

El SCS (Servicio de conservación de suelos) del USDA define a la infiltración básica Ib como el valor instantáneo de la velocidad de infiltración cuando la tasa de cambio, para un período estándar, es el 10 % o menos de la velocidad de infiltración. Generalmente se considera del tiempo que se alcanza la infiltración básica cuando la velocidad de infiltración se hace constante respecto del tiempo. Para calcular el tiempo en el cual I = Ib, se procede igualando la primer derivada de la ecuación de I a la ec. de I por -0,1. Entonces,

$$dI/dt = -0{,}1\ I$$

$$dI/dt = -\ 0{,}1\ k\ t^{\ n}$$

$$t_b = -\ 10\ n \qquad (7)$$

donde:
t_b = tiempo en que ocurre la Ib, en minutos.
Cuando I está dado en cm/h, entonces:

$$t_b\ (min) = -600\ n \qquad (8)$$

por lo que $Ib = k\ (-\ 600\ n)^n$ (9) donde

Ib = velocidad de infiltración básica, en cm/h.

<u>Ejemplo numérico de cálculo de la Ib.</u>
Dada la ec. de I (cm h^{-1}) = 42,52 t (min) $^{-0,7}$, quiere estimarse la Ib:
Como t_b (min) = - 600 * 0,7 = 420 min,
$Ib = k\ t_b^{\ -0,7} = 42{,}52 * 420\ min^{\ -\ 0,7} = 0{,}62\ cm\ h^{-1}$

3. Ensayos para la determinación de la velocidad de infiltración a campo.

La base de la construcción de los modelos matemáticos relativos a la infiltración, es la obtención de los valores de las variables de interés, a partir de mediciones de campo, aplicando distintas metodologías e instrumental, de los cuales, consideraremos los siguientes:

- Infiltrómetro de doble anillo, de cilindros o de Muntz
- Infiltrómetro de surcos
- Infiltrómetro de cubeta
- Infiltrómetro de aspersión

Las principales recomendaciones para conducir los ensayos de infiltración son:

- Realizar siempre repeticiones, no menos de tres, debido a la alta variabilidad del fenómeno. Es práctico instalar varios infiltrómetros en cada sitio a estudiar y operarlos simultáneamente.
- Efectuar el ensayo con un contenido hídrico del suelo similar a la que tendrá el suelo cuando se riegue, ya que la humedad actual es un factor muy importante de la velocidad de infiltración en la etapa inicial.

3.1. Métodos e instrumentales de medición.

3.1.1. Infiltrómetro de doble anillo.

Se utiliza para caracterizar la infiltración de una lámina de agua localizada sobre la superficie del suelo, por lo que su medición es representativa del proceso natural de ingreso de agua al suelo en los casos de riego por desbordamiento, amelgas y taipas arroceras y simula la entrada de agua tal como ocurre en casos de anegamiento e inundación.

Es el método de campo más generalizado, que permite medir la disminución de la altura de agua almacenada en un recipiente cilíndrico, clavado en la superficie del suelo, durante intervalos de tiempo.

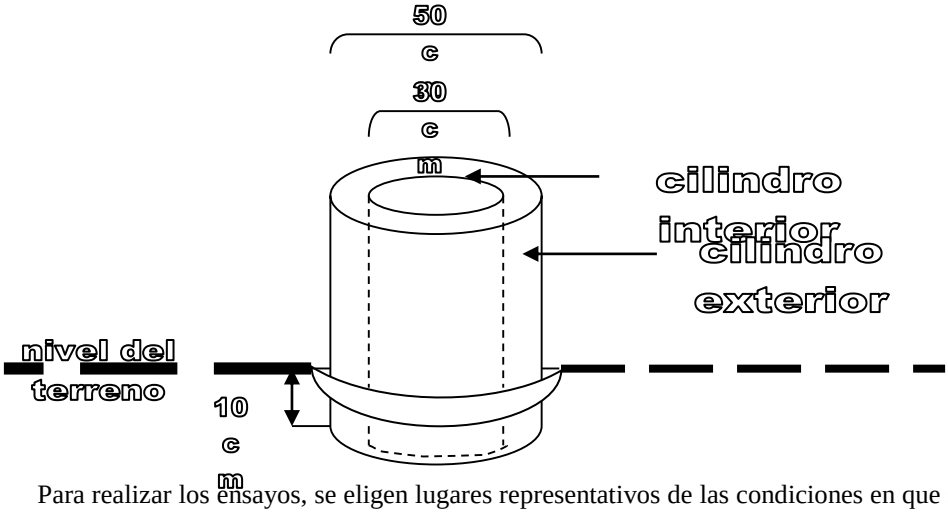
El infiltrómetro de anillos concéntricos estandarizado por el USDA tiene las siguientes dimensiones y componentes: aro interior, 22 a 30 cm de diámetro y 30 cm de longitud, que se entierra 10 a 15 cm; el aro exterior de por lo menos 30 cm de diámetro y 18 cm de longitud. Completan el aparato una

regla milimetrada fija y una varilla corrediza con un gancho con cuya punta se toca el nivel del agua, desde abajo. La profundidad del agua dentro del cilindro interno debe mantenerse entre los 7 y 12 cm, por lo que la reposición hasta recuperar el nivel original debe hacerse cada 3 a 5 cm de descenso de la superficie libre del agua.

Existen muchas variantes referentes a las dimensiones y materiales del instrumental y a las formas de entregar el agua y medir el descenso del nivel. Un infiltrómetro de doble anillo típico de hierro, PVC, aluminio, etc., se muestra en la Figura 1.

Los infiltrómetros pueden ser con recarga de agua constante o variable. Estos últimos proponen efectuar la medición del volumen de agua infiltrado en un tanque, desde donde se alimenta el dispositivo donde ocurre la infiltración, manteniendo la altura de agua constante

Infiltrómetro de cilindros.



Para realizar los ensayos, se eligen lugares representativos de las condiciones en que se establecerá la infiltración que se quiere caracterizar. Los cilindros se introducen en el suelo cuidando que queden bien centrados entre sí y tratando de disturbar lo menos posible el suelo, sobre todo no compactarlo. El cilindro interior debe quedar enterrado unos 12 cm y el exterior 10 cm.. La cámara que queda formada entre ambos cilindros también se llena con agua hasta una altura conveniente y para que actúe como amortiguador, evitando que el agua que ingresa en el cilindro central se desplace lateralmente (tener en cuenta que se quiere medir la infiltración en sentido vertical).

Una vez que se incorporó agua a los cilindros, no sobrepasando una altura de 15 cm., comienzan a cronometrarse los descensos del nivel de agua que ocurren en el cilindro central, debido a la infiltración, en intervalos de tiempo inicialmente pequeños, del orden del minuto, aumentándose hasta alcanzar la Ib o evaluar el proceso de infiltración durante un lapso preacordado, de acuerdo a los fines para los cuales se realizan las mediciones.

El tiempo total de la prueba varía en función del tipo de suelo (de 45 a 90 minutos en suelos arenosos y de 3 a 5 horas en suelos arcillosos), de la duración de la aplicación de agua que proponga el método de riego a realizar (tiempos de riego de 20 minutos en métodos de riego localizado a continuos en métodos de inundación permanente).

Si quieren hacerse mediciones a carga constante, luego de cada lectura, o bien cuando el nivel haya descendido aproximadamente 5 cm, debe recuperarse el enrase original al momento de iniciarse el ensayo.

Los valores de las observaciones se van registrando en planillas u hojas de cálculo de programas de computación, confeccionadas a tal efecto y con los conjuntos de pares de valores relativos a las velocidades de infiltración y sus tiempos asociados, se elaborarán las gráficas y efectuarán los ajustes a los modelos matemáticos propuestos, para construir la ecuación de la velocidad de infiltración que represente el sitio y las condiciones ensayados.

Ejemplo de cálculo: Los valores de la columna 8 surgen del cociente entre los valores de las columnas 6 y 2, multiplicadas por 60 min/h. Los puntos coordenados que se grafican y ajustan al modelo de Kostiakov-Lewis, son los valores de las columnas 8 y 3.

Esta planilla no necesariamente debe ser igual al modelo presentado y cada operador podrá introducir las variantes que crea convenientes para asegurar una buena medición.

Planilla de registro de las observaciones en infiltrómetro de doble anillo.

Hora	Tiempo parcial	Tiempo acumulado	Carga de agua inicial	Carga de agua final	Lámina infiltrada Parcial	Lámina infiltrada Acumulada	Velocidad de infiltración
	(min).	(min)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm/h)
8.01	0		15				
8.06	5	5	15	13.9	1.1	1.1	13.2
8.11	5	10	13.9	13.2	0.7	1.8	8,4
8.21	10	20	13.2	12.5	0.7	2.5	4.2
8.31	10	30	12.5	12.1	0.4	2.9	2.4
8.46	15	45	12.1	11.7	0.4	3.3	1.6
9.01	15	60	11.7	11.4	0.3	3.6	1.2
9.31	30	90	11.4	10.8	0.6	4.2	1.2
			recarga a 15 cm				
10.01	30	120	15	14.5	0.5	4.7	1
11.01	60	180	14.5	13.5	1	5.7	1
12.01	60	240	13.5	12.5	1	6.7	1

3.1.2. Determinación utilizando surcos.

El riego por surcos, o en surcos, es la modalidad más común de los métodos de riego por gravedad. El surco se comporta hidráulicamente como un pequeño canal, pero cuyo objetivo es que el agua infiltre a medida que escurre, mientras que en el canal, la infiltración debe ser mínima, ya que se trata de un elemento de conducción de agua y la infiltración significa pérdida para la conducción del agua.

Como en los surcos la infiltración es bidimensional, para diseñarlos y operarlos, es conveniente medir la infiltración en ellos, tal como se manifestará en la realidad. El método consiste en determinar la velocidad de infiltración midiendo los caudales de entrada Qe y de salida Qs del agua que escurre a lo largo de una determinada longitud de surco.

Cuando los surcos se construyen sin retención de agua en el pié o cola, una cierta cantidad de agua escurre fuera de los mismos. Pero también puede tomarse un tramo de un surco largo. En cualquier caso, aforando Qe y Qs, puede determinarse la diferencia entre ambos valores, que corresponderá al caudal infiltrado Qi = Qe - Qs .

Su implementación requiere seguir los siguientes pasos:

1) Construir en el terreno que se va a regar, varios surcos de distancia conocida, recomendándose surcos de 60 m de largo como mínimo, con el espaciamiento que establezca el cultivo a regar. La unidad muestral del ensayo es de tres surcos contiguos, seleccionándose el central para efectuar las mediciones de Qe y Qs.

2) Se elige un Qe de acuerdo a los fines del ensayo. Puede ser un caudal máximo no erosivo QMNE, estimado con la fórmula Criddle (14) o seleccionado por observación de la erosión en prueba directa de campo.

$$QMNE\ (l/s) = 0{,}63 / i\ (\%) \qquad (10)$$

donde

QMNE = caudal máximo no erosivo, en litros por segundo.

i = pendiente longitudinal del surco, en %

3) Mediante el empleo de sifones, orificios, compuertas, etc., se deriva y afora continuamente el mismo Qe al conjunto de 3 surcos, que es la unidad de ensayo. El Qs del surco central se afora volumétricamente, o con la ayuda de estructuras como aforadores Parshall, de garganta u otros dispositivos. El ensayo termina al verificarse tres o cuatro caudales de salida constantes, que indica aproximadamente que se alcanzó la infiltración básica y por supuesto Qs = cte.

4) Se registra el momento en que se inicia la derivación del Qe en el surco central y en que comienza a gestarse el Qs.

5) A medida que se cumple el escurrimiento y la infiltración, se van aforando los Qe y Qs, una vez transcurridos intervalos de tiempo preestablecidos, de duración creciente, hasta Qs = cte. A medida que va cumpliéndose la infiltración, el Qs va haciéndose cada vez más grande, debido a la disminución de la I por las causas ya explicadas.

6) Para cada intervalo de tiempo, se calcula Qi = Qe - Qs. Luego, se transforma Qi en I, mediante la aplicación de la ec. de igualdades volumétricas (15) :

$$Q * t = Lam * A \quad (15) \quad \text{donde}$$

Q = caudal, en m^3/s.

t = tiempo, en s.

Lam = lámina, altura o profundidad de agua, en m.

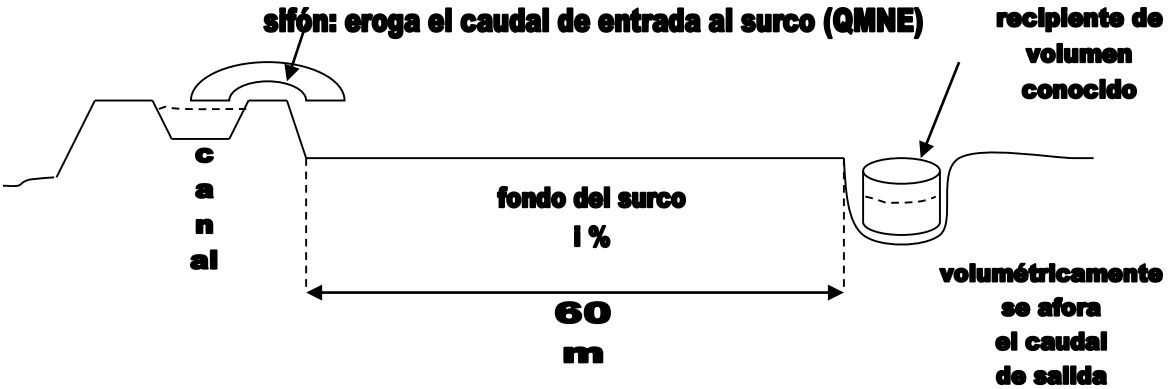
A = área de infiltración, en m^2. Si los surcos son contiguos y los bulbos húmedos se superponen, el área será el producto de la longitud del surco o de la fracción de la longitud del surco donde se mide la infiltración y el espaciamiento entre surcos. Si los surcos son espaciados y los bulbos no se superponen, el área de infiltración se calculará con la longitud ya descripta y el perímetro mojado del surco.

Entonces $Qi / A = Lam / t = I$

El Qi estará dado habitualmente en l/s o en m^3/s, por lo que para expresar la I en cm/h habrá que realizar las operaciones de equivalencia dimensionales.

7) Los valores de I en cm/h y de tiempos en minutos se grafican y ajustan al modelo de Kostiakov-Lewis, construyéndose la ecuación de I.

Esquema del método del infiltrómetro de surcos.



Elaboración de la información:

Los datos que surgen del ensayo de campo con el método del surco infiltrómetro se vuelcan en una planilla como la que se muestra a continuación:

Hora	Tiempo parcial	Tiempo acumulado	Qe	Qs	Qi	Velocidad infiltr.	Lámina parcial	Lámina acumulad
	(min)	(min)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(cm/h)	(mm)	(mm)
9:00	0	0	1.5			15 (1)		
9:15	15	15	1.5	0.75	0.75	7,5 (2)	28 (3)	28
9:30	15	30	1.5	0.8	0.7	7,0	18 (4)	46
9.45	15	45	1.5	0.9	0.6	6,0	15	61
10:00	15	60	1.5	1.05	0.45	4,5	13	74
10:30	30	90	1.5	1.27	0.23	2,3	17	91
11:00	30	120	1.5	1.39	0.11	1,1	8.5	99.5
12:00	60	180	1.5	1.39	0.11	1,1	11	110.5

Un ejemplo de los cálculos realizados para obtener los valores que figuran en la planilla, correspondientes a I (cm/h) y a la lámina parcial en cm, para un surco de A =36 m^2, se muestran a continuación.

Para (1) 1,5 l/s * m^3 /1000 l * 3600 s/h*. 100 cm/m / 36 m^2 = 15 cm/h
Para (2) 0,75 l/s * m^3 /1000 l * 3600 s/h*. 100 cm/m / 36 m^2 = 7,5 cm/h
Para (3) (15 cm/h + 7,5 cm/h)/ 2 * 15 min / 60 min/h = 2,8125 cm.
Para (4) (7,5 cm/h + 7 cm/h) / 2 * 15 min / 60 min/h = 1,8125 cm

Siguiendo con esta metodología de cálculo, se completa el total de la planilla. Se observa que el valor final de I = 1,1cm/h corresponde a la Ib.

3.1.3. Infiltrómetro de cubetas.

Descripto por Grassi (1972), consta de un marco cuadrado de madera (tablas de 0,2 m de ancho y 1,5 m de largo) que se ensamblan y sostienen verticales sobre el suelo, mediante un pequeño terraplén. El tanque de alimentación es portado por un trailer y se deriva agua mediante manguera y válvula, manteniendo unos 10 cm de altura de agua. Una regla enterrada en el suelo permite realizar las lecturas del descenso del nivel de agua dentro del cuadrado, reponiéndose cada vez que se consuman 5 cm.

3.1.4. Infiltrómetro de aspersión.

Es similar al anterior, pudiendo ser el marco metálico o de PVC. El suministro de agua se realiza por un aspersor o varios, con una intensidad de aplicación que produzca escurrimiento superficial, cuya medición y diferencia con el aporte, darán la infiltración.

No se ha generalizado por las siguientes desventajas: las intensidades reales de aplicaciones por aspersión no deberían generar escurrimiento, asociados con peligro de erosión y puede quedar agua almacenada e superficie que se computa como infiltrada.

3.1.5. Infiltrómetro de mini disco

El infiltrómetro de mini disco consiste en un tubo de ensayo de 32.7 cm. de longitud y 3.1 cm de diámetro. En la parte superior se encuentra un tapón de goma con un capilar graduado en centímetros para determinar la succión a utilizar. En su parte inferior posee un disco de acero inoxidable de 4.5 cm de diámetro y 3mm de grosor.

Separado en dos cámaras por una placa de goma, la cámara superior llamada cámara de burbujas controla la succión sobre la superficie de contacto entre el disco y el suelo, su función principal es crear una succión constante sobre la superficie de contacto entre el disco y el suelo. La cámara inferior esta graduada en centímetros y contiene el agua a aplicar en la prueba, posee un tubo mariotte que se comunica con la cámara superior.

Para su utilización se llena de agua ambas cámaras tapándose herméticamente con el disco y el tapón de goma, se coloca verticalmente sobre la superficie del suelo.

Previamente se coloca un anillo de plástico de 2mm de grosor relleno de arena de 0.5 mm diámetro, a fin de lograr un buen contacto hidráulico entre el infiltrómetro y el suelo. Una vez hecho esto el agua dentro del tubo fluye y se infiltra dentro del suelo a una tensión igual a la que produce el capilar dentro de la cámara de burbujas de -0.5cm, -1.0cm hasta -6.0cm de columna de agua. En el caso de la tensión -0.5 cm la succión es menor, por tanto la fuerza vertical creada entre por la cohesión y la tensión superficial es menor, al ir disminuyendo las tensiones hasta -6.0 cm. la fuerza vertical incrementa

Considerando al suelo como un conjunto interconectado de tubos capilares de diferente diámetro, cuando el agua del infiltrómetro empieza a circular sólo se llenaran los poros que provoquen una tensión superior a la succión creada por el infiltrómetro sobre la superficie de contacto. Debido a que el infiltrómetro posee una succión ajustable es posible controlar el paso del agua a los poros de diferentes diámetros existentes en el suelo

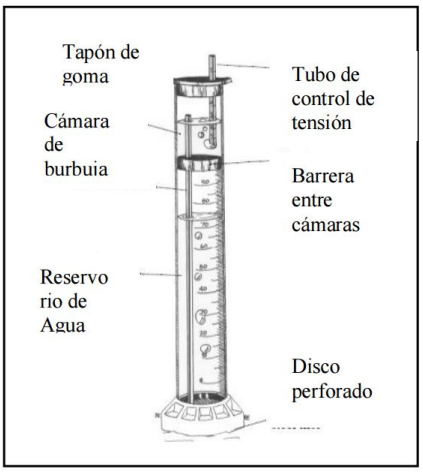


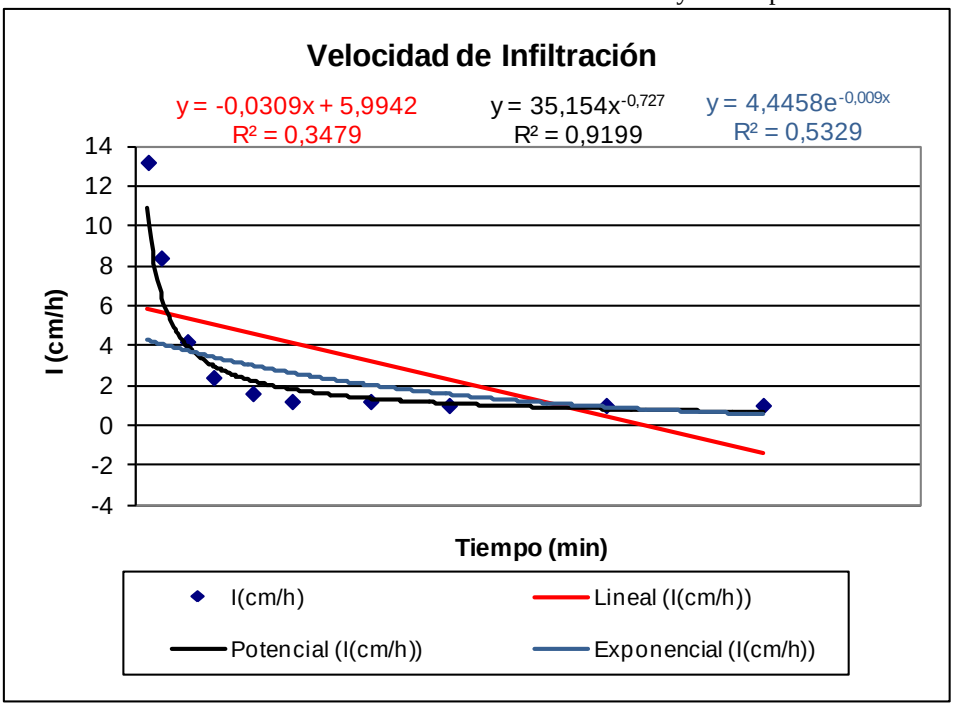
Figura 1. Diagrama de Infiltrómetro

4. Representación gráfica de la velocidad de infiltración (I) y de la infiltración acumulada (Iac)

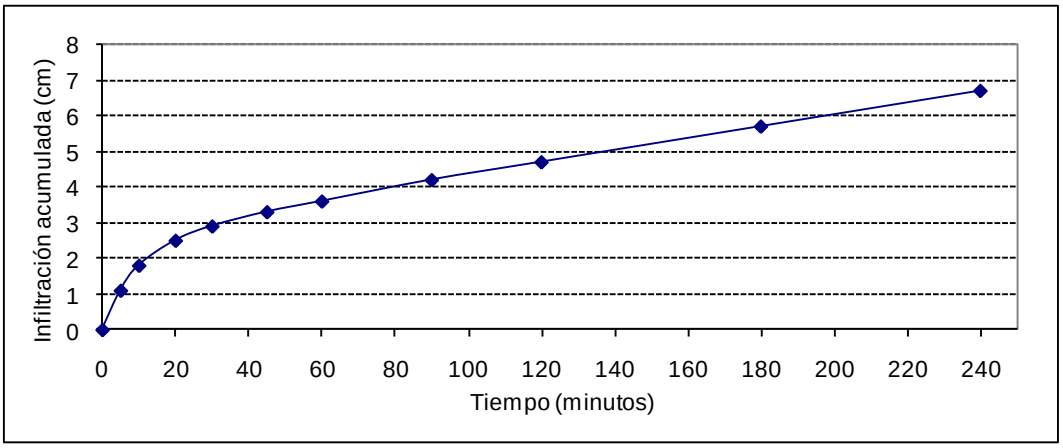
Los datos obtenidos en los ensayos a campo, son habitualmente representados gráficamente, para mostrar las relaciones entre la velocidad de infiltración y la infiltración acumulada con el tiempo.

Ajustando los datos a figuras geométricamente definidas (rectas, curvas parabólicas, hiperbólicas, exponenciales, logarítmicas, polinomiales, etc.) se logra visualizar la tendencia de la marcha de los fenómenos. El ajuste numérico a modelos matemáticos, mediante métodos estadísticos, permite elaborar las ecuaciones que representan la tendencia del fenómeno, esto es, el lugar común de los datos que minimiza la dispersión con una probabilidad asociada.

Relación entre la velocidad de infiltración y el tiempo.



Relación entre la infiltración acumulada y el tiempo.



En las figuras se observan dos curvas de ajuste de los datos que grafican la tendencia de I (cm/h) e Iac (cm) respecto del tiempo (min).

5. Métodos de ajuste de los datos de campo para la construcción de las ecuaciones que caracterizan la infiltración.

5.1. Procedimiento gráfico para obtener los parámetros de las ecuaciones de infiltración (k y n).

Se utilizan planillas de cálculo o programas estadísticos que permiten realizar el ajuste de los datos de campo (ensayo de infiltración). En ellas se puede elegir entre distintas líneas de tendencias (lineal, potencial, exponencial, etc) con sus respectivos valores de R^2.

5.2. Cálculo de los parámetros k y n, mediante la aplicación de la ecuación de mínimos cuadrados.

Esta aplicación tiene objetivos didácticos, ya que el cálculo de los mínimos cuadrados es la base estadística matemática de las técnicas de Regresión Lineal, procedimientos estadísticos para el ajuste de datos y la modelización matemática.

Con la siguiente ecuación de mínimos cuadrados, se obtiene el valor de n:

$$n = \frac{\sum (\log t \,.\, \log I) - (\sum \log t).(\sum \log I) \big/ N}{\sum (\log t)^2 - (\sum \log t)^2 \big/ N} \quad \text{donde}$$

n = pendiente de la recta
I = velocidad de infiltración
t = tiempo
N = número de datos

Luego se calcula el valor de K con la siguiente expresión:

$$\text{Log K} = \frac{\sum \log I}{N} - \frac{(n.\sum \log t)}{N}$$

5.3. Determinación gráfica de la infiltración básica.

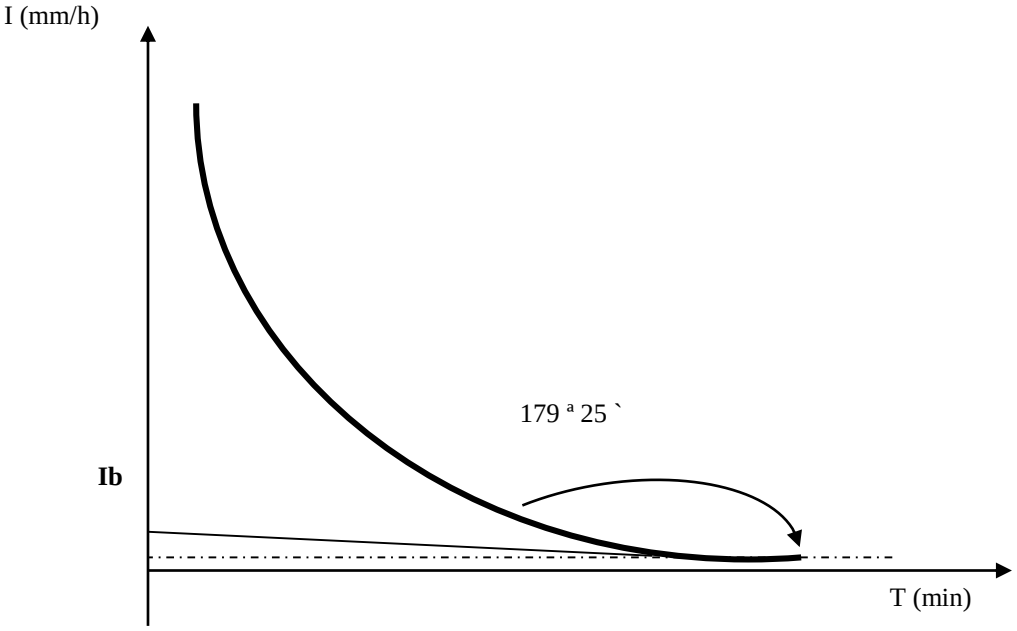
La infiltración básica Ib es importante para proyectar riegos y ya se había definido como la velocidad de infiltración cuando su variación respecto del tiempo es muy lenta. Es el valor al que tiende la velocidad de infiltración para un tiempo grande.

Luego de un riego más o menos prolongado y cuando el perfil del suelo está llegando a saturación, puede decirse que se alcanza la Ib. El tiempo necesario para llegar a esta situación dependerá de la profundidad a que se encuentra la zona de saturación, o la capa de menor permeabilidad que funcionará como "impermeable relativo".

La I casi constante se alcanza cuando los primeros centímetros del perfil del suelo superan la capacidad de campo, incluso saturándose momentáneamente, mientras el agua gravitacional drena hacia las capas más profundas.

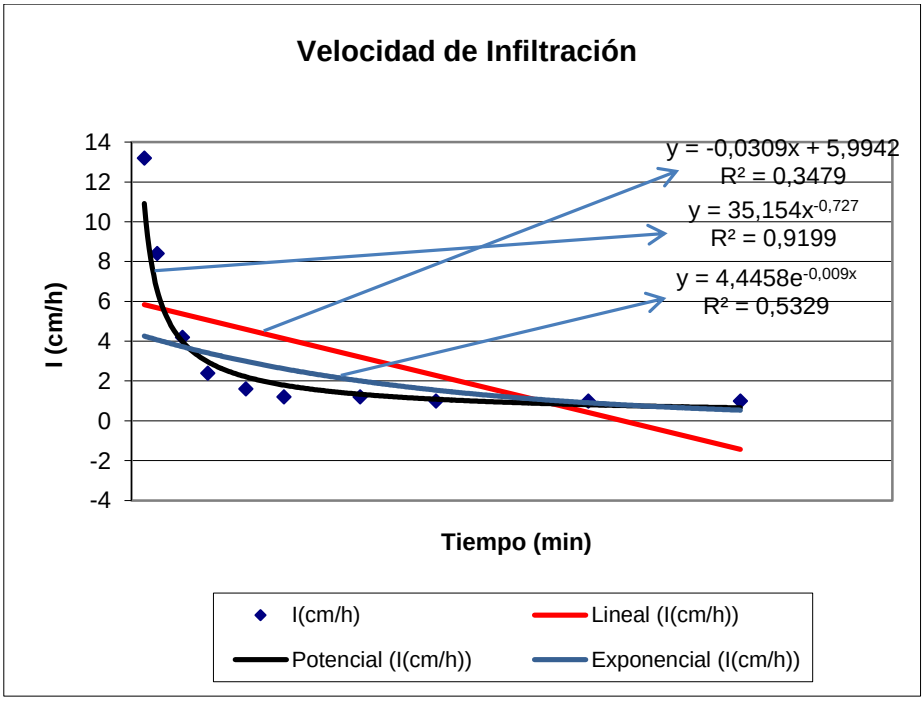
Gráficamente, el valor de la Ib se marca en un punto de la curva de I en que la pendiente es tan pequeña como para suponer que se ha alcanzado la constancia de I respecto del tiempo, haciéndose asintótica al eje de abscisa. Fernández et al (1978) establecieron que una pendiente de –0.01, en concordancia con un ángulo de 179° 25´, propone una I constante. En la Figura 8 se observa esta situación.

Figura 8. Obtención gráfica de la Ib.



5.4. Ajuste de datos de infiltración aplicando técnicas de regresión y construcción de las ecuaciones de I e Iac.

Método de ajuste de los valores de velocidad de infiltración obtenidos con el método del doble anillo y el método de surcos



t(min)	I(cm/h)
5	13,2
10	8,4
20	4,2
30	2,4
45	1,6
60	1,2
90	1,2
120	1
180	1
240	1

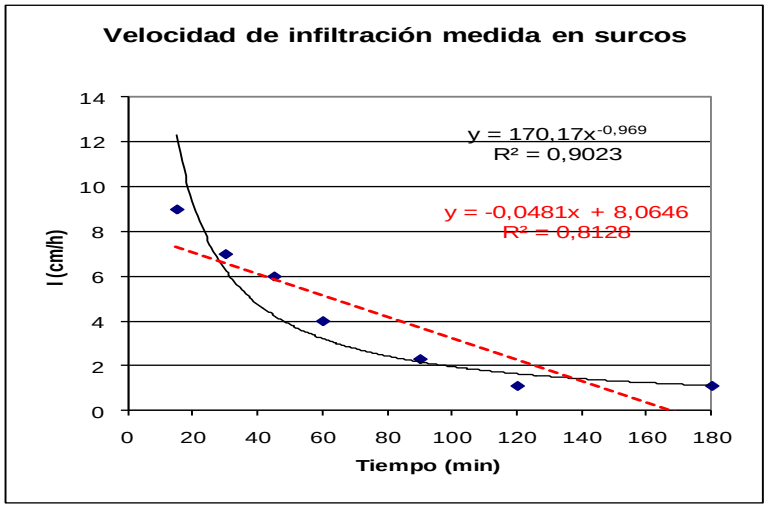
6. Construcción del modelo de velocidad de infiltración a partir de datos de campo utilizando el método de surcos.

Consiste en construir en el terreno un conjunto de surcos muestrales, similares a los que se utilizarán en el riego del cultivo propuesto. Los surcos se comportarán como un instrumento de medición de la infiltración, ya que se registrarán los valores de caudales de entrada y salida en un surco central, donde los dos surcos paralelos contiguos funcionarán como control, simulando las condiciones hidráulicas reales del método de riego. Será necesario medir caudales con algún dispositivo adecuado (sifones, orificios, vertederos, recipiente y cronómetro) desde un tiempo inicial hasta que se verifique constancia en el caudal de salida, en el pié del surco. Las diferencias entre los caudales de entrada (constantes) y los de salida (variables), constituyen los caudales de infiltración que serán tabulados con su par ordenado de valores de tiempo acumulado.

Q entrada - Q salida = Q infiltrado

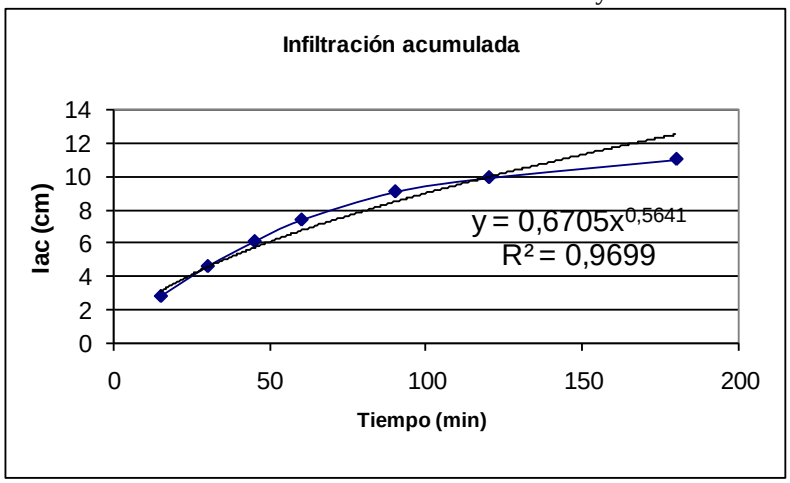
De acuerdo con la ec. de igualdades volumétricas, Q(m^3s^{-1}) t(s)=lám (m) área (m^2),
Q/área=lám t^{-1} = Infiltración

Expresando los valores medidos en las dimensiones propuestas, I en (cm h^{-1}) y tiempo en min, se genera una tabla de pares de valores que se grafican y ajustan aplicando técnicas de regresión. Según los datos de campo, se obtienen los siguientes valores de velocidad de infiltración (cm h^{-1}) y tiempo acumulado (min)



t (min)	I (cm h^{-1})
15	9
30	7
45	6
60	4
90	2,3
120	1,1
180	1,1

Datos de lámina acumulada obtenidos en el mismo ensayo



t acum (min)	I ac (cm)
15	2,8
30	4,6
45	6,1
60	7,4
90	9,1
120	9,95
180	11,05

Utilizando el modelo de Kostiakov para construir la ecuación de velocidad de infiltración, obtuvimos

$$I\ (cm\ h^{-1}) = 170{,}17\ \ t\ (min)^{-0.969} \quad \text{con } r^2 = 0{,}9$$

y una ecuación de infiltración acumulada

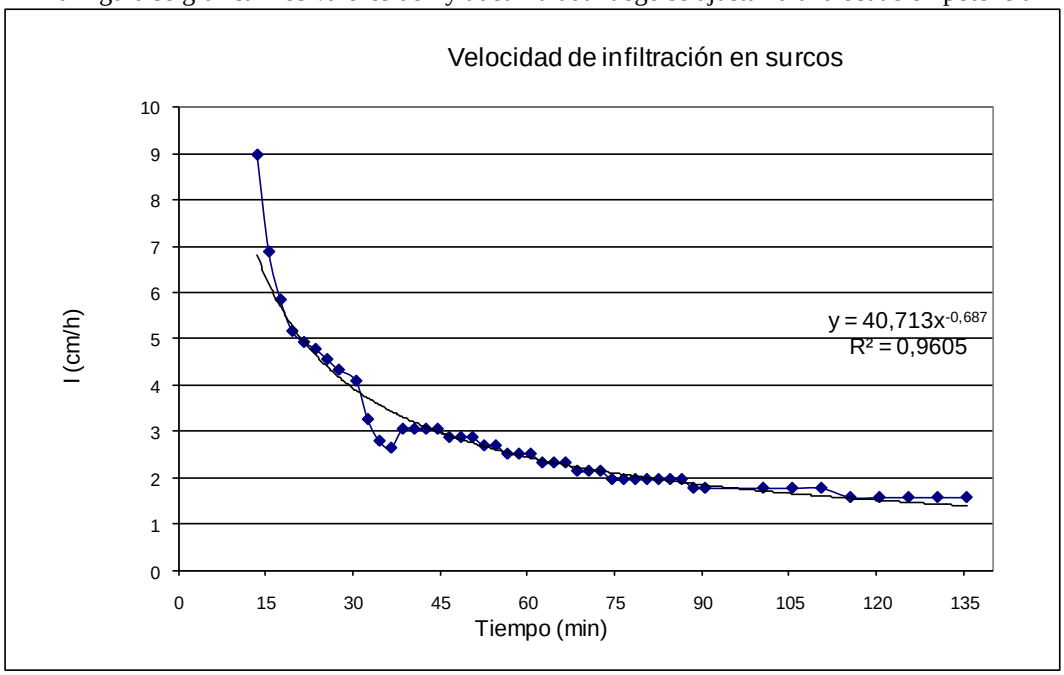
$$I\ ac\ (cm) = 0{,}6705\ t\ (min)^{0.5641} \qquad con\ r^2 = 0{,}97$$

Ejemplo
Ensayo: Montecillos.
Qe= 1,5 l/s
Long. Surcos= 60 m
Ancho del surco= 0,8 m
Area= 48m^2
Velocidad de Infiltración I (cm/h):8,99= (1,5 – 0,301)=1,199 l/s = 71,94 l/min
71,94 l min^{-1} / 48m^2 = 0,07194 m^3 min^{-1} / 48m^2 = 0,00149 m min^{-1} = 1,49mm min^{-1} = 8,99cm h^{-1}

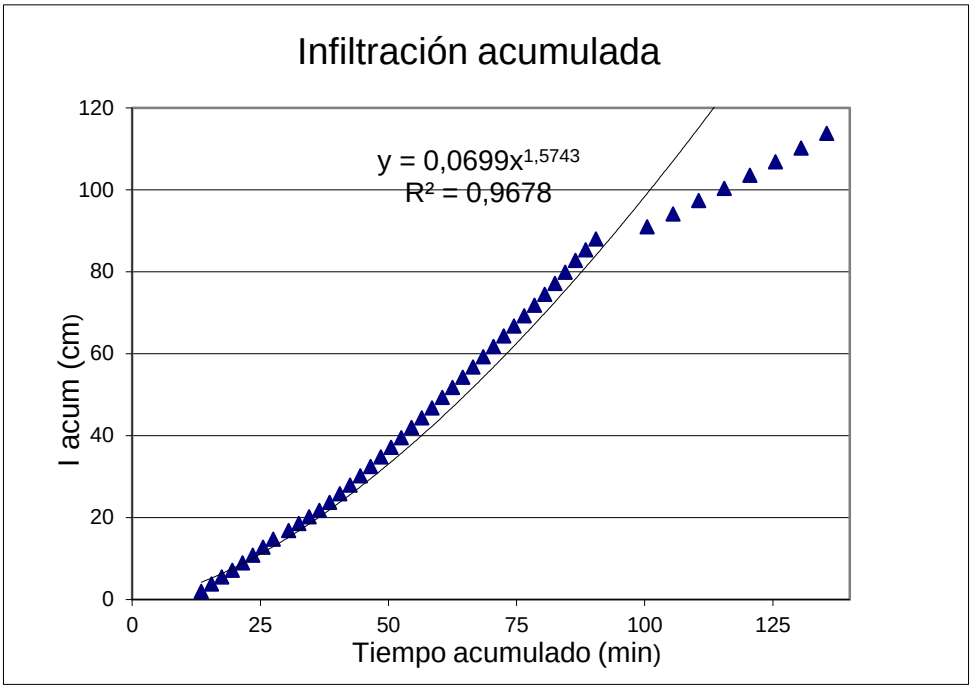
Hora	Tiempo transcurrido desde	hasta	Promedio del tiempo acum.	Caudales Entrada	Salida	Velocidad de infiltración	Lámina	Lámina acumulada
	Cabecera	Pie	t	Qe	Qs	I	d	d cum
	(min)	(min)	(min)	(l/s)	(l/s)	(cm/h)	(cm)	(cm)
08:17	inicio							
08:42	25	0	0	1,5				
08:43	26	1	13,5	1,5	0,301	8,99	2,02	2,02
08:45	28	3	15,5	1,5	0,581	6,89	1,78	3,80
08:47	30	5	17,5	1,5	0,72	5,85	1,71	5,51
08:49	32	7	19,5	1,5	0,811	5,17	1,68	7,19
08:51	34	9	21,5	1,5	0,842	4,93	1,77	8,95
08:53	36	11	23,5	1,5	0,862	4,78	1,87	10,83
08:55	38	13	25,5	1,5	0,892	4,56	1,94	12,76
08:57	40	15	27,5	1,5	0,923	4,33	1,98	14,75
09:00	43	18	30,5	1,5	0,955	4,09	2,08	16,83
09:02	45	20	32,5	1,5	1,065	3,26	1,77	18,59
09:04	47	22	34,5	1,5	1,128	2,79	1,60	20,20
09:06	49	24	36,5	1,5	1,148	2,64	1,61	21,80
09:08	51	26	38,5	1,5	1,093	3,05	1,96	23,76
09:10	53	28	40,5	1,5	1,093	3,05	2,06	25,82
09:12	55	30	42,5	1,5	1,093	3,05	2,16	27,98
09:14	57	32	44,5	1,5	1,093	3,05	2,26	30,24
09:16	59	34	46,5	1,5	1,117	2,87	2,22	32,47
09:18	61	36	48,5	1,5	1,117	2,87	2,32	34,79
09:20	63	38	50,5	1,5	1,117	2,87	2,42	37,20
09:22	65	40	52,5	1,5	1,141	2,69	2,35	39,55
09:24	67	42	54,5	1,5	1,141	2,69	2,44	42,00
09:26	69	44	56,5	1,5	1,165	2,51	2,36	44,36
09:28	71	46	58,5	1,5	1,165	2,51	2,45	46,81
09:30	73	48	60,5	1,5	1,165	2,51	2,53	49,34
09:32	75	50	62,5	1,5	1,19	2,32	2,42	51,76
09:34	77	52	64,5	1,5	1,19	2,32	2,49	54,25
09:36	79	54	66,5	1,5	1,19	2,32	2,57	56,82
09:38	81	56	68,5	1,5	1,215	2,14	2,44	59,27
09:40	83	58	70,5	1,5	1,215	2,14	2,51	61,78
09:42	85	60	72,5	1,5	1,215	2,14	2,59	64,37
09:44	87	62	74,5	1,5	1,239	1,96	2,43	66,80
09:46	89	64	76,5	1,5	1,239	1,96	2,50	69,30
09:48	91	66	78,5	1,5	1,239	1,96	2,56	71,86
09:50	93	68	80,5	1,5	1,239	1,96	2,63	74,49
09:52	95	70	82,5	1,5	1,239	1,96	2,70	77,19
09:54	97	72	84,5	1,5	1,239	1,96	2,76	79,95
09:56	99	74	86,5	1,5	1,239	1,96	2,83	82,77

09:58	101	76	88,5	1,5	1,264	1,77	2,61	85,38
10:00	103	78	90,5	1,5	1,264	1,77	2,67	88,05
10:10	113	88	100,5	1,5	1,264	1,77	2,96	91,02
10:15	118	93	105,5	1,5	1,264	1,77	3,11	94,13
10:20	123	98	110,5	1,5	1,264	1,77	3,26	97,39
10:25	128	103	115,5	1,5	1,29	1,57	3,02	100,41
10:30	133	108	120,5	1,5	1,29	1,57	3,15	103,57
10:35	138	113	125,5	1,5	1,29	1,57	3,28	106,85
10:40	143	118	130,5	1,5	1,29	1,57	3,41	110,26
10:45	148	123	135,5	1,5	1,29	1,57	3,55	113,81

En la Figura se grafican los valores de I y t acumulada luego se ajustan a una ecuación potencial



t acum	I	I acum	t acum	I	I acum	t acum	I	I acum
(min)	(cm h^{-1})	(cm)	(min)	(cm h^{-1})	(cm)	(min)	(cm h^{-1})	(cm)
0			44,5	3,05	30,24	76,5	1,96	69,3
13,5	8,99	2,02	46,5	2,87	32,47	78,5	1,96	71,86
15,5	6,89	3,8	48,5	2,87	34,79	80,5	1,96	74,49
17,5	5,85	5,51	50,5	2,87	37,2	82,5	1,96	77,19
19,5	5,17	7,19	52,5	2,69	39,55	84,5	1,96	79,95
21,5	4,93	8,95	54,5	2,69	42	86,5	1,96	82,77
23,5	4,78	10,83	56,5	2,51	44,36	88,5	1,77	85,38
25,5	4,56	12,76	58,5	2,51	46,81	90,5	1,77	88,05
27,5	4,33	14,75	60,5	2,51	49,34	100,5	1,77	91,02
30,5	4,09	16,83	62,5	2,32	51,76	105,5	1,77	94,13
32,5	3,26	18,59	64,5	2,32	54,25	110,5	1,77	97,39
34,5	2,79	20,2	66,5	2,32	56,82	115,5	1,57	100,41
36,5	2,64	21,8	68,5	2,14	59,27	120,5	1,57	103,57
38,5	3,05	23,76	70,5	2,14	61,78	125,5	1,57	106,85
40,5	3,05	25,82	72,5	2,14	64,37	130,5	1,57	110,26
42,5	3,05	27,98	74,5	1,96	66,8	135,5	1,57	113,81



7. Determinación del escurrimiento superficial no encauzado.

Consiste en generar un aporte de agua mediante un aspersor o conjunto de aspersores, o recibir la lluvia en el momento de producirse, sobre una superficie de suelo delimitado por una caja generalmente rectangular, con tres lados perimetrales cerrados y un lado abierto, donde el agua no infiltrada constituye un escurrimiento superficial, que se mide proponiendo adaptaciones de distintos métodos de aforo (volumétrico, con estructuras aforadoras, etc.)

Por lo tanto, estos dispositivos permiten medir la infiltración y el escurrimiento por diferencia entre el volumen, lámina o caudal aportado y el infiltrado o escurrido. Son utilizados en Hidrología, para construir balances hídricos y en Riego, para el diseño de sistemas de aspersión.

En general con esta metodología se obtienen valores menores que con el doble anillo por dos razones fundamentales:

- la carga adicional de agua sobre la superficie del suelo (un potencial presión adicional) que incrementa la velocidad de flujo en el caso del doble anillo.
- con los simuladores de lluvia se incluye el efecto del impacto de la gota de lluvia que, en muchos suelos, puede provocar dispersión de agregados y sellado de la superficie del suelo.

Un ejemplo entre la comparación de uno y otro método es el siguiente:

Infiltrómetro	Velocidad de infiltración básica mm/h	
	Pastura sobre pastoreada con poca cubierta vegetal	Pastura en buen estado con suelo bien cubierto
Doble anillo	2.80	5.95
Simulador de lluvia	0.35	2.86

8. Escorrentía

8.1. Estimación

Los métodos de generación de la escorrentía superficial suelen estar conformados por dos procesos diferentes:

a) La determinación del escurrimiento superficial que es la diferencia entre precipitación total y la efectiva.

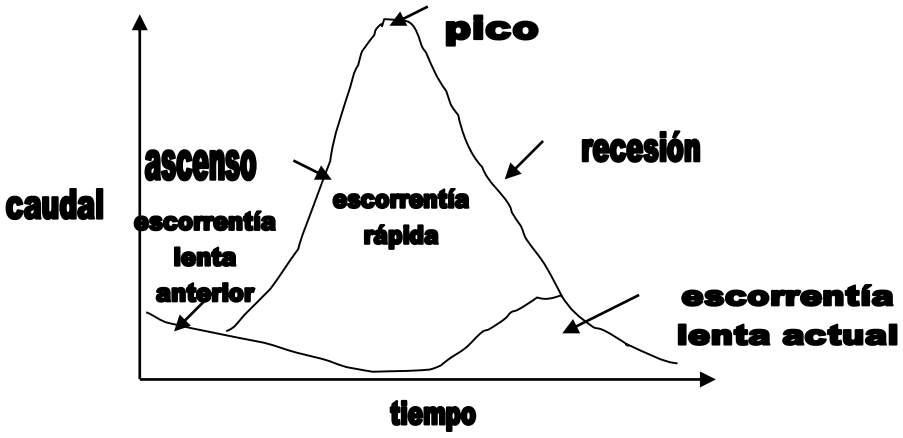
b) La conversión de este escurrimiento superficial en un caudal de avenida (crecida). Se entiende por caudal de avenida a la elevación del nivel de un curso de agua que es significativamente mayor que el flujo medio de éste.

Estos dos procesos se presentan diferenciados, de manera que pueden encontrarse diversas combinaciones de ambos. Así podemos encontrar Diagramas Unitarios (correspondientes a la fase b) hasta valores de escurrimiento superficial obtenidos por el método del Número de Curva del Soil Conservation Service del U.S. Departament of Agriculture.

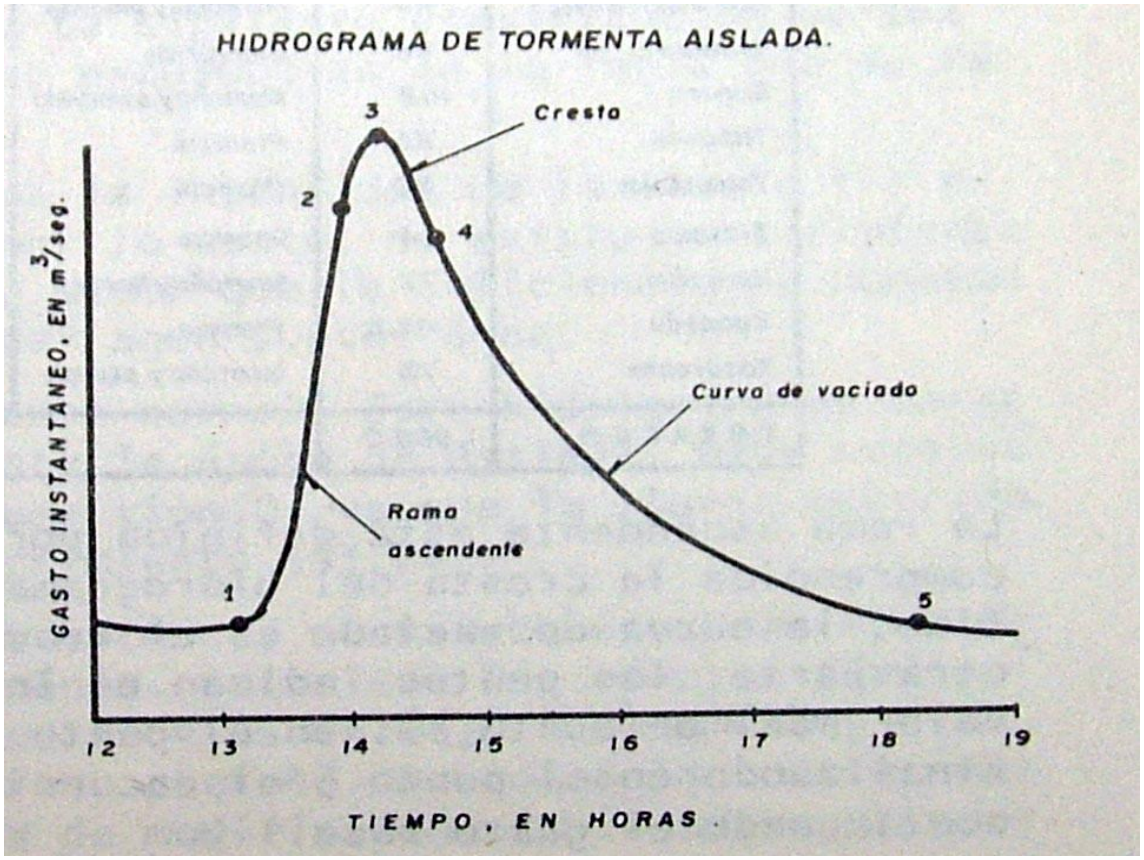
8.2. Análisis de los componentes de los hidrogramas.

Este método para la estimación de la escorrentía directa, se basa en la utilización de datos de precipitación sobre una cuenca y datos de caudales evacuados de la misma en el cauce principal.

Analizando un Hidrograma típico podemos observar que normalmente existe un caudal anterior al inicio de la precipitación, que pertenece al grupo de escorrentía lenta (escurrimiento subsuperficial); posteriormente y coincidiendo con la aparición de la precipitación, se observa un aumento del caudal, hasta alcanzar el pico de escorrentía, a partir del que se observa una curva de recesión. El área bajo la curva de escorrentía rápida representa el caudal de avenida.



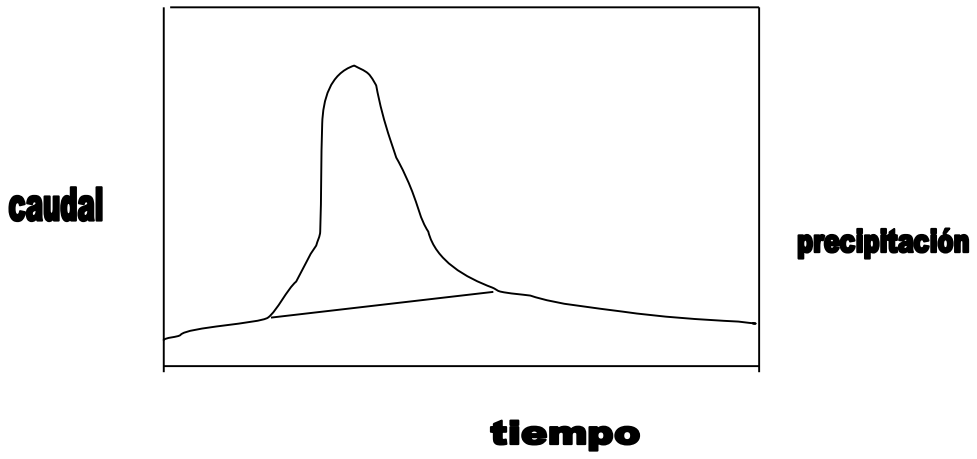
Hidrograma típico de tormenta



Porciones y puntos característicos del Hidrograma
Área bajo la curva: Volumen de escurrimiento.
Curva de concentración o rama ascendente. Domina el flujo por tierra.
Segmento de cresta o región de Qmax.
Curva de vaciado o curva de recesión. Domina el flujo en cauces.
1 Inicio del escurrimiento directo.
2 Punto de inflexión anterior al Qmax.
3 Gasto Máximo (Qmax).
4 Punto de inflexión posterior al Qmax. Cesa el flujo por tierra.
5 Final del escurrimiento directo.

En general el comienzo del escurrimiento superficial coincide con el principio de la curva ascendente.

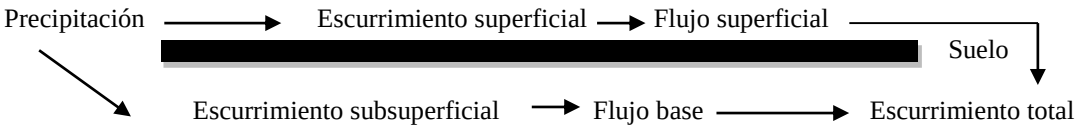
Una vez definidos los tiempos de inicio y final de la escorrentía directa, es necesario definir una forma de diferenciación entre ambos tipos de escorrentía para los tiempos intermedios, o sea unir ambos puntos mediante una línea. Para esto se traza una línea recta entre ambos puntos.



Una vez limitada la escorrentía superficial, es sencillo calcular la superficie por ella determinada, para obtener una estimación del volumen total de la precipitación efectiva, con la que obtendríamos, a su vez, el coeficiente de escorrentía. Hasta este punto solo hemos obtenido el coeficiente para una tormenta, por lo que es necesario hacer más estimaciones analizando diferentes hidrogramas correspondientes a diferentes tormentas (de distinta magnitud).

Hidrograma Unitario (HU)

El HU es un método que transforma el escurrimiento superficial y subsuperficial en escorrentía total.



El HU se define como el hidrograma del escurrimiento resultante de una lluvia unitaria efectiva generada uniformemente sobre el área de la cuenca durante un período de tiempo determinado.

Una forma generalizada de especificar el HU es definir la altura y duración de la lluvia efectiva, por ejemplo se puede hablar de un HU de 10 mm y una hora de duración. En resumen, el HU es un procedimiento de conversión de precipitaciones en caudales basados en las siguientes premisas:

1- Invarianza de la respuesta. A iguales precipitaciones, se producirán los mismos hidrogramas de escorrentía directa.
2- Superposición de respuestas. La escorrentía debida a dos o más diferentes lluvias efectivas aplicadas juntas son la suma aritmética de las escorrentías independientes, producidas por cada una de las lluvias efectivas aplicada separadamente.

8.3. Concepto de Escorrentía

La escorrentía es el agua que, procedente de la lluvia, llega a alimentar a las corrientes superficiales, continuas o intermitentes, de una cuenca.

8.4. Tipos de escorrentía

1. Escorrentía superficial

Es el agua que, procedente de la lluvia, no se infiltra en ningún momento y llega a la red de drenaje moviéndose sobre la superficie del terreno por acción de la gravedad. Corresponde a la precipitación que no queda tampoco retenida en las depresiones del suelo y que escapa a los fenómenos de evapotranspiración.

2. Escorrentía subsuperficial

Es el agua procedente de la lluvia que se infiltra y se mueve subhorizontalmente reapareciendo en la superficie en forma de manantiales.

3. Escorrentía subterránea

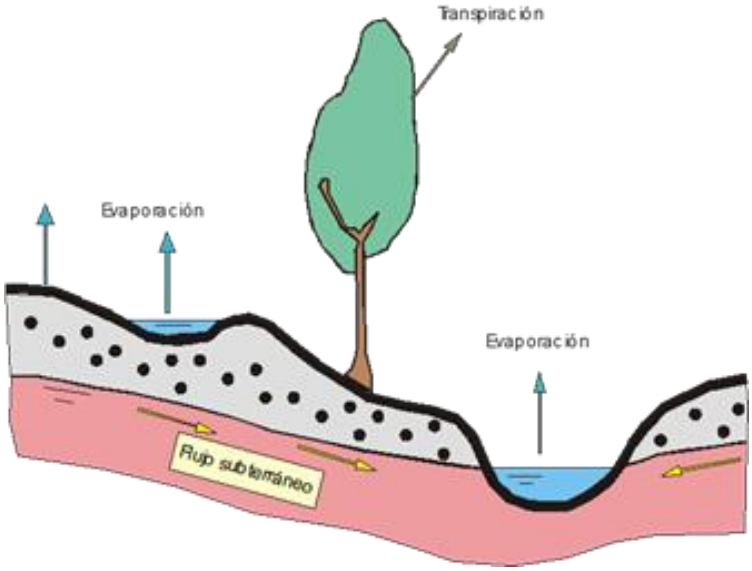
Es el agua procedente de la lluvia que se infiltra hasta alcanzar el nivel freático desde donde circula hasta la red de drenaje

8.5. Ciclo de escorrentía

Los componentes de la escorrentía evolucionan con el ritmo de las precipitaciones según un ciclo que distingue cuatro fases:

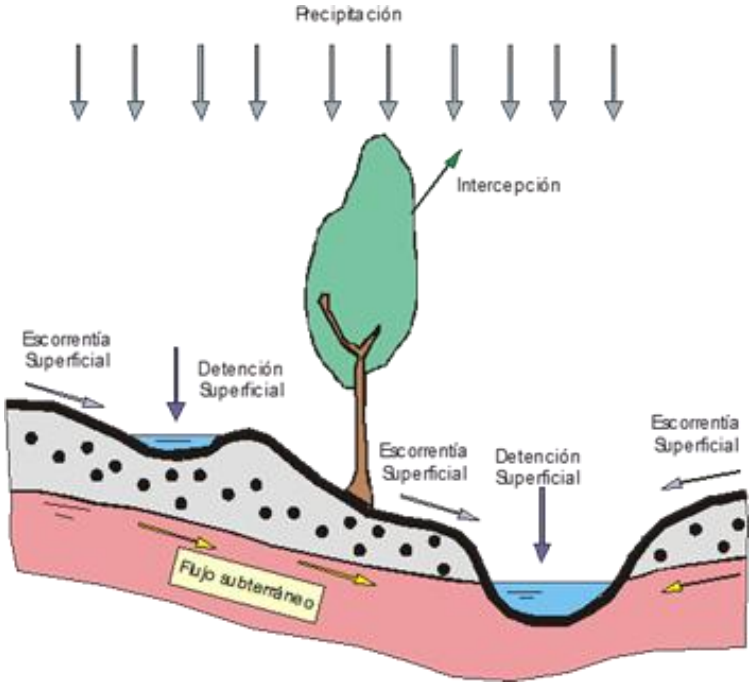
1. Primera fase: Situación inicial

Después de un período sin precipitaciones la evapotranspiración tiende a agotar la humedad existente en las capas superficiales y a extraer agua de la franja capilar. Las aguas subterráneas alimentan a las corrientes superficiales descendiendo progresivamente su nivel piezométrico.



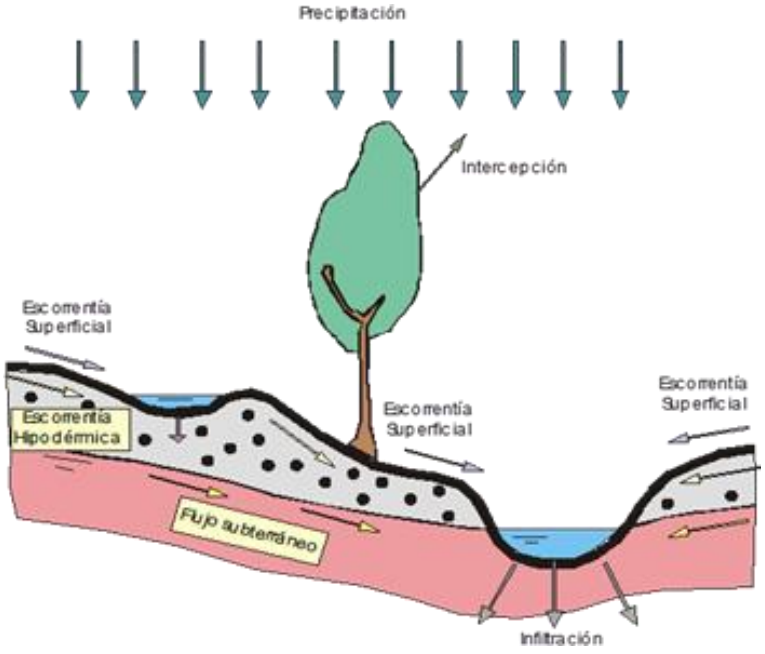
2. Segunda fase: Inicio precipitación: escurrimiento superficial.

El agua proveniente de la precipitación es interceptada por la vegetación, las superficies de agua libre, los cursos de agua y el suelo. En éste se infiltra una cantidad importante de agua que abastece su capacidad de almacenamiento; el excedente se mueve superficialmente en forma de escorrentía superficial que alimenta débilmente los cursos de agua. Continúan los aportes de las corrientes subterráneas a los cursos superficiales, no interrumpiéndose el descenso de los niveles piezométricos de la capa freática.



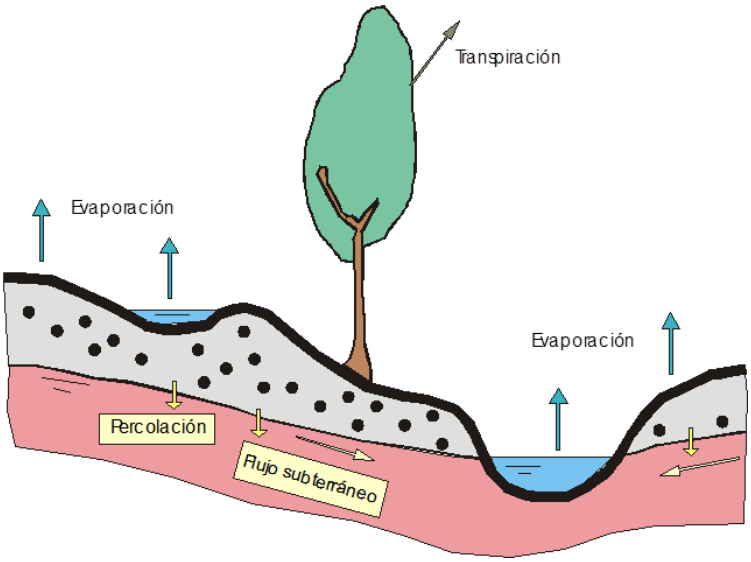
3. Tercera fase: Precipitación; escurrimiento subsuperficial.

Transcurrido un período desde el inicio de la precipitación, si la misma persiste, la cubierta vegetal apenas intercepta agua y prácticamente la totalidad de la precipitación alcanza el suelo. Las capas superficiales del suelo están saturadas. Parte de las precipitaciones se infiltran, alimentando a la escorrentía subsuperficial y a los acuíferos, originándose en éstos una elevación del nivel piezométrico. La precipitación que no se infiltra origina escorrentía superficial que en esta fase alcanza su valor máximo. La escorrentía subterránea aumenta ligeramente. La escorrentía total alcanza igualmente su máximo valor, apareciendo las crecidas.

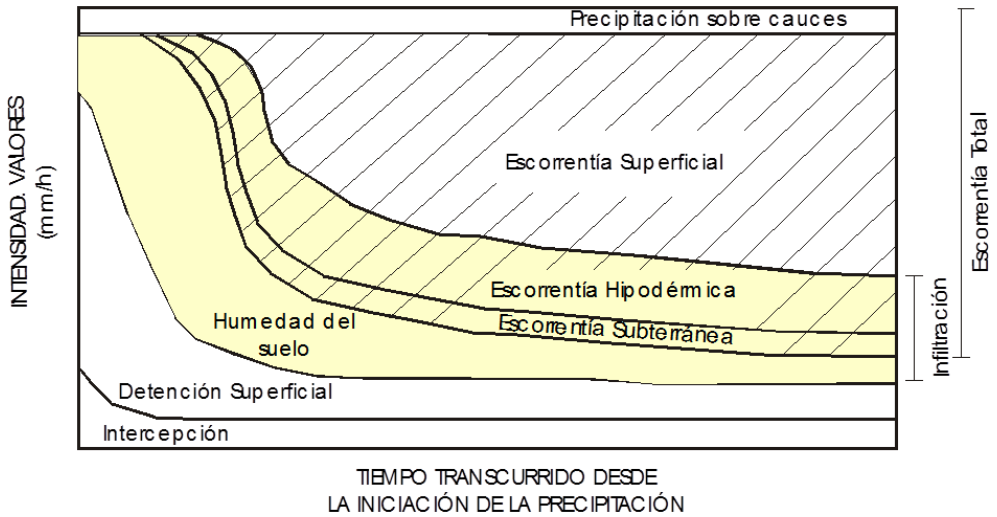


4. Cuarta fase: Posterior a la Precipitación. Percolación y flujo subtrerraneo.

La lluvia cesa y la escorrentía superficial desaparece rápidamente. El suelo y subsuelo están saturados. Continúa la Infiltración de agua que está estancada en depresiones superficiales alimentando a la humedad del suelo, a la escorrentía subsuperficial y a las aguas subterráneas. Aparece nuevamente el proceso de evapotranspiración. Los cursos de agua, alimentados únicamente por las escorrentías subsuperficial y subterránea entran en régimen de decrecida. El ciclo se cierra con la aparición de nuevo de la primera fase.



Una síntesis de la evolución de los diferentes tipos de escorrentía a medida que transcurre la precipitación y, considerando la intensidad de la misma, se puede observar en la siguiente figura:



No debemos dejar de considerar en la escorrentía de un curso de agua, la precipitación que cae directamente sobre su superficie, fracción que en la mayor parte de los casos reviste escasa importancia en relación con los restantes aportes

8.6. Factores que influyen

- Meteorológicos: precipitación, temperatura. La duración, intensidad, frecuencia, tipo y extensión de las precipitaciones tienen un papel muy importante. La temperatura es representativa de las pérdidas de evaporación.
- Geográficos: fundamentalmente la localización geográfica de la cuenca y su morfología. La localización geográfica comprende la latitud, longitud y altitud. La morfología, las pendientes de la cuenca y la importancia de las superficies de agua libre,
- Hidrogeológicos: se debe considerar la permeabilidad de los terrenos y la profundidad de las capas freáticas.
- Biológicos: comprenden fundamentalmente la cubierta vegetal y la acción humana.

8.7. Cálculo de la escorrentía.

La escorrentía superficial producida a partir de una precipitación, dependerá de los factores antes descriptos. Se puede calcular de manera directa a partir de datos de aforo o bien calculando el llamado coeficiente de escorrentía. El cálculo del coeficiente de escorrentía se puede obtener experimentalmente a través de expresiones y fórmulas, figurando muchas de ellas en tablas.

1. A partir de datos de aforos

Se basa en la hipótesis de que en la época estival el caudal de un río procede exclusivamente de la descarga que los acuíferos han realizado al mismo. Es aplicable a regiones en las cuales el período estival es un período de escasez o ausencia de lluvias, por lo cual los únicos aportes que recibe el río proceden del flujo subterráneo.

El caudal aforado en un determinado punto del cauce de un río constituye la escorrentía total del área de recepción de la cuenca. Si consideramos que la escorrentía total está constituida no sólo por la escorrentía superficial sino también por la subsuperficial y subterránea, para calcular la escorrentía superficial hay que restar al caudal aforado el valor mínimo aforado en la época estival del año hidrológico.

2. Coeficiente de escorrentía

Se denomina coeficiente de escorrentía C a la proporción de la precipitación que pasará a formar parte de la escorrentía superficial. Surge del cociente entre la escorrentía superficial provocada por una lluvia y la precipitación caída

$$C = \frac{E}{Pp}$$

El coeficiente de escorrentía no es fijo, sino que varía con el tiempo y el espacio en una misma cuenca. Una vez conocido este coeficiente, la escorrentía se calcula multiplicando dicho valor por la precipitación total. Para determinar el coeficiente de escorrentía C existen varios métodos: estimación a partir de tablas, estimación por comparación con otras cuencas cercanas y estimación de manera directa.

3. Por estimación mediante tablas:

Esta metodología se utiliza cuando no se dispone de datos suficientes para determinar la lluvia neta. El coeficiente se determina en función de las características de la cuenca. En el caso de que las características de la cuenca difieran, es decir que la cuenca tenga, por ejemplo, varios tipos de suelos o vegetación, se realizará una media ponderada de los distintos coeficientes de escorrentía en función de las áreas que ocupen cada zona. A continuación se describen algunas de las tablas que sirven para el cálculo del coeficiente de escorrentía.

- **Prevert**

Tabla 5.1. Tabla de Prevert (1986).

		Textura del suelo		
Uso del suelo	Pendiente (%)	Arenoso – limoso Limoso - arenoso	Limoso Limoso - arenoso	Arcilloso
Bosque	0 – 5	0.10	0.30	0.40
	5 – 10	0.25	0.35	0.50
	10 – 30	0.30	0.40	0.60
	>30	0.32	0.42	0.63
Pastizal	0 – 5	0.15	0.35	0.45
	5 – 10	0.30	0.40	0.55
	10 – 30	0.35	0.45	0.65
	>30	0.37	0.47	0.68
Cultivo agrícola	0 – 5	0.30	0.50	0.60
	5 – 10	0.40	0.66	0.70
	10 – 30	0.50	0.70	0.80
	>30	0.53	0.74	0.84

- **Nadal**

$$C = 0.25 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$$

siendo

K_1 = factor de la extensión de la cuenca.

K_2 = factor de la precipitación media anual.

K_3 = factor de la pendiente y de la permeabilidad del suelo.

Tabla 5.2. Factores para la fórmula de Nadal (1986).

Extensión		Lluvia media anual		Características	
Km^2	K_1	mm	K_2	Cuenca	K_3
10	2.60	200	0.25	Llana y permeable	0.5 – 0.7
20	2.45	300	0.50	Ondulada	0.5 – 1.2
40	2.15	400	0.75	Montañosa e impermeable	1.2 – 1.5
100	1.80	500	1.0		
200	1.70	600	1.1		
500	1.40	700	1.17		
1000	1.30	800	1.25		
5000	1.0	900	1.32		
10000	0.90	1000	1.40		
20000	0.87	1200	1.50		

4. Estimación por comparación con otras cuencas cercanas:

En caso de conocer valores de coeficientes de escorrentía correspondiente a cuencas de similares características hidroclimáticas y edafológicas se pueden extrapolar los coeficientes de escorrentía de estas cuencas para aplicarlos a la cuenca en estudio.

5. Método de la curva número:

El Método del Número de Curva, ha sido desarrollado por el Soil Conservation Service del departamento de Agricultura de los Estados Unidos

Parte de la hipótesis de suponer que existe proporcionalidad entre la lluvia retenida real en el terreno con respecto a la máxima capacidad que el terreno puede retener (valor potencial) y la escorrentía superficial o lluvia neta con respecto a la máxima que se puede producir, que sería la propia precipitación total en el supuesto caso de que toda la lluvia pasase a formar parte de la escorrentía superficial.

Por tanto:

$$F / S = P_n / P$$

siendo

F la retención real

S la capacidad máxima de retención inicial, o sea, es la retención potencial máxima del suelo y depende de la vegetación, de la pendiente y del tipo de suelo.

P_n la escorrentía superficial o lluvia neta

P la precipitación total

6. Caudal

Caudal máximo esperado

$$Q = \frac{1}{3.6} \cdot C \cdot I \cdot A$$

$$A = \text{área de la cuenca } (Km^2)$$

$$I = \text{intensidad del aguacero } (mm/\text{h})$$

$$C = \text{coeficiente de escorrentía}$$

$$Q = \text{caudal máximo instantáneo } (m^3/s)$$

9. Ejercicios

9.1. Sobre una melga de 0,096 Ha se vierte un caudal de 15,48 $m^3 h^{-1}$. Transcurridas dos horas treinta minutos, se recoge al pie 1,3 $l\ s^{-1}$. Cual es la velocidad de infiltración en ese momento.

9.2. Sobre una distancia de 100 m se han trazado 100 surcos de 100 m de longitud. Luego se vierte en la cabecera de cada surco un caudal de 12,6 $m^3\ h^{-1}$; al cabo de 15 minutos se recogen al final de cada surco un caudal de 2,51 $l\ s^{-1}$. Calcular la infiltración que ocurre en ese suelo cuando se vierte agua en todos los surcos simultáneamente.

9.3. En un ensayo de infiltración por surcos se obtuvieron los siguientes datos:

Tiempo 1: Qe = 2,5 $l\ s^{-1}$; Qs = 1,0 $l\ s^{-1}$

Tiempo 2: Qe = 3,5 $l\ s^{-1}$; Qs = 3,2 $l\ s^{-1}$

Siendo la longitud de los surcos de 70 m y su espaciamiento de 70 cm, calcular la infiltración en ambos tiempos y expresarla en cm h^{-1}.

9.4. Calcule la infiltración promedio Ip (cm h^{-1}) para un tiempo del proceso de infiltración de un suelo agrícola de 100 minutos, cuando la ecuación generada a partir de datos de riego es:

$$I\ (\text{cm h}^{-1}) = 120\ t\ (\text{min})^{-0,5}$$

9.5. La ecuación de velocidad de infiltración de un suelo, determinada experimentalmente ha sido

$$I\ (\text{cm h}^{-1}) = 6\ t^{-0,45}$$

Cuál es la lámina de agua aplicada en 240 minutos de riego.

9.6. Cuál es la velocidad de infiltración en cm h^{-1}, para un tiempo total de una hora, treinta minutos y cuarenta y cinco segundos.

10. Bibliografía

a) Sobre aspectos hidrológicos

Chow, Ven Te, D. Maidment y L. Mays. 1994. Hidrología aplicada. Ed. Mc Graw-Hill Interamericana SA. Colombia. ISBN: 958-600-171-7

Hydrology Handbook (2th Edition). 1996. ASCE. USA. ISBN 0–7844-0138–1.

Kite, G. W. 1988. Frecuency and risk analysis in Hidrology. Water Resources Publication USA. ISBN 0–918334–64–0.

Linsley, R., M. Kohler y J. Paulus. 1977. Hidrología para ingenieros. Ed. Mc. Graw-Hill.

Luque, J. 1980. Hidrología agrícola aplicada. Ed. Hemisferio Sur.

Monsalve Sáenz, G. 1999. Hidrología en la Ingeniería. 2da. Ed. Grupo Editor Alfaomega Colombia. ISBN 970–15–0404–6.

Remenieras, G. 1971. Tratado de hidrología aplicada. Ed. Técnicos Asociados SA.

Tucci, C. E. 1993. Hidrología: Ciencia e aplicacao. Ed. de Universidade/UFDRGS. Porto Alegre. RF de Brasil. ISBN 85–7025–298–6.

Tucci, C. E. 1998. Modelos Hidrológicos. Ed. de Universidade/UFDRGS. Porto Alegre. Rep. Fed. de Brasil. ISBN 85–7025–445–8 .

Linsley, R., M. Kohler y J. Paulus. 1977. Hidrología para ingenieros. Ed. Mc. Graw-Hill.

b) Sobre infiltración aplicada al diseño y operación de riego.

Aguilera Martínez, M. y R. Martínez Elizondo. 1983. Relaciones agua suelo planta atmósfera. Ed. Universidad Autónoma Chapingo, México.

Baver, L. 1959. Soil physics. Ed. J. Wiley & Sons. New York.

Bernardo, S. 1995. Manual de Irrigacao. ED. Univ. Federal de Vicosa. Minas Gerais.

Chambouleyron, J. 1999. Manual de Riego y Drenaje. Tomos I y II. Cuarta edición revisada. Mendoza.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Irrigation and drainage papers. Ed. FAO. Roma.

Forsythe, W. 1975. Física de suelos. IICA. Manual de Laboratorio. Ed. IICA. San José de Costa Rica.

Gavande, S. 1982. Física de suelos. Principios y aplicaciones. Ed. Limusa-Wiley. México.

Grassi, C. 1996. Diseño y operación del riego por superficie. Serie Riego y Drenaje RD 36. CIDIAT. Mérida. Venezuela. ISBN 980 - 292 - 693 - 0

Grassi, C. 1998. Fundamentos del riego. Serie Riego y Drenaje RD 38. CIDIAT. Mérida. Venezuela.

Gurovich, L. 1985. Fundamentos y diseño de sistemas de riego. Ed. IICA. Costa Rica.

Gurovich, L. 1999. Riego superficial tecnificado. Ed. Alfaomega.

Hillel, D. 1971. Soil and water. Physical principles and proceses. Ed. Acad.Press. New York.

Hillel, D. 1980. Applications of soil physics. Ed. Academic Press. New York.

Israelsen, O. y V. Hansen. 1979. Principios y aplicaciones del riego. Ed. Reverté. Barcelona.

Martín de Santa Olalla y Mañas, F. y J. De Juan Valero. 1993. Agronomía del riego. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

Tarjuelo Martín-Benito, J. 1994. El riego por aspersión y su tecnología. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.