

CAPÍTULO 4

INTERCEPCIÓN, ALMACENAMIENTO SUPERFICIAL E INFILTRACIÓN EN AMBIENTES URBANOS

Curso: HIDROLOGÍA EN MEDIOS ANTROPIZADOS

**Maestría en Recursos Hídricos de Llanura
Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario**

Dr. Ing. Civil GERARDO RICCARDI

ROSARIO, 2004.

ÍNDICE

- 4.1 INTERCEPCIÓN**
- 4.2 ALMACENAMIENTO SUPERFICIAL EN DEPRESIONES**
 - 4.2.1 Áreas Permeables e Impermeables**
- 4.3 INFILTRACIÓN**
 - 4.3.1 Infiltración en Áreas Urbanas**
 - 4.3.2 Métodos y Ecuaciones de Infiltración**
 - 4.3.2.1 Clasificación Hidrológica de suelos según Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos**
 - 4.3.2.2 Método de Horton**
 - 4.3.2.3 Método de Green y Ampt**
 - 4.3.2.4 Método del Servicio de Conservación de Suelos de EEUU**
- 4.4 BIBLIOGRAFÍA**

INTERCEPCIÓN, ALMACENAMIENTO SUPERFICIAL E INFILTRACIÓN EN AMBIENTES URBANOS

Como ya fuera descrito en el Capítulo 2 el agua que precipita en cualquier cuenca, ya fuera rural o urbana, se distribuye en determinados mecanismos hidrológicos que tienen que ver con las características propias de la cuenca.

A escala de una tormenta, siempre que sean intervalos de tiempo relativamente cortos, los procesos que forman parte del balance hídrico en una cuenca aislada son: precipitación, intercepción en follaje, almacenamiento superficial, infiltración y escurrimiento superficial (Figura 4.1) (ver Capítulo 2 punto 2.1.4). La evapotranspiración es importante en períodos prolongados pero puede despreciarse en tormentas aisladas.

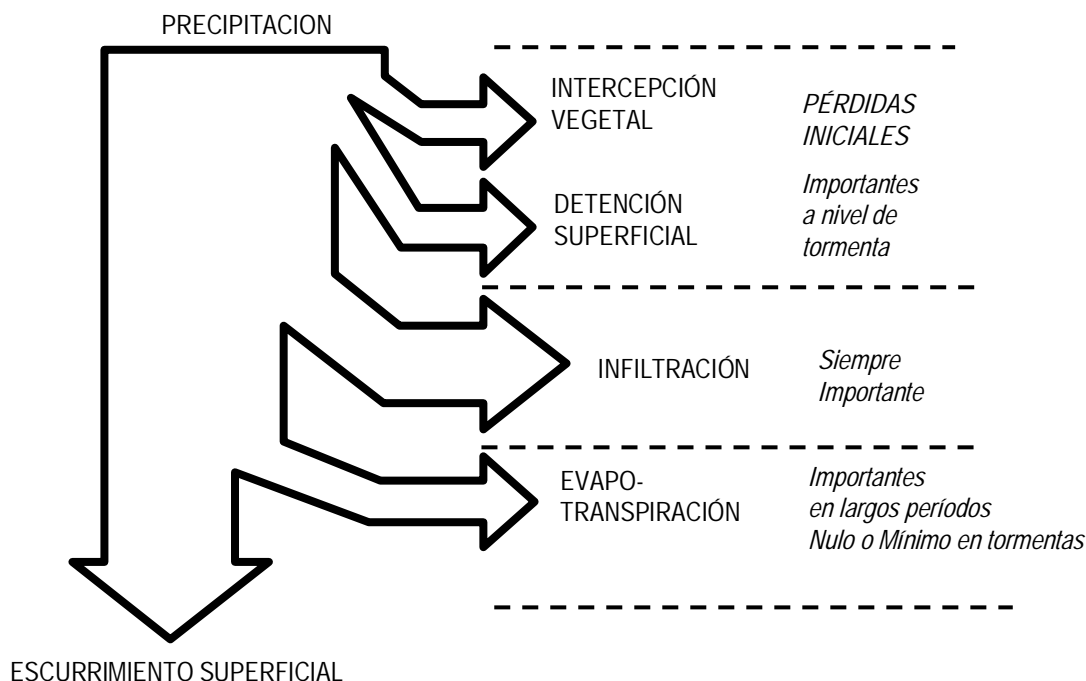


Figura 4.1. Balance Hidrológico de una Tormenta

En el estudio de la descripción de la transformación lluvia-caudal en una tormenta, los procesos de intercepción, almacenamiento superficial, e infiltración son habitualmente denominados como pérdidas de escurrimiento. Sin lugar a dudas esto es un punto de vista paradójico puesto que los volúmenes de agua involucrados en los procesos citados son de uso inmediato por parte de la vegetación y el sistema suelo o son enviados directamente a la atmósfera para estar listos para otro proceso de precipitación. Está claro que el concepto de "pérdidas" debe entenderse como aquella parte del flujo que precipita que no se transforma en escurrimiento superficial o directo (o en casos subsuperficial) pero que bajo ningún punto de vista significa pérdidas del sistema hidrológico.

Por otra parte es habitual denominar como "pérdidas iniciales" a los mecanismos hidrológicos que se manifiestan mayormente antes de que comience a surgir el escurrimiento superficial. Entre las pérdidas iniciales se suele incluir a la intercepción vegetal y al almacenamiento superficial.

4.1 INTERCEPCIÓN

La intercepción vegetal es aquella parte de la precipitación que es interceptada y almacenada temporariamente (al menos durante un tiempo con la escala temporal de la tormenta) en árboles, matorrales, arbustos, pastos, césped y cualquier tipo de vegetación. Como se señala en Capítulo 2 la inter-

cepción es el primer nivel de almacenamiento a que es sometida una fracción de la precipitación. El volumen de agua interceptado puede escurrir lentamente por goteo por ramas y troncos hasta llegar al suelo o pasar directamente a la atmósfera, pero todos estos procesos suceden mayormente con posterioridad a la finalización de la tormenta por lo que no son tenidos en cuenta en la ecuación de balance de la tormenta.

La intercepción en vegetación depende de varios factores como tipo de vegetación, estado de crecimiento, velocidad de viento, y de características de la lluvia como intensidad y duración.

Se verifica que la intercepción en vegetación en términos porcentuales respecto a la lluvia total, disminuye a medida que la lluvia total aumenta.

Una de las primeras ecuaciones para cuantificar la intercepción fue la de Horton (1919) citado por Aron (1993):

$$I_t = 25.4 [a + b (P/25.4)^n] \tag{4.1}$$

donde I_t (mm) es la intercepción, P (mm) la precipitación y a , b y n son coeficientes que dependen de la vegetación. Los valores sugeridos de a , b y n se presentan en la Tabla 4.1 y en la Figura 4.2 se grafican algunas relaciones:

Tabla 4.1. Parámetros de la ecuación de Intercepción de Horton. Fuente: Aron (1993)

Cobertura Vegetal	a	b	n
Frutales	0.04	0.18	1.00
Bosques de Fresnos	0.02	0.18	1.00
Bosques de Hayas	0.04	0.18	1.00
Bosques de Robles	0.05	0.18	1.00
Bosques de Arces	0.04	0.18	1.00
Sauces y Arbustos	0.02	0.40	1.00
Abetos y Bosques de Pinos	0.05	0.20	0.5
Chauchas, papas, repollo	0.2 h	0.15 h	1.00
Tréboles y prado de césped	0.005 h	0.08 h	1.00
Forrajes, alfalfa, etc.	0.01 h	0.10 h	1.00
Plantas de pequeños granos trigo, centeno, etc.	0.005 h	0.05 h	1.00
Maiz	0.005 h	0.005 h	1.00

Nota h es la altura de la vegetación en pies (1pie= 0.3048 m).

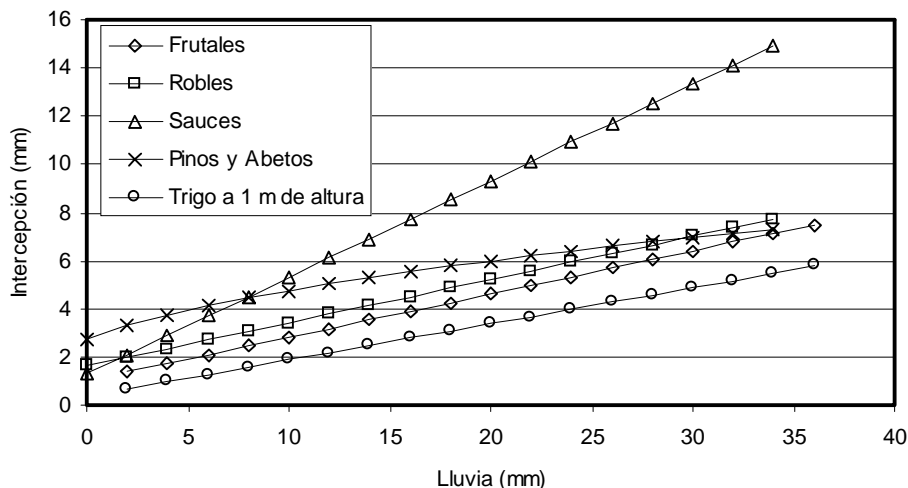


Figura 4.2. Intercepción de lluvia por algunos árboles y trigo

Puede notarse que el exponente n de la ecuación de Horton solamente es menor que 1 para abetos y pinos, en tanto que para el resto es igual a 1. Esto indicaría que la intercepción es lineal con la lluvia y que no hubiera un límite respecto al volumen que los árboles y vegetales podrían interceptar, esta relación no resulta muy lógica. De todas maneras para el rango de valores de tormentas con que fue presen-

tada la relación puede inferirse que la intercepción ha variado entre 6 a 15 mm para tormentas de 35 mm.

Otros autores como Viessman et al., (1972) citado por Bertoni et al. (1995) y Feddes (1971) citado por Ritzema (1994) y Rijtema (1965) citado por Ritzema (1994) han establecido relaciones entre la intercepción vegetal y la lluvia total donde la intercepción se explicita en términos porcentuales de la lluvia. En la Figura 4.3 se presenta la relación de Viessman et al. (1972), correspondiendo a la tendencia general del proceso de intercepción. En este caso puede inferirse que para tormenta de más de 30 mm la intercepción está en alrededor del 25% de la lámina total, lo que indica para comparar con el caso de la ecuación Horton que para una lluvia de 35 mm la intercepción sería de aproximadamente 9 mm (recordar que los valores extraídos de la ecuación de Horton están entre 6-15 mm).

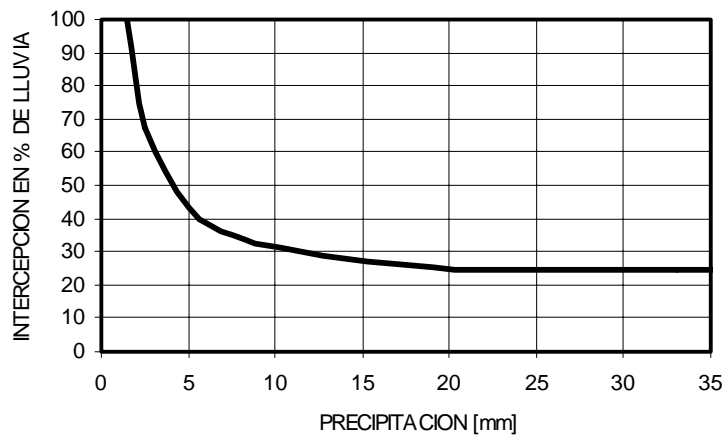


Figura 4.3. Tendencia General de la Intercepción. Fuente: Viessman et al., 1972 citado por Bertoni et al., 1995

La Figura 4.4 corresponde a la superposición de la relación encontrada por Feddes (1971) (citado por Ritzema, 1994) para una cobertura de repollo colorado y por Rijtema (1965) (citado por Ritzema, 1994) para una pequeña cobertura de pasto.

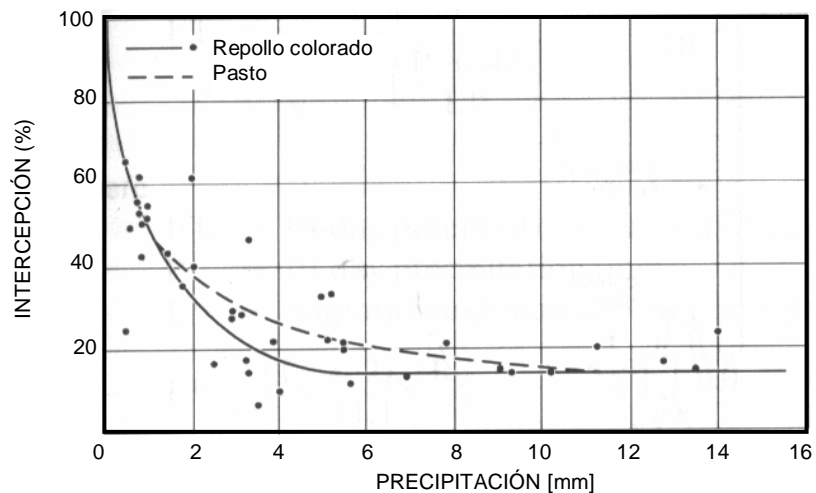


Figura 4.4. Relación entre Intercepción y Lámina de Lluvia para pastos (Rijtema, 1965 citado por Ritzema 1994) y repollo colorado (Feddes, 1971 citado por Ritzema, 1994)

Lo diferente de la relación planteada por Feddes y Rijtema respecto a lo anterior es que los autores han observado que para lluvias superiores a 10 mm el valor porcentual de la intercepción se hace aproximadamente constante en 15%, vale decir que si extrapola por ej. a 35 mm la intercepción sería del orden de 5 mm.

A los efectos del diseño un valor típico recomendado para pastos es 1.2 mm (ASCE.-WEF,1992). Cabe destacar que cuando menor sea considerada la intercepción mayor será el margen de seguridad en términos de escurrimiento superficial puesto que no se cuantificaría un mecanismo de pérdidas que real-

mente existe.

4.2 ALMACENAMIENTO SUPERFICIAL EN DEPRESIONES

El almacenamiento superficial en depresiones es aquella porción de la lluvia que queda atrapada en depresiones de la superficie de escurrimiento. Esta agua eventualmente se evapora o infiltra después de la tormenta. Linsley (1949) citado por Aron (1993) expresó el almacenamiento superficial como una función de precipitación y la capacidad de almacenamiento superficial por medio de una ecuación de decaimiento exponencial:

$$DS = S_d [1 - \exp(- K P_e)] \quad (4.2)$$

donde DS es el almacenamiento superficial, S_d es la capacidad del almacenamiento en depresiones, P_e es el exceso de precipitación determinado por la resta entre la precipitación total menos la intercepción y K es un coeficiente de almacenamiento en depresiones.

La cuantificación de S_d y K debe depender de observaciones de campo y buen juicio. Valores de 1 a 2 mm han sido habitualmente utilizados para S_d sobre superficies impermeables, dependiendo de la suavidad de la superficie, mientras que por otro lado es sumamente difícil establecer valores típicos para superficie permeables por la gran variedad de estas (Aron, 1993). Algunos autores sugieren agrupar la intercepción y el almacenamiento superficial en un solo término de abstracción inicial.

Cuando un valor de S_d es seleccionado, el factor de decaimiento debe ser elegido de modo tal que para tormentas intensas las depresiones superficiales sean sustancialmente llenadas. Un valor de $K = 0.1 \text{ mm}^{-1}$, por ejemplo, podría resultar en el llenado de aproximadamente un 99% de la capacidad de almacenamiento en depresiones disponibles para un exceso de lluvia de 50 mm (Aron, 1993).

El modelo OTTHYMO (Wisner, 1993) y el modelo AR-HYMO (Maza et al., 1993) utilizan como expresión para determinar el almacenamiento en superficies impermeables la fórmula:

$$d = 0.77 S_o^{-0.49} \quad (4.3)$$

donde d (mm) es el almacenamiento superficial en depresiones y S_o (m/m) es la pendiente media del área.

Valores típicos de almacenamiento en depresiones son 1.25-2.5 mm para superficies impermeables tales como pavimentos o techos (Tholin y Kiefer 1960 citados por ASCE-WEF, 1992), 2.5-5.1 mm para césped (Hicks, 1994 citado por ASCE-WEF, 1992), 5.1 mm para pasturas (ASCE-WEF, 1992) y 7.5 mm para bosques. Estos valores típicos son para superficies con moderada pendiente, para pendientes más planas los valores de almacenamiento superficial en depresiones serán mayores y para pendientes más empinadas serán menores.

Los valores típicos de retención de agua en depresiones sugeridos por el Método del CUHP (Colorado Urban Hydrograph Procedure) (UDFCD, 1984) se sintetizan en la siguiente tabla:

Tabla 4.2. Valores Típicos de Retención en Depresiones. Fuente: UDFCD (1967)

Cobertura de suelo	Almacenamiento superficial [mm]	Valor recomendado [mm]
Impermeable:		
Grandes áreas impermeables	1.2 - 3.8	2.5
Techos planos	2.5 - 7.6	2.5
Techos en pendiente	1.2 - 2.5	1.2
Permeables:		
Predios con césped	5.1 - 12.7	8.9
Zonas arboladas y campo abierto	5.1 - 15.2	10.1

Cuando se desea establecer el almacenamiento superficial en una zona comprendida por superficies impermeable y permeable, deben ponderarse las respectivas depresiones en función del porcentaje de área cubierta por cada tipo de superficie.

Es de fundamental importancia la estimación del porcentaje de áreas impermeables de una cuenca urbana.

4.2.1 Áreas Permeables e Impermeables

Toda la superficie de una cuenca puede ser sectorizada en áreas permeables e impermeables. La parte de área permeable de una cuenca de drenaje es aquella área donde el agua puede penetrar fácilmente en la capas superiores del suelo (infiltrar). La parte impermeable es el área en que el agua difícilmente puede y en casos es imposible, infiltrar hacia el suelo. Ejemplos de áreas impermeables son los techos, veredas, superficies pavimentadas. En hidrología urbana el porcentaje de superficie permeable e impermeable de una cuenca es un factor de suma importancia. Recordemos (ver Capítulo 1) que cuando un área se urbaniza su superficie impermeable aumenta considerablemente y la permeable disminuye. En términos de escurrimiento esto se traduce en aumento de volumen de escorrentía, aumento de caudal máximo y disminución de tiempos de llegada del caudal máximo.

En los estudios para proyectos de saneamiento pluvial urbano debe ser estimado el porcentaje de área impermeable futura. Algunas metodologías de cálculo y modelos matemáticos subdividen la zona impermeable en área impermeable directamente conectada o área impermeable efectiva y no conectada. Esta subdivisión tiene que ver con discriminar entre las superficies impermeables que drenan directamente a la red de desagües mediante rejillas de patios, bocas de tormenta en calles, etc., y las que drenan sobre áreas permeables. Está claro que la decisión por ejemplo respecto a que un techo o un patio interno sea o no una superficie directamente conectada puede transformarse en una medida no estructural de diseño domiciliario de redes pluviales, tendiente a disminuir caudales máximos y volúmenes en la red de drenaje.

Existen diversas técnicas para determinar las superficies impermeables en una cuenca y su índice de impermeabilidad. La técnica más elemental es el trabajo de campo recorriendo toda el área. Actualmente el procesamiento supervisado de fotografías aéreas y satelitales con sistemas de información geográfica constituyen una poderosa herramienta para la determinación y clasificación de todas los tipos de superficies existente en una cuenca urbana.

Algunos autores como Bertoni et al. (1995) recomiendan estudiar tendencias de áreas impermeables en función de la densidad habitacional y considerar tendencias observadas en otras regiones urbanas. En tal sentido por ejemplo Bertoni et al., (2002) publicaron la relación entre porcentaje de áreas impermeables y la densidad poblacional para diversas ciudades de Argentina y Brasil.

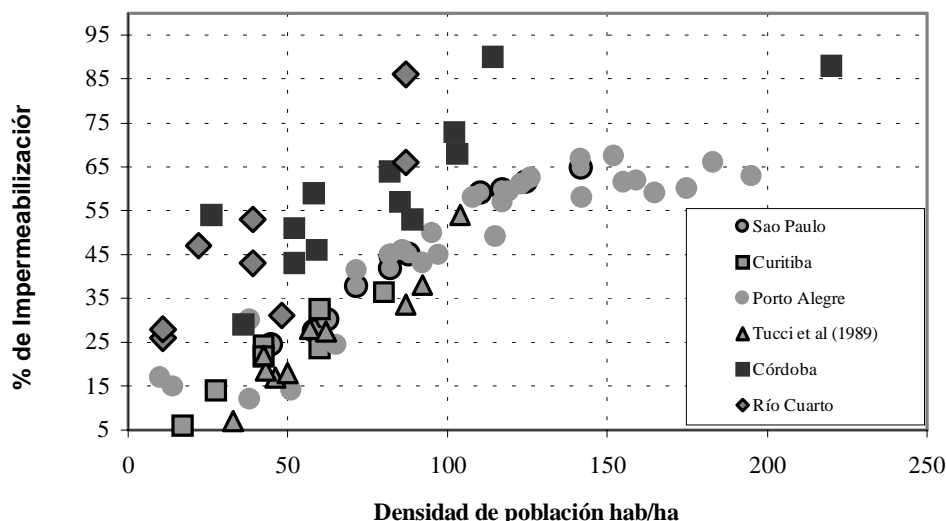


Figura 4.5. Relación entre el porcentaje de áreas impermeables y la densidad poblacional estimada para diversas ciudades de Brasil y Argentina. Fuente: Bertoni et al. (2002).

4.3 INFILTRACIÓN

La infiltración es el proceso mediante el cual se produce el pasaje de agua desde la superficie hacia el suelo. La tasa a la que se produce este pasaje tiene dimensiones de volumen en función del tiempo y si se considera un área unitaria, lámina en función del tiempo (mm/h; m/día, etc.).

Muchos factores en mayor o menor medida influyen en la tasa de infiltración: la condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal, estado del crecimiento de la vegetación (edad), temperatura ambiente, propiedades del suelo tales como tipo, granulometría, porosidad, conductividad hidráulica, composición química y el contenido de humedad presente en el suelo.

Según el UDFCD (1984) el tipo de suelo y la cobertura vegetal son los factores más importante en la determinación de la tasa de infiltración. Cuando los suelos tienen una elevada proporción de finos bien graduados, la tasa de infiltración es baja. En suelos extremadamente compactos desde el punto de vista práctico la infiltración puede considerarse nula. Si los suelos tienen varias capas u horizontes, la menos permeable de las capas controlará la máxima tasa de infiltración. La vegetación, en particular los predios cubiertos de césped tienden a incrementar la infiltración por la pérdida de suelo cerca la superficie UDFCD (1984).

Como resultado de las grandes variaciones espaciales y temporales de la capacidad de infiltración de los suelos (aún en suelos homogéneos) que cambian con el contenido de humedad de este, la infiltración se convierte en un proceso complejo que puede ser descrito por ecuaciones en forma aproximada y generalmente agregado a una escala que permita promediar las altas variaciones de capacidad de infiltración.

Al hablar de infiltración es necesario dejar en claro dos conceptos: infiltración y capacidad de infiltración. La infiltración es el volumen que realmente pasa al suelo en tanto que la capacidad de infiltración es una capacidad (máxima) potencial que tiene el suelo de permitir la incorporación y almacenamiento de agua en el caso que la disponibilidad en la superficie fuese suficiente. Cuando la lluvia es menor a la capacidad de infiltración toda el agua que cae al suelo infiltra y cuando la lluvia supera la capacidad máxima de infiltración se encharca en superficie y/o escurre. La capacidad de infiltración no es constante en el tiempo sino que decrece a medida que el volumen infiltrado aumenta, hasta alcanzar un umbral mínimo correspondiente a la infiltración para suelo saturado. Sin embargo si existe un período durante la tormenta en que la precipitación cesa o es menor que la infiltración, el suelo "recupera" capacidad de infiltración.

En superficies permeables el escurrimiento es sumamente sensible a las variaciones de infiltración. En cuencas urbanas, al aumentar la superficie impermeable (o escasamente permeable), la infiltración disminuye su importancia relativa respecto al escurrimiento en la medida en que la superficie impermeable aumenta. Asimismo, la capacidad de infiltración en cuencas rurales está fuertemente condicionada por las condiciones de humedad antecedente del suelo (lluvias anteriores o riego). Para lluvias semejantes puede producirse una notable disminución en la infiltración si la humedad antecedente del suelo pasa de ser baja (suelo seco) a alta (próximo a saturarse). En cambio en cuencas urbanas esa dependencia histórica disminuye sensiblemente al disminuir la superficie permeable de la cuenca. Es habitual que las cuencas altamente impermeabilizadas no tengan historia (o sea escasa) en lo que respecta a infiltración. Estudios en el IPH de Porto Alegre (Brasil) han mostrado que el estado antecedente de las cuencas experimentadas tiene una influencia máxima de aproximadamente 6 días sobre las pérdidas iniciales (Bertoni et al., 1995). En la Figura 4.6 se esquematiza lo dicho, donde se representa las pérdidas de escurrimiento en función de los días anteriores in llover.

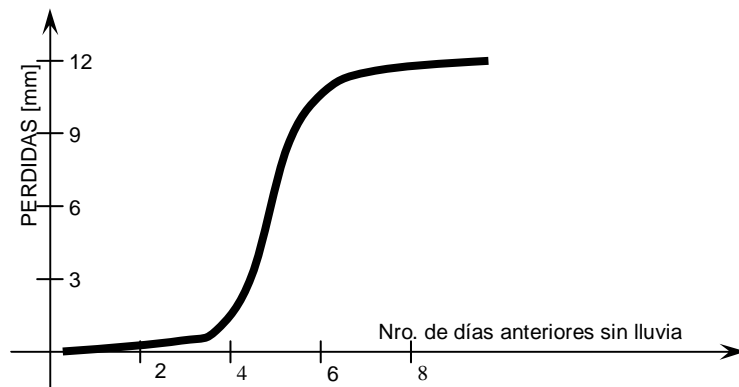


Figura 4.6. Influencia del estado de humedad antecedente en una cuenca urbana de Porto Alegre. Fuente: Bertoni et al. (1995).

4.3.1 Infiltración en Áreas Urbanas

Las formulaciones para infiltración utilizadas habitualmente en cuencas predominantemente rurales, son totalmente utilizables en las zonas permeables de las cuencas urbanas. Sin embargo, en ambientes urbanos se debe considerar además, las áreas impermeables.

Cuando se presenta una combinación de áreas permeables e impermeables en una cuenca es posible plantear abstracciones respecto a mecanismos de escurrimiento y subdivisión de superficies con características permeables e impermeables. Un algoritmo simple que se puede admitir en una cuenca urbana consiste en subdividir el área total en tres fracciones (Figura 4.7):

- Área Permeable (AP), compuesta generalmente de parques, jardines, áreas de recreación, preservación natural, etc.
- Área Impermeable (AI), comprende todas las áreas con algún tipo de cubierta que impida el ingreso del agua al suelo. A su vez el AI se subdividen en:
 - Áreas Impermeables Directamente Conectadas (AIDC), son aquellas áreas que drenan sus excedentes pluviales directamente a una red de drenaje, sin que existan pérdidas entre el punto en que la lluvia precipita y la salida de la cuenca. Este es el caso de calles pavimentadas, estacionamientos, techos conectados a la red, etc..
 - Áreas Impermeables No Conectadas (AINC), este tipo de superficies son aquellas que siendo impermeables drenan sus excedentes pluviales hacia áreas permeables posibilitando y favoreciendo condiciones de infiltración. Este es el caso por ej. de patios internos, techos que drenan hacia parques u otros espacios verdes.

En el caso del esquema de la Figura 4.7 el escurrimiento total se compone por el escurrimiento proveniente del AIDC + el escurrimiento proveniente del AP afectado de las pérdidas + el escurrimiento proveniente del AINC afectado de las pérdidas en función de las características del AP.

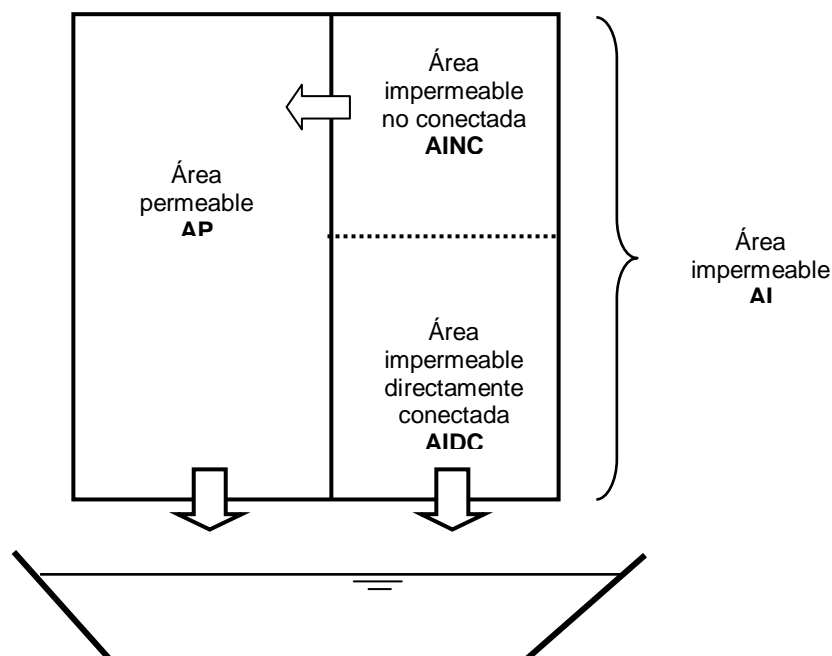


Figura 4.7. Esquema simple de la clasificación de superficies en una cuenca urbana

4.3.2 Métodos y Ecuaciones de Infiltración

Existen muchos modelos propuestos para estimar la infiltración en cuencas urbanas. Varias de las propuestas son dependientes de parámetros empíricos o dependiente de la ecuación de Darcy para flujo a través de medios porosos. Los modelos existentes varían significativamente en complejidad.

4.3.2.1 Clasificación Hidrológica de suelos según Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos

Varios de los métodos para determinar la infiltración de suelos utilizan la clasificación hidrológica de los suelos realizada por el Servicio de Conservación de Estados Unidos (Bureau of Reclamation, 1967; USSCS, 1975; Porto, 1995; Zimmermann y Orsolini, 2000). A continuación se sintetizan las características fundamentales de cada agrupamiento:

Grupo A. Son suelos con potencial de escurrimiento mínimo y capacidad de infiltración elevada. Arena profunda, suelos arenosos depositados por el viento. Bajo contenido de arcilla total inferior al 8% o ligeramente limosos. En caso de presencia de loess, este es profundo. Incluye también suelos recién arados. El tenor de humus también es pequeño, restringido al 1%.

Grupo B. Son suelos con potencial de escurrimiento bajo (algo superior a mínimo). Comprende los suelos arenosos (marga arenosa) menos profundos o medianos, y ligeramente sueltos. El tenor de arcilla debe ser menor al 15%. El tenor de humus puede subir al 1.2-1.5%. No pueden contener capas arcillosa hasta 1.5 m de profundidad. La capacidad de infiltración es superior a la media aun después de humedecidos o mojados.

Grupo C. Suelos con potencial de escurrimiento medio. Comprende los suelos francos, franco-limoso, algunos franco-arcillosos, poco profundos (margas arcillosas). El tenor total de arcilla es del orden del 20-30%. No puede contener capas de arcilla impermeable o piedras hasta 1.20 m de profundidad. La capacidad de infiltración es inferior a la media una vez mojados o humedecidos.

Grupo D. Son suelos con potencial de escurrimiento alto. Comprende la mayoría de los suelos denominados compactos o arcillosos, los rocosos de montaña y todos aquellos que presenten horizontes más o menos impermeables. Pueden contener 30-40% de arcilla total y con capas densificadas a 0.50 m de profundidad. Pueden ser arenosos en superficie como B pero con una capa inferior arcillosa cuasi-impermeable. La capacidad de infiltración es baja.

4.3.2.2 Método de Horton

Una de las expresiones más conocidas para representar el proceso de infiltración es la formulación de Horton (1939):

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-Kt} \quad (4.4)$$

donde f (mm/h) es la tasa de infiltración, f_c y f_0 (mm/h) la tasa de infiltración final e inicial, e es la base de logaritmo natural, K coeficiente de decaimiento y t (seg) tiempo.

La integral de la fórmula de Horton proporciona la infiltración acumulada F el tiempo t :

$$F(t) = f_c t + \frac{(f_0 - f_c)}{K} (1 - e^{-Kt}) \quad (4.5)$$

En el desarrollo de la ec. (4.4) Horton observó que la infiltración parte inicialmente desde un valor elevado cuando se inicia la tormenta y eventualmente decae hasta alcanzar un estado constante asociado a la saturación de los poros del suelo. Los coeficientes y valores de infiltración inicial y final corresponden a los sitios específicos de las mediciones y dependen de los suelos y el complejo de la cobertura vegetal. Es posible determinar estos valores para cada lugar en particular donde se cuente con mediciones lluvia-caudal, no obstante tal procedimiento no es práctico ni sencillo y las determinaciones están sujetas a muchas inconsistencias (Porto, 1995).

El UDFCD (1984) en función de condiciones climáticas de región semiárida y a que se ha observado que

el escurrimiento proveniente de áreas urbanas no es muy sensible a la infiltración, han propuesto trabajar dentro del distrito (Denver, Colorado, Estados Unidos) con el modelo propuesto por Horton.

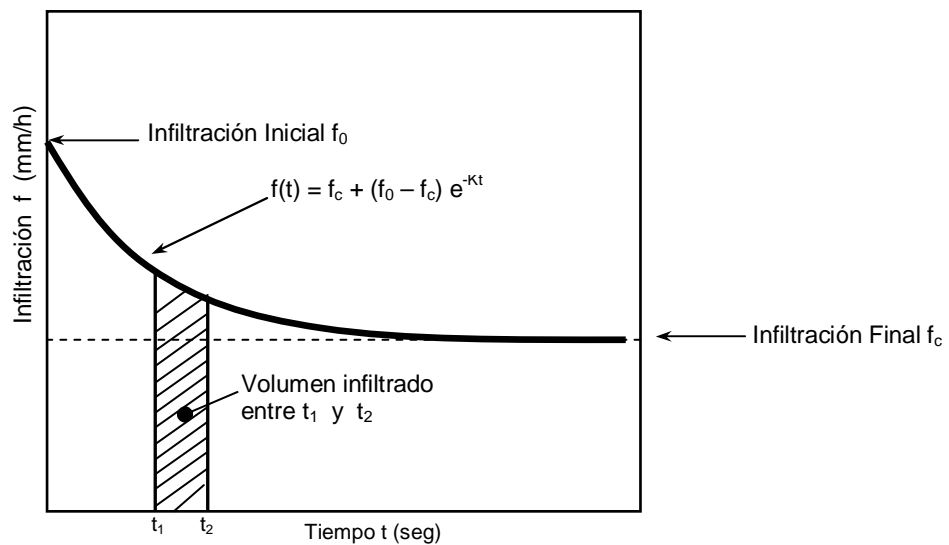


Figura 4.8. Representación de la Ecuación de Horton

El UDFCD (1984) recomienda sobre la base de mediciones en la región (Denver, Colorado, Estados Unidos), para usar dentro del Distrito los valores que se presentan en la Tabla 4.3 en conjunto con la metodología del CUPH (UDFCD, 1984). Los tipos de suelos corresponden a la clasificación de cuatro grupos hidrológicos de suelos, realizada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS).

Porto (1995) presenta valores sugeridos de los parámetros algo diferentes a los del UDFCD, en la Tabla 4.3 se presentan también los valores sugeridos por este autor.

Tabla 4.3. Parámetros recomendados por el UDFCD (1984) y sugerido en Porto (1995). Fuente: UDFCD (1984) y Porto (1995).

Clasificación Hidrológica de Suelos del SCS	Valores Sugeridos en UDFCD (1984)			Valores Sugeridos en Porto (1995)		
	Infiltración Inicial f_0 (mm/h)	Infiltración Final f_c (mm/h)	Coefficiente de Decaimiento K (1/hora)	Infiltración Inicial f_0 (mm/h)	Infiltración Final f_c (mm/h)	Coefficiente de Decaimiento K (1/hora)
A	127	25.4	2.52	250	25	2.0
B	114	15.2	6.48	200	13	2.0
C	76	12.7	6.48	130	7	2.0
D	76	12.7	6.48	80	3	2.0

Ejercicio 4.1

Calcular la lluvia excedente (que escurre) producida por una lluvia de 60 mm de 1 hora de duración, utilizando la ecuación de Horton. El suelo predominante en la cuenca es del grupo hidrológico C. El área impermeable es del 45% y el área directamente conectada es del 25%. En las horas que anteceden a la precipitación, la capacidad inicial de infiltración es $f_0 = 50$ mm/h

Datos:

- Lluvia total: $P = 60$ mm
- Intensidad de lluvia: $i = 60$ mm/h
- Área Permeable: $AP = 0.55$
- Área Impermeable Total: $AI = 0.45$
- Área Impermeable Directamente Conectada: $AIDC = 0.25$
- Área Impermeable No Conectada: $AINC = 0.20$

$$f_0 = 50 \text{ mm/h}$$

$$K = 2.0 \text{ 1/h}$$

$$f_c = 6 \text{ mm/h}$$

Solución:

a) Ecurrimiento superficial directo proveniente de AIDC:

$$\text{ESD(AIDC)} = \text{AIDC} \times P = 0.25 \times 60 \text{ mm} = \underline{15 \text{ mm}}$$

b) Ecurrimiento superficial directo originario de AINC y transferido a área permeable:

$$\text{ESD(AINC} \rightarrow \text{AP)} = 0.20 \times 60 = 12 \text{ mm}$$

c) Ecurrimiento superficial directo generado en AP:

i) Disponible para Infiltración:

$$\text{AINC} \times P + \text{AP} \times P = 0.20 \times 60 + 0.55 \times 60 = 45 \text{ mm}$$

ii) Infiltración acumulada en 1 hora

$$f(1 \text{ h}) = 6 \text{ mm/h} + (50 - 6) e^{-(1/0.5)} = 12 \text{ mm/h}$$

$$F(0 \text{ a } 1 \text{ h}) = 6 \text{ mm/h} \times 1 \text{ h} + 1/2 \text{ h} \times (50 - 6) \text{ mm/h} \times (1 - e^{-(2 \times 1)}) = 25 \text{ mm}$$

iii) Ecurrimiento superficial directo desde AP

$$\text{ESD(AP)} = 45 - 25 = \underline{20 \text{ mm}}$$

d) Ecurrimiento superficial total

$$\text{ESD(T)} = \text{ESD(AI)} + \text{ESD(AP)} = 15 \text{ mm} + 20 \text{ mm} = \underline{35 \text{ mm}}$$

Modificación de la Ecuación de Horton

La expresión de Horton es una fórmula de capacidad de infiltración, o sea, representa la lámina que infiltrará si la disponibilidad de agua es igual o mayor al valor que surgirá de ec. (4.4). Como la disponibilidad de agua estará dada por la intensidad la ec. (4.4) es solamente válida cuando $i \geq f$. Este problema tiene que ver debido a que considera la infiltración solamente función del tiempo sin tener en cuenta la variación de la capacidad de almacenamiento debido la cantidad de infiltración que va teniendo lugar a medida que progresa la lluvia. La única situación en que puede ser aplicada sin reparos la ecuación de Horton es cuando la intensidad de la lluvia (después de extraer la intercepción) supera la capacidad potencial (máxima) de infiltración en todo instante de tiempo. Vale decir, si lo representamos en un gráfico donde se superponen el hietograma de la lluvia (descontada la intercepción y el almacenamiento superficial) y la curva de Horton, las ordenada del hietograma deben estar por encima de la curva de infiltración de Horton en todo instante (Figura 4.9).

La modificación de la ecuación de Horton dio lugar a las siguientes expresiones de la infiltración acumulada y la infiltración potencial:

$$F_{t+\Delta t} = F_t + f_c + (f_t - f_c) \frac{(1 - e^{-Kt})}{K} \quad \text{si } f_t \leq i_t \quad (4.6a)$$

$$F_{t+\Delta t} = F_t + i_t \Delta t \quad \text{si } f_t > i_t \quad (4.6b)$$

donde $F_{t+\Delta t}$ es la infiltración acumulada en el tiempo $(t+\Delta t)$, F_t la infiltración acumulada en el tiempo t , f_t es la infiltración potencial en el tiempo t , f_c es la infiltración final e i_t es la intensidad de la lluvia en el tiempo t .

$$f_{t+\Delta t} = f_t - K(F_{t+\Delta t} - F_t - f_c \Delta t) \quad (4.7)$$

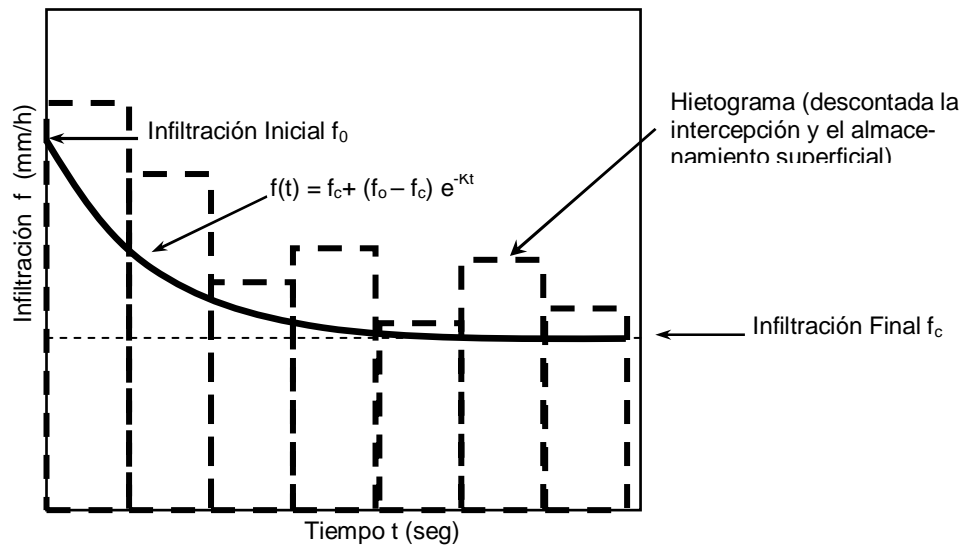


Figura 4.9. Condiciones de Aplicabilidad de Ecuación de Horton Original. Excedente de lluvia superior a capacidad de infiltración máxima en todo instante.

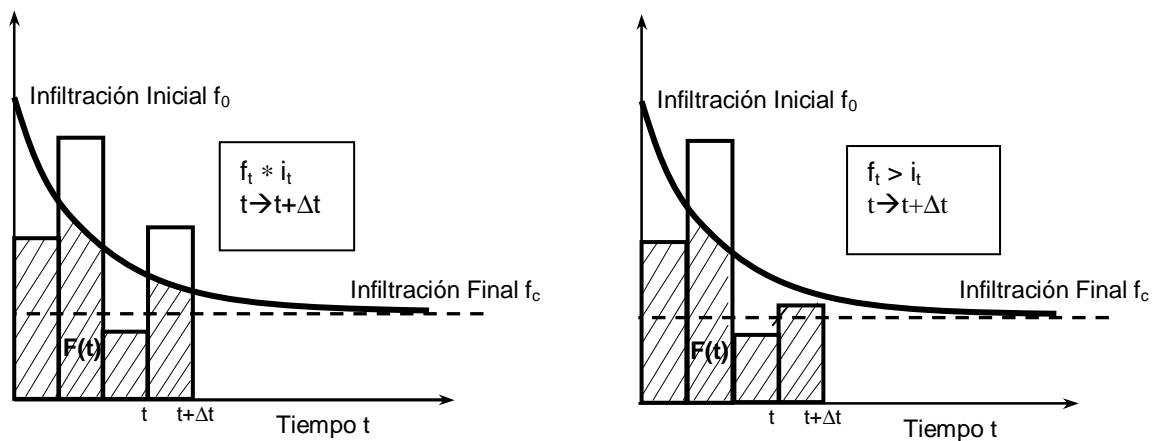


Figura 4.10. Infiltración acumulada $F(t)$ en Ecuación de Horton Modificada

La ecuación de Horton es estrictamente empírica, por lo que los valores de sus parámetros deben ser determinados mediante ajuste de la ecuación a valores observados en el campo o en ensayos de infiltrómetro de laboratorio. Los parámetros resultan ser muy sensibles a las condiciones de humedad antecedentes de los suelos. ASCE-WEF (1992) expresa que no hay procedimientos confiables para la estimación de los parámetros de la ecuación de Horton desde las características físicas del suelo o ajuste de estos valores a valores de humedad inicial del suelo o cubierta vegetal.

Ejercicio 4.2

Deducir la infiltración real aplicando la ecuación de Horton modificada en un suelo que tiene como características: capacidad de infiltración inicial $f_0 = 50$ mm/h, capacidad de infiltración final $f_c = 10$ mm/h y coeficiente de decaimiento $a = 0.50$ 1/h. El excedente de lluvia está desagregado en 7 barrotes de 0.50, teniendo como valores de intensidades : 10, 30, 5, 50, 20, 40 y 10 mm/h.

Solución: aplicando las ec. (4.7) y (4.6) se resuelve directamente en la Tabla 4.4. La secuencia tentativa del cálculo es:

- 1) Se inicia considerando $F_t = 0$ y $f_t = f_0$.
- 2) Calcular $F_{t+\Delta t}$ según ec. (4.6a) o (4.6b).
- 3) Calcular el $f_{t+\Delta t}$ según ec. (4.7).

Con los resultados calculados se pueden representar gráficamente la lluvia, la capacidad de infiltración o infiltración potencial y la infiltración real (ver Figura 4.11). Además en la figura se agregó la curva que hubiera arrojado la ecuación de Horton sin modificar (ec. 4.4). Puede observarse claramente el efecto producido por la modificación de la ecuación de Horton, cuando la infiltración real es inferior a la capacidad de infiltración el decaimiento temporal de esta última resulta más suavizado al aplicar la modificación al método. Además cuando la intensidad de lluvia no supera la infiltración mínima f_c la infiltración potencial se mantiene constante.

En este ejemplo el aplicar la ecuación de Horton original (ec. 4.4) lleva a determinar aproximadamente el doble de volumen de escurrimiento. Téngase en cuenta que el escurrimiento es aquella área que está por encima de la curva de infiltración real. La infiltración acumulada es 74.0 mm y el escurrimiento resultante es $(82.5 \text{ mm} - 74.0 \text{ mm}) = 8.5 \text{ mm}$.

Tabla 4.4. Infiltración por Ecuación de Horton Modificada. Ejercicio 4.2

t (h)	Intensidad i (mm/h)	Infiltración Acumulada F (mm)	Infiltración Potencial f (mm/h)	Infiltración Real f (mm/h)
0.00		0.0	50.0	10.0
	10			
0.50		5.0	50.0	30.0
	30			
1.00		20.0	45.0	5.0
	5			
1.50		22.5	45.0	45.0
	50			
2.00		43.0	37.3	20.0
	20			
2.50		53.0	34.8	34.8
	40			
3.00		69.0	29.3	10.0
	10			
3.50		74.0	29.3	0

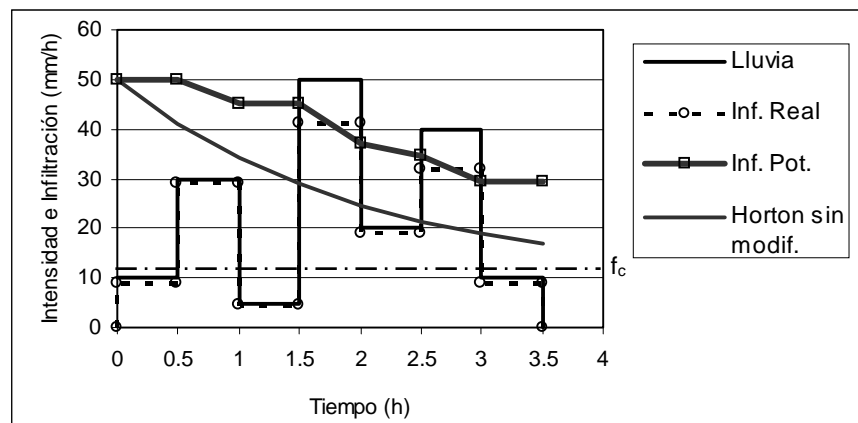


Figura 4.11. Infiltración por Ecuación de Horton Modificada. Ejercicio 4.2

4.3.2.3 Método de Green y Ampt

Este método es una teoría física simplificada del fenómeno real, que aproxima el avance de la humedad en el perfil de suelo mediante un frente húmedo (Green y Ampt, 1919 citado por Chow et al., 1994). Dicho frente es una frontera que divide el suelo con una cantidad inicial de humedad θ_i del suelo saturado con un contenido de humedad igual a la porosidad η (Figura 4.12). Para un determinado tiempo t de comenzada la infiltración el frente ha avanzado una profundidad L [m] y el agua se encharca en la superficie con una profundidad h_0 . Planteando para el movimiento vertical la ecuación de continuidad de masa y de cantidad de movimiento se arriba a una formulación para la tasa de infiltración f [m/h] y de la profundidad acumulada de agua infiltrada F [m] en función del tiempo:

$$f(t) = K \left(\frac{\psi \Delta\theta}{F(t)} + 1 \right) \tag{4.8}$$

$$F(t) = K t + \psi \Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\psi \Delta\theta} \right) \tag{4.9}$$

donde K [m/h] es la conductividad hidráulica vertical del suelo; ψ [m] es el potencial de succión del suelo en el frente húmedo y $\Delta\theta$ es la diferencia entre la porosidad y la humedad inicial $\Delta\theta = \eta - \theta_i$. La aplicación de este método requiere la estimación de ciertos parámetros, tales como la conductividad hidráulica K , la porosidad η y el potencial de succión ψ . Este último parámetro puede expresarse como una función logarítmica de una saturación efectiva S_e (Chow et al., 1994). Si se denomina θ_r a la humedad residual del suelo después de haber drenado el agua que ocupada los vacíos interconectados, la saturación efectiva S_e es la relación entre la humedad disponible $(\theta - \theta_r)$ y el máximo contenido de humedad posible denominado porosidad efectiva $\theta_e = (\eta - \theta_r)$:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\eta - \theta_r} \tag{4.10}$$

La variación de humedad del frente puede escribirse como

$$\Delta\theta = (1 - S_e) \theta_e \tag{4.11}$$

En la Tabla 4.5 se presentan los parámetros de infiltración de Green y Ampt : K , η , ψ , y θ_e para varias clases de suelos.

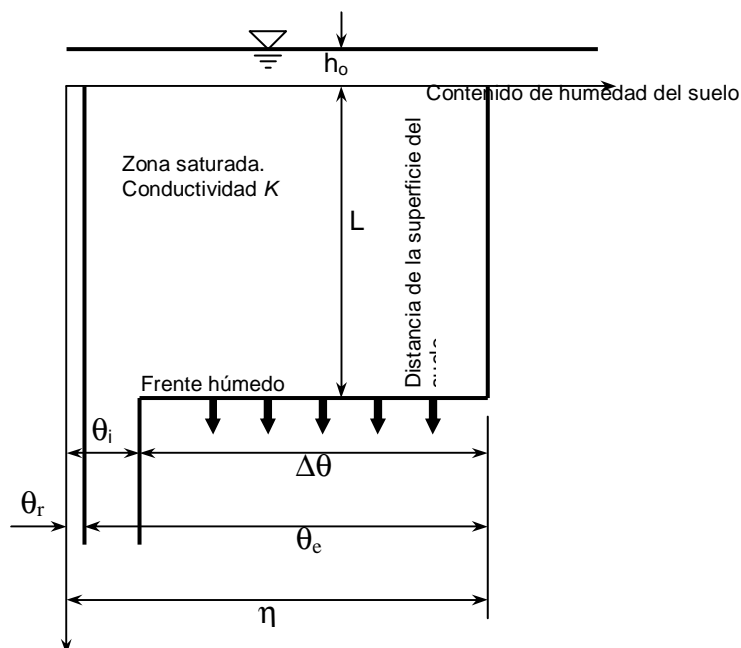


Figura 4.12. Variables en el modelo de infiltración de Green y Ampt.

Tabla 4.5. Parámetros de infiltración de Green-Ampt para varios tipos de suelos.

Fuente: Chow et al. (1994) y ASCE-WEF (1992)

CLASE DE SUELO	POROSIDAD η	POROSIDAD EFECTIVA θ_e	POTENCIAL DE SUCCION DEL SUELO EN EL FRENTE HUMEDO ψ (cm)	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA K (cm/h)	AGUA RETENIDA EN CAPACIDAD DE CAMPO	AGUA RETENIDA EN PUNTO DE MARCHITEZ
ARENA	0.437 (0.374-0.500)	0.417 (0.354-0.480)	4.95 (0.97-25.36)	11.78	0.062	0.024
ARENA MARGOSA	0.437 (0.363-0.506)	0.401 (0.329-0.473)	6.13 (1.35-27.94)	2.99	0.105	0.047
MARGA ARENOSA	0.453 (0.351-0.555)	0.412 (0.283-0.541)	11.01 (2.67-45.47)	1.09	0.190	0.085
MARGA	0.463 (0.375-0.551)	0.434 (0.334-0.534)	8.89 (1.33-59.38)	0.34	0.232	0.116
MARGA LIMOSA	0.501 (0.420-0.582)	0.486 (0.394-0.578)	16.68 (2.92-95.39)	0.65	0.284	0.135
MARGA ARENOAR-CILLOSA	0.398 (0.332-0.464)	0.330 (0.235-0.425)	21.85 (4.42-108.0)	0.15	0.244	0.136
MARGA ARCILLOSA	0.464 (0.409-0.519)	0.309 (0.279-0.501)	20.88 (4.79-91.10)	0.10	0.310	0.187
MARGA LIMOARCILLOSA	0.471 (0.418-0.524)	0.432 (0.347-0.517)	27.30 (5.67-131.50)	0.10	0.342	0.210
ARCILLA ARENOSA	0.430 (0.370-0.490)	0.321 (0.207-0.435)	23.90 (4.08-140.20)	0.06	0.321	0.221
ARCILLA LIMOSA	0.479 (0.425-0.533)	0.423 (0.334-0.512)	29.22 (6.13-139.40)	0.05	0.371	0.251
ARCILLA	0.475 (0.427-0.523)	0.385 (0.269-0.501)	31.63 (6.39-156.50)	0.03	0.378	0.265

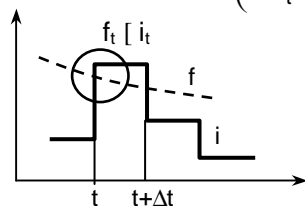
Los números entre paréntesis son el desvío estándar alrededor del valor del parámetro dado

Para la determinación de la tasa de infiltración potencial f y la lámina de precipitación acumulada infiltrada debe operarse de la manera siguiente teniendo en cuenta si existe o no encharcamiento (intensidad de lluvia > infiltración):

- se calcula F para un tiempo t según ec. (4.9)
- se calcula f para un tiempo t de acuerdo a (4.8)
- el valor de f_t se compara con la intensidad de lluvia i_t y se calcula $F_{t+\Delta t}$ pudiéndose presentar 3 situaciones:

(i) Si $f_t < i_t$ existe encharcamiento:

$$F_{t+\Delta t} = F_t + K \Delta t + \psi \Delta \theta \ln \left(\frac{F_{t+\Delta t} + \psi \Delta \theta}{F_t + \psi \Delta \theta} \right) \tag{4.12}$$



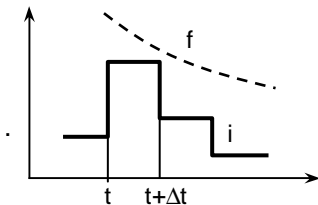
Para resolver (4.12) se puede utilizar un método iterativo proponiendo un valor inicial de $F_{t+\Delta t} = K \Delta t$.

(ii) Si $f_t > i_t$ no ocurre encharcamiento al principio del intervalo. Pero pueden presentarse dos situaciones dependiendo del valor de $f_{t+\Delta t}$: (ii1) que no haya encharcamiento en todo el intervalo ($f > i$ en todo $t \rightarrow t+\Delta t$) o (ii2) que comience el encharcamiento dentro del intervalo. En ambos casos debe calcularse tentativamente $F'_{t+\Delta t}$ y $f'_{t+\Delta t}$ y verificar que pasa dentro del intervalo. Calcular

$$F'_{t+\Delta t} = F'_t + i \Delta t \tag{4.13}$$

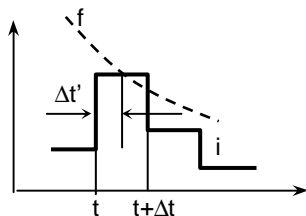
y $f'_{t+\Delta t}$ con ec. (4.8).

(ii1) Si $f'_{t+\Delta t} > i_{t+\Delta t}$



no existe inicio de encharcamiento dentro del intervalo
 $F'_{t+\Delta t} = F'_{t+\Delta t}$ y $f'_{t+\Delta t} = f'_{t+\Delta t}$

(ii2) Si $f'_{t+\Delta t} < i_{t+\Delta t}$



Se inicia encharcamiento dentro del intervalo. Debe determinarse la fracción de Δt ($\Delta t'$) donde no hay encharcamiento. La infiltración acumulada F_p en el momento del encharcamiento se encuentra al establecer $f_t = i_t$ y $F_t = F_p$ en ec. (4.8) y despejar F_p :

$$F_p = \frac{K \psi \Delta \theta}{i_t - K} \tag{4.14}$$

El tiempo al encharcamiento es entonces $t+\Delta t'$, donde:

$$\Delta t' = \frac{F_p - F_t}{i_t} \tag{4.15}$$

y la infiltración acumulada $F_{t+\Delta t}$ se encuentra sustituyendo $F_t = F_p$ y $\Delta t = \Delta t - \Delta t'$ en ec. (4.12).

En el caso en que, existiendo condiciones de encharcamiento, con un determinada profundidad del frente húmedo $L = F/\Delta\theta$, la intensidad descienda a valores inferiores a K (o se anule), para cada intervalo de tiempo siguiente se calcula la pérdida de humedad de volumen de longitud L considerando una entrada por superficie del terreno igual a $i_t \Delta t$ y una salida a una profundidad L de $K \Delta t$. Mientras se mantengan las condiciones, la humedad podrá descender hasta el valor de θ_r . Si la intensidad nuevamente se incrementa sobre el valor de K , con la humedad θ_i vuelve a plantearse el método de Green-Ampt.

Para la resolución en cada unidad espacial de análisis donde exista infiltración deben especificarse el área de infiltración, el estado de humedad inicial (θ_i o S_e) y los parámetros porosidad efectiva θ_e , potencial de succión ψ y conductividad hidráulica K .

Ejercicio 4.3

Aplicar el método de Green y Ampt para la misma lluvia del Ejercicio 4.2 que precipita sobre una marga arenosa que tiene una saturación efectiva del 35% al inicio de la tormenta.

Solución: De Tabla 4.5 se pueden extraer valores aproximados de los parámetros del suelo. Siendo marga arenosa se pueden adoptar:

K (mm/h)= 10; Potencial de Succión $X= 300$ mm; Porosidad Efectiva $\theta_e= 0.47$

La variación de humedad del frente se puede calcular según ec. (4.11):

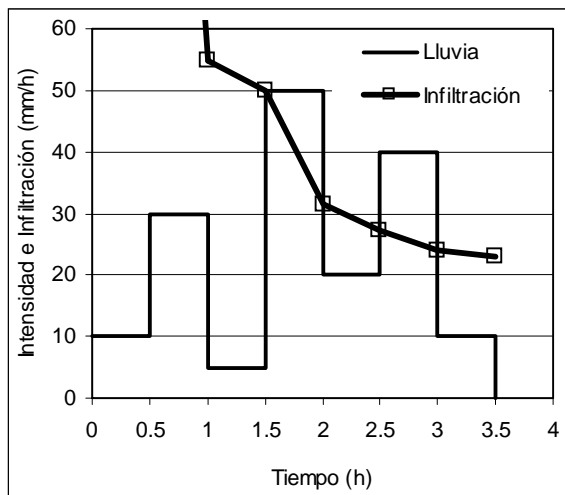
$$\Delta v = (1 - S_e) v_e = (1 - 0.35) \times 0.47 = 0.306$$

- 1) Se asume para $t = 0$ $F_0 = 0$ f_0 muy grande
- 2) Se calcula F_1 en forma iterativa con ec. (4.9) y f_1 con ec. (4.8)
- 3) Si $f_1 \leq i_1$ calcular F_2 con ec. (4.13); si $f_1 > i_1$ calcular F_2 con ec. (4.12)
- 4) para los siguientes intervalos de tiempo la secuencia es similar a 2) y 3)
 - Se calcula F_t en forma iterativa con ec. (4.9) y f_t con ec. (4.8)
 - Si $f_t \leq i_t$ calcular $F_{t+\Delta t}$ con ec. (4.13); si $f_t > i_t$ calcular $F_{t+\Delta t}$ con ec. (4.12)

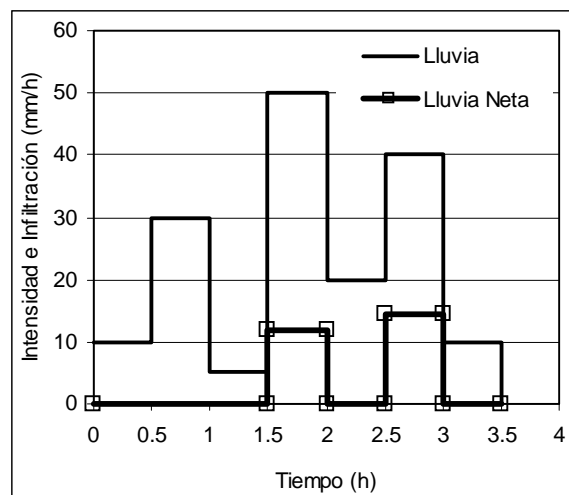
En la siguiente tabla se exponen los resultados calculados, en tanto que en la Figura 4.13 se grafican la intensidad de la lluvia total (hietograma) en conjunto con la infiltración y el hietograma de lluvia total en conjunto con el hietograma de la lluvia que escurre o hietograma neto.

Tabla 4.6. Método de Green y Ampt. Ejercicio 4.3

t (h)	Lluvia total			Infiltración			Lluvia neta	
	Por intervalo (mm)	Acumulada (mm)	i (mm/h)	F_t (mm)	f_t (mm/h)	$F_{t+\Delta t}$ (mm)	Acumulada (mm)	Intensidad en intervalo (mm)
0	0	0	10.0	0.000		5.000	0.000	
0.5	15.0	15.0	30.0	5.000	193.296	20.000	0.000	0.000
1.0	2.5	17.5	5.0	20.000	55.825	22.500	0.000	0.000
1.5	25.0	42.5	50.0	22.500	50.733	47.500	0.000	0.000
2.0	10.0	52.5	20.0	47.500	29.295	57.500	5.909	11.818
2.5	20.0	72.5	40.0	57.500	25.939	69.713	5.909	0.000
3.0	5.0	77.5	10.0	69.713	23.147	74.713	13.160	14.502
3.5	5.0	82.5	10.0	74.713	22.267		13.160	0.000
Total		82.5		74.713			13.160	



(a)



(b)

Figura 4.13. Resultados Ejercicio 4.3. (a) Intensidad de lluvia total e Infiltración; (b) Hietograma de lluvia total e Hietograma de Lluvia Neta.

4.3.2.4 Método del Servicio de Conservación de Suelos de EEUU

El Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los EEUU (USSCS, 1975) desarrolló un método ampliamente difundido para calcular mediante abstracciones las pérdidas de la precipitación en una tormenta tanto en cuencas rurales como semiurbanas y urbanas (Chow et al., 1994). La hipótesis fundamental del método consiste en la propuesta de una igualdad entre relaciones de valores reales con potenciales:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (4.16)$$

y la ecuación de continuidad

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (4.17)$$

donde F_a [m] es el agua retenida en el suelo, S [m] es la capacidad potencial máxima de retención, P [m] es la lámina total caída de precipitación, P_e [m] es la precipitación que escurre e I_a [m] es una abstracción de las pérdidas iniciales antes de comenzar el escurrimiento directo (ver Fig. 4.14). Para el método I_a representa conjuntamente la intercepción y el almacenamiento superficial.

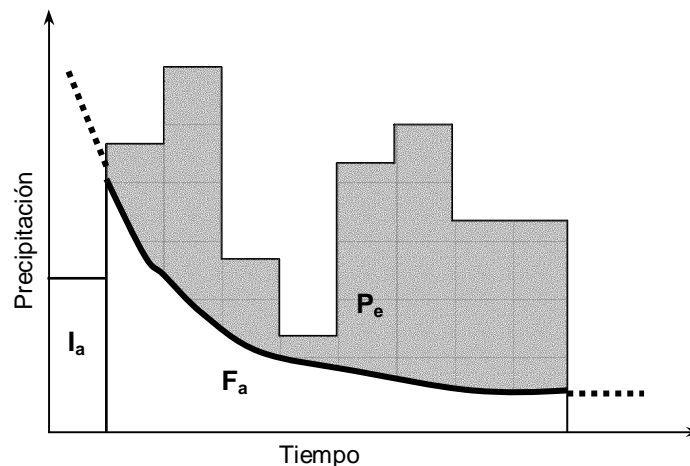


Figura 4.14. Variables en el método del SCS

Combinando (4.16) y (4.17), la formulación de la precipitación que escurre es:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a} \quad (4.18)$$

Debe destacarse sobre la alta variabilidad de I_a . Se ha verificado especialmente en cuencas rurales que la infiltración inicial I_a puede ser aproximada a $I_a = 0.2 S$, con lo cual:

$$P_e = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S} \quad (4.19)$$

Mediante múltiples mediciones en diversas cuencas de P y P_e el USSCS (1975) estableció una relación con S a través de un número adimensional CN relacionado con S , de modo que $0 < CN < 100$. La relación entre CN y S es:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4.20)$$

El número de curva o CN es el parámetro básico del método, representa las características medias del complejo hidrológico suelo-vegetación y está relacionado con el estado de humedad del suelo, el uso del suelo y las prácticas de manejo. Varía entre 0 (infinitamente permeable \rightarrow nada escurre) y 100 (total-

mente impermeable → todo escurre). El número de curva o CN proporciona una idea de la potencialidad del suelo para producir escurrimiento superficial.

El SCS ha determinado distintos valores de CN en función de:

- Tipos de suelos. Donde los suelos se han clasificado en cuatro grandes grupos A, B, C, y D (ver clasificación en punto 4.3.2.1).
- Condiciones de Uso y Ocupación
- Condición de humedad antecedente, donde se distinguen tres condiciones de humedad antecedente del suelo:

Condición I. Suelos secos, pero no en el estado de marchitez. Las lluvias en los últimos 5 días no sobrepasaron los 15 mm. No es apto para dimensionamiento de obras de control de crecidas puesto que maximiza las pérdidas, en cambio es apto para proyecto de obras de captación de aguas por ej. para consumo humano o riego.

Condición II. Situación intermedia. Humedad del suelo con valores próximos a capacidad de campo. Las lluvias en los últimos 5 días totalizaron entre 15 a 40 mm. Puede ser utilizada como condición antecedente en diseño de obras de pequeñas dimensiones. Todos los valores de tablas de CN se consideraron en esta situación media.

Condición III. Suelo húmedo (próximo a saturación). Las lluvias en los últimos 5 días fueron superiores a 40 mm, y las condiciones meteorológicas no fueron las adecuadas para lograr altas tasas de evapotranspiración. Corresponde a una situación propicia para la ocurrencia de escurrimientos superficiales importantes. Esta condición es habitualmente utilizada para el dimensionamiento de obras de control de inundaciones.

Para tener idea de valores medios de estado de marchitez y capacidad de campo de algunos suelos puede consultarse la Tabla 4.5.

Chow et al. (1994) presenta dos relaciones para determinar el CN para una condición I o III partiendo de su valor en condición II. La elección de la condición antecedente dependerá de la situación que se desea representar.

Para condiciones precedentes secas (Condición I) se define un número:

$$CN(I) = \frac{4.2 CN}{10 - 0.058 CN} \quad (4.21)$$

Para condiciones húmedas (Condición III) se define

$$CN(III) = \frac{23 CN}{10 + 0.13 CN} \quad (4.22)$$

En la Tabla 4.7 a, b y c se presentan valores de CN para condiciones de humedad antecedente medias (condición II), para suelos de zonas rurales, suburbanas y urbanas.

El USSCS (1986) presentó ábacos para calcular el CN compuesto o ponderado para cuencas constituidas por áreas permeables (AP), impermeables directamente conectadas (AIDC) e impermeables no conectadas (AINC) (Figura 4.7). Estos ábacos pueden escribirse en ecuaciones de la siguiente manera:

CN ponderado para cuencas con áreas impermeables mayores o iguales al 30% :

$$CN_{\text{compuesto}} = CN_{AP} \frac{\% AP + \% AINC}{100} + 98 \frac{\% AIDC}{100} \quad (4.23)$$

donde CN_{AP} es el número de curva correspondiente a la superficie permeable, % AP es el porcentaje de área permeable, % AINC es el porcentaje de área impermeable no conectada y % AIDC es el porcentaje de área impermeable directamente conectada. La suma de % AP+ % AINC+ % AIDC = 100%.

CN ponderado para cuencas con áreas impermeables menores al 30% :

$$CN_{\text{compuesto}} = CN_{AP} + (0.7 CN_{AP} + 29.4 - CN_{AP}) \left(\frac{\% AI}{30} \right) \left(1 - 0.55 \frac{\% AINC}{\% AI} \right) \quad (4.24)$$

donde % AI es el porcentaje de área impermeable total.

Para determinar la evolución temporal de la infiltración F_a y la precipitación que escurre P_e la ec. (4.16) puede utilizarse para cualquier tiempo t menor a la duración de la tormenta. En este caso el valor de la precipitación que se considera en ec (4.16) es el acumulado a un tiempo t : $P(t)$. El agua retenida en el suelo F_a hasta un cierto tiempo t como:

$$F_a(t) = \frac{S(P(t) - I_a)}{P(t) - I_a + S} \quad \text{si } P(t) \geq I_a \quad (4.25)$$

Cuando se utiliza esta metodología para separar el hietograma neto (lluvia que escurre superficialmente), es necesario también definir el valor final de la infiltración I_{\min} .

Infiltración Mínima

Al igual que en otras metodologías, el método del CN plantea un valor final de la infiltración cuando el suelo está saturado. Este valor mínimo se establece en función del suelo. El Bureau of Reclamation (1967) sugiere valores de infiltración mínima para los tipos de suelos hidrológicos excepto el tipo D para el cual se considera la infiltración mínima despreciable.. Los valores son los siguientes:

- Suelos tipo A $I_{\min} = 2.5$ mm/h
- Suelos tipo B y C $I_{\min} = 1.2$ mm/h

El concepto de infiltración mínima o final, como se ha observado está presente en todos los métodos (Horton, Green y Ampt, y CN). En el caso del método de Green y Ampt la I_{\min} puede asociarse a la conductibilidad hidráulica. Sin embargo existe una notable dispersión de valores de acuerdo al método, por ej. si consideramos un suelo mayormente arenosos el método de Horton sugiere considerar una $I_{\min} = 25, 4$ mm/h, Green y Ampt entre 30-120 mm/h y el método del CN 2.54 mm/h. En el otro extremo para suelos tipo D, el método de Horton sugiere considerar hasta 12.7 mm/h, en tanto que Green y Ampt (para una arcilla) sugiere 0.30 mm/h y el método del CN sugiere infiltración mínima nula.

Limitaciones de Método del CN

- El número de curva CN describe condiciones medias que son utilizadas para propósitos de diseño.
- La ecuación no contiene una expresión de tiempo, no teniendo en cuenta la intensidad y duración de la lluvia.
- La pérdida inicial I_a está basado en informaciones agrícolas. Un error de consideración puede subestimar o sobreestimar las pérdidas iniciales.

Tabla 4.7.a. Números de curva para áreas urbanas y suburbanas (condición de humedad antecedente II la = 0.2 S). Fuente: USSCS (1986)

DESCRIPCION DE LA COBERTURA		GRUPOS HIDROLOGICOS DEL SUELO			
		A	B	C	D
TIPO DE COBERTURA Y CONDICIÓN HIDROLÓGICA		A	B	C	D
AREAS COMPLETAMENTE DESARROLLADAS					
Espacios abiertos: parques, césped, campos de golf, cementerios, etc.:					
	Condición pobre (cobertura pasto<50%)	68	79	86	89
	Condición media (cobertura pasto 50% a 75%)	49	69	79	84
	Condición óptima (cobertura pasto>75%)	39	61	74	80
Áreas impermeables:					
	Estacionamientos pavimentados, techos, accesos	98	98	98	98
Calles y carreteras:					
	Pavimentados con cunetas y desagües pluviales	98	98	98	98
	Pavimentados con zanjas a cielo abierto	83	89	92	93
	Grava	76	85	89	91
	Tierra	72	82	87	89
Distritos urbanos:					
	Porcentaje promedio impermeable (*)				
	Áreas comerciales 85	89	92	94	95
	Áreas industriales 72	81	88	91	93
Distritos Residenciales:					
	Áreas promedio de lote				
	Porcentaje promedio impermeable (*)				
	500 m ² o menos 65	77	85	90	92
	1000 m ² 38	61	75	83	87
	1350 m ² 30	57	72	81	86
	2020 m ² 25	54	70	80	85
	4040 m ² 20	51	68	79	84
	8100 m ² 12	46	65	77	82
AREAS URBANAS EN DESARROLLO					
	Áreas jerarquizadas (zona permeable)	77	86	91	94

(*) Las áreas impermeables se consideran directamente conectadas a los sistemas de desagües pluviales, considerando un CN=98, y las áreas permeables son consideradas equivalentes a espacios abiertos con condición hidrológica óptima.

Tabla 4.7.b. Números de curva para áreas rurales cultivadas (condición de humedad antecedente II Ia= 0.2 S). Fuente: USSCS (1986)

DESCRIPCION DE LA COBERTURA			GRUPOS HIDROLOGICOS DEL SUELO			
TIPO DE COBERTURA	TRATAMIENTO	CONDICION HIDROLOGICA	A	B	C	D
BARBECHO	Suelo desnudo	-----	77	86	91	94
	Suelo con residuo de cosecha (RC)	Pobre	76	85	90	93
		Optima	74	83	88	90
TIERRA SEMBRADA	Surcos Rectos (SR)	Pobre	72	81	88	91
		Optima	67	78	85	89
	SR + RC	Pobre	71	80	87	90
		Optima	64	75	82	85
	Nivelada (N)	Pobre	70	79	84	88
		Optima	65	75	82	86
	N + RC	Pobre	69	78	83	87
		Optima	64	74	81	85
	Nivelada y con terraceo (N&T)	Pobre	66	74	80	82
		Optima	62	71	78	81
	N&T + RC	Pobre	65	73	79	81
		Optima	61	70	77	80
PEQUEÑOS GRANOS	SR	Pobre	65	76	84	89
		Optima	63	75	83	87
	SR + RC	Pobre	64	75	83	86
		Optima	60	72	80	84
	N	Pobre	63	74	82	85
		Optima	61	73	81	84
	N + RC	Pobre	62	73	81	84
		Optima	60	72	80	83
	N&T	Pobre	61	72	79	82
		Optima	59	70	78	81
	N&T + RC	Pobre	60	71	78	81
		Optima	58	69	77	80

La condición hidrológica está basada en la combinación de los factores que afectan la infiltración y escurrimiento, tales como: a) densidad y follaje de áreas con vegetación, b) cantidad de cobertura durante el año, c) cantidad de pastizales o sembrados en rotación, d) porcentaje de residuos de cosecha, e) grado de rugosidad de la superficie.

Tabla 4.7.c. Números de curva para otras áreas rurales (condición de humedad antecedente II la= 0.2 S). Fuente : USSCS (1986)

DESCRIPCION DE LA COBERTURA		GRUPOS HIDROLOGICOS DEL SUELO			
TIPO DE COBERTURA	CONDICION HIDROLOGICA	A	B	C	D
PASTIZALES	Pobre	68	79	86	89
	Media	49	69	79	84
	Optima	39	61	74	80
BAJOS CERCANOS A RIOS		30	58	71	78
ZONAS DE MATORRALES CON PASTOS	Pobre	48	67	77	83
	Media	35	56	70	77
	Optima	30	48	65	73
ZONAS DE BOSQUES CON PASTOS	Pobre	57	73	82	86
	Media	43	65	76	82
	Optima	32	58	72	79
BOSQUES	Pobre	45	66	77	83
	Media	36	60	73	79
	Optima	30	55	70	77

Secuencia de Cálculo.

En general la aplicación del Método del CN para la determinación de la precipitación total que escurre comprende las siguientes etapas:

- 1) Determinación de las zonas hidrológicamente semejantes en la cuenca. Agrupamiento según grupos hidrológicos de suelos A, B, C o D. Suelos permeables, impermeables, no conectados o directamente conectados.
- 2) Determinación de CN para una condición media (II)
- 3) Transformación de CN para condición de humedad antecedente deseada I o III o intermedias.
- 4) Ponderación areal de CN.
- 5) Determinación de Capacidad máxima potencial de infiltración S (ec. 4.20)
- 6) Determinación de precipitación neta Pe (ec. 4.19)
- 7) Definición de Hietograma de lluvia neta

Relaciones Sugeridas entre Método de Green y Ampt y del CN

Algunos autores, entre ellos Porto (1995) sugieren ciertas correspondencias entre los parámetros de Green y Ampt y el CN. En la Tabla 4.7 se presenta la correspondencia entre números CN y los parámetros potencial de succión ψ y conductibilidad hidráulica vertical en medio saturado K.

Tabla 4.8. Correspondencia entre CN y parámetros de Green y Ampt. Fuente: Porto (1995)

CN	K (mm/h)	ψ (mm)
100		
95	0.40	11.2
90	0.80	22.4
85	1.20	33.6
80	1.60	44.9
75	2.00	54.9
70	4.00	40.5
65	6.00	35.8
60	7.90	29.1
55	9.90	25.0
50	11.80	22.2
45	13.80	20.3
40	15.70	18.9

Ejercicio 4.4

Calcular el CN medio de una cuenca con un área de drenaje de 3 km², siendo 2 km² de suelo tipo B y 1 km² con suelo tipo C. El uso y ocupación del suelo son los siguientes:

Fracción de 2 km² con suelo B:

- 0.30 km² de rutas pavimentadas y estacionamientos → CN = 98
- 1.10 km² uso residencial, lotes de 500 m² → CN = 85
- 0.60 km² áreas comerciales → CN = 92

Fracción de 1 km² con suelo C:

- 0.20 km² áreas residenciales, lotes de 1000 m² → CN = 83
- 0.30 km² parques y jardines en buenas condiciones → CN = 74
- 0.40 km² áreas preservadas (bosques en buenas condiciones) → CN = 73
- 0.10 km² rutas pavimentadas y estacionamiento → CN = 98

Solución: el valor del CN ponderado es

$$CN_{\text{área total}} = (0.3 \times 98 + 1.1 \times 85 + 0.6 \times 92 + 0.20 \times 83 + 0.3 \times 74 + 0.4 \times 73 + 0.1 \times 98) / 3 = \underline{85.3}$$

Un alternativa podría ser estimar las áreas impermeables y permeables en cada fracción

Fracción de 2 km² con suelo B:

- 1.50 km² de superficie impermeable → CN = 98
- 0.50 km² de superficie permeable con pasto o césped → CN = 61

Fracción de 1 km² con suelo C:

- 0.15 km² de superficie impermeable → CN = 98
- 0.85 km² de superficie permeable con pasto o césped → CN = 74

$$CN_{\text{área total}} = (1.5 \times 98 + 0.5 \times 61 + 0.15 \times 98 + 0.85 \times 74) / 3 = \underline{85}$$

Ejercicio 4.5

En una cuenca urbana de la región se desean estimar las pérdidas de escurrimiento superficial. La distribución aproximada areal de la cobertura y usos del suelo es la siguiente:

Zona de Pastizales con cobertura media:	15%
Zona residencial con 65% de área impermeable:	40%
Zona impermeables (calles, techos, estac.):	10%
Zona Industrial:	15%
Zona comercial:	5%
Espacios abiertos con cobertura media :	15%

Todo el suelo de la cuenca puede clasificarse como tipo C . La precipitación total de la tormenta es de 90,36 mm (Ejercicio 3.8, Unidad 3) y debe tenerse en cuenta que llovió todo el día anterior. Utilizando el método del CN determinar las pérdidas iniciales y por infiltración en dicha tormenta.

Solución:

Cálculo del CN en condición media II ponderado arealmente:

Zona de pastizales	0.10	x	79
Zona Residencial	0.45	x	90
Impermeable	0.10	x	98
Zona Industrial	0.15	x	91
Zona Comercial	0.05	x	94
Espacios abiertos	0.15	x	79

$$CN_{II} = 88.40$$

Si llovió el día anterior → condición inicial III de ec. (4.22): $CN_{III} = (23 - 88.40) / (10 + 0.13 \times 88.40) = \underline{94.6}$

Capacidad Máxima de almacenamiento del Suelo S de ec. (4.20): $S = 25400 / 94.6 - 254 = \underline{14.5 \text{ mm}}$

Pérdida Iniciales I_a = 0.20 S: $I_a = 2.9 \text{ mm}$

Escurrimiento directo (ec. (4.19)): $Q = (90.36 - 2.9)^2 / (90.36 + 0.8 \times 14.5) = \underline{75 \text{ mm}}$

Distribución Temporal de la Lluvia neta generada por el Método del CN

Hasta lo aquí expuesto en relación al método del CN solo se puede calcular la precipitación que escurre o precipitación neta P_e (de ec. 4.18) y la infiltración acumulada F_a (de ec. 4.17) al final de la lluvia. Pues bien, Chow et al. (1994) entre otros, plantea como válida la abstracción de P_e y F_a para cualquier tiempo durante la tormenta, vale decir que en cada instante de tiempo desde el inicio hasta el final de lluvia puede emplearse el método del CN para la determinación de los acumulados parciales de la lluvia neta y la infiltración. Para todo instante donde el valor acumulado parcial de lluvia de lluvia $P(t) \geq I_a$ la $P_e(t)$ puede calcularse mediante ec. 4.18 y $F_a(t)$ mediante ec. (4.17).

Ejercicio 4.6

En la lluvia y cuenca planteada en Ejercicio 4.5, determinar el hietograma de lluvia neta o hietograma neto. Recordar (de Ejercicio 3.8 Unidad 3) que la lluvia total de 90.36 mm se compone de 10 barrotes de 12 min de duración en los cuales los acumulados en cada barrote en mm eran los siguientes: 5.61; 8.27; 10.85; 26.93; 15.62; 6.68; 4.84; 4.27; 3.82; y 3.46.

Construir, además, el hietograma neto correspondiente a una situación de sequía.

Solución: Considerando desde Ejercicio 4.5 $CN_{III} = 94.6$, $S = 14.5$ mm e $I_a = 2.9$ mm. Se calcula la precipitación neta acumulada $P_e(t)$ mediante ec. (4.18) y la infiltración acumulada mediante ec. (4.17) directamente en Tabla 4.9 :

CN en condición III:

Tabla 4.9. Determinación de Hietograma Neto mediante Método CN condición III. Ejercicio 4.6 (a)

t (min)	Lluvia total			Infiltración		Lluvia neta	
	Por intervalo (mm)	Acumulada (mm)	i (mm/h)	F_a (mm)	Tasa de Infiltr. (mm/h)	Acumulada (mm)	Parcial (mm)
0	0	0	0	0.00		0.00	
12	5.61	5.61	28.05	2.28	11.42	0.43	0.43
24	8.27	13.88	41.35	6.25	19.82	4.73	4.31
36	10.85	24.73	54.25	8.71	12.32	13.12	8.39
48	26.93	51.66	134.65	11.18	12.32	37.58	24.47
60	15.62	67.28	78.10	11.83	3.29	52.55	14.96
72	6.68	73.96	33.40	12.04	1.04	59.02	6.47
84	4.84	78.8	24.20	12.17	0.66	63.73	4.71
96	4.27	83.07	21.35	12.28	0.52	67.89	4.17
108	3.82	86.89	19.10	12.36	0.43	71.63	3.73
120	3.46	90.35	17.30	12.44	0.36	75.01	3.39

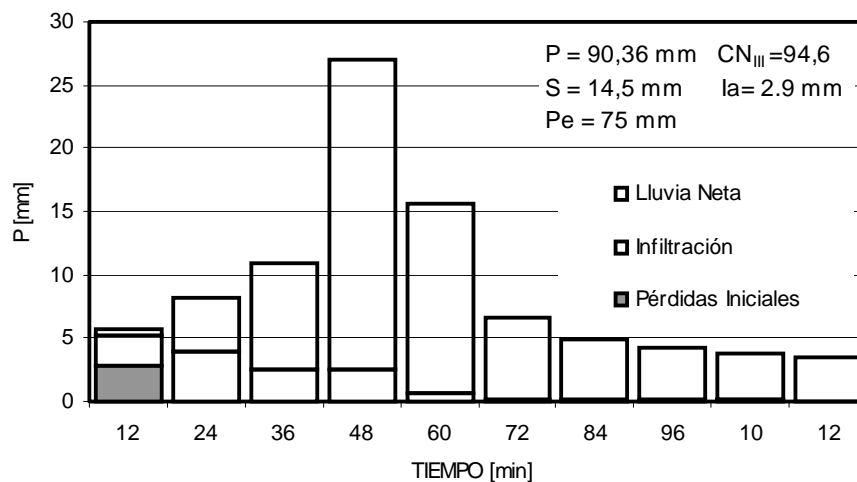


Figura 4.15. Hietograma de Lluvia Neta. CN condición III. Ejercicio 4.6 (a)

CN en condición I:

$$\text{De ec. (4.21) } CN_I = (4.2 \cdot 88.4) / (10 - 0.058 \cdot 88.4) = 76.2$$

$$S = 25400 / 76.2 - 254 = 79.3 \text{ mm}$$

$$I_a = 0.2 \cdot 79.3 = 15.9 \text{ mm}$$

Tabla 4.10. Determinación de Hietograma Neto mediante Método CN. Ejercicio 4.6 (b)

t (min)	Lluvia total			Infiltración		Lluvia neta	
	Por intervalo (mm)	Acumulada (mm)	i (mm/h)	F _a (mm)	Tasa de Infiltr. (mm/h)	Acumulada (mm)	Parcial (mm)
0	0	0		0.00		0.00	
12	5.61	5.61	28.05	0.00	0.00	0.00	0.00
24	8.27	13.88	41.35	0.00	0.00	0.00	0.00
36	10.85	24.73	54.25	7.97	39.86	0.89	0.89
48	26.93	51.66	134.65	24.67	83.46	11.13	10.24
60	15.62	67.28	78.10	31.20	32.66	20.22	9.09
72	6.68	73.96	33.40	33.54	11.70	24.56	4.34
84	4.84	78.8	24.20	35.09	7.79	27.84	3.28
96	4.27	83.07	21.35	36.38	6.45	30.82	2.98
108	3.82	86.89	19.10	37.47	5.46	33.55	2.73
120	3.46	90.35	17.30	38.42	4.71	36.07	2.52

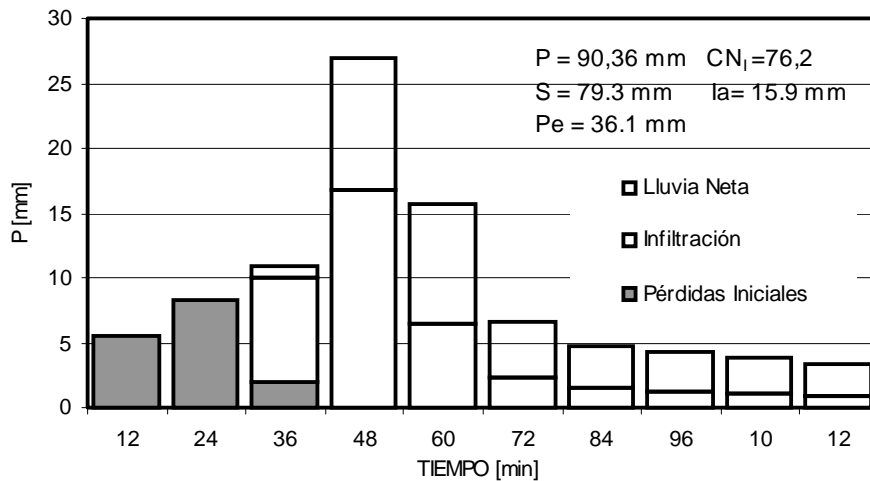


Figura 4.16. Hietograma de Lluvia Neta. CN condición I. Ejercicio 4.6(b)

4.3.2.5 Análisis preliminar de Efectos de Urbanización a través del Método del CN

El método del CN puede ser utilizado para determinar el aumento de volumen de escurrimiento en una determinada superficie a sufrir un proceso de urbanización y por ende impermeabilización.

Supongamos que una determinada cuenca está compuesta mayormente por un suelo hidrológico tipo C y en sus estado inicial no tiene superficies impermeables significativas.

Para una condición media el CN en un suelo C con una superficie con buena cubierta de pastizales puede ser estimado en $CN_{II \text{ área natural}} = 74$, en tanto que al ser impermeabilizado el número puede llegar a $CN = 98$ en la superficie impermeable.

Si consideramos una lluvia de 60 mm para el análisis, podremos relacionar el aumento del escurrimiento en la medida en que crecerá la impermeabilización. Se puede utilizar un CN ponderado en función del peso de cada superficie: $CN = \% AI \cdot CN_{AI} + \% AP \cdot CN_{AP}$

Considerando distintos porcentajes de impermeabilización desde 0 → 100% se pueden determinar los distintos CN y las respectivas lluvias netas asociadas.

Los valores resultantes se pueden grafican en la Figura 4. 17, donde se representa el porcentaje de área

impermeable en función de las veces en que se aumenta el volumen de escurrimiento respecto a un estado inicial de la cuenca natural (CN = 74).

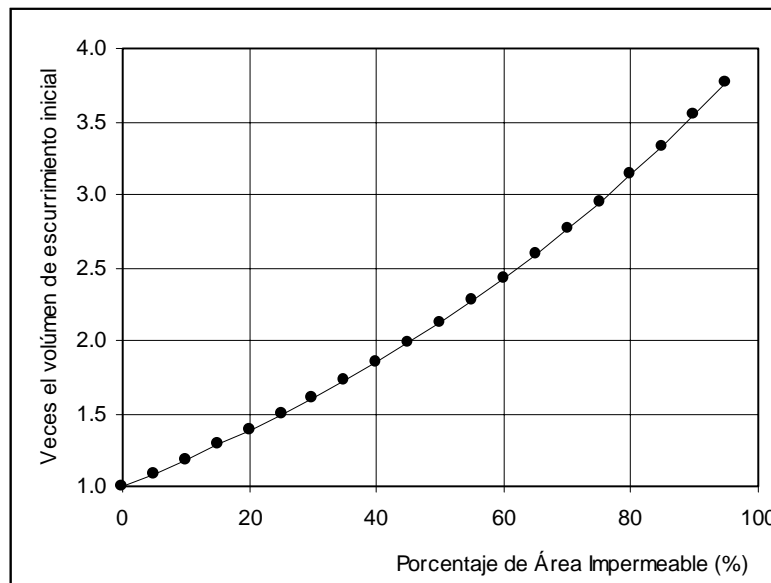


Figura 4.17. Análisis de Incidencia de Impermeabilización

Claramente puede observarse como el volumen de escurrimiento puede llegar a casi cuatuplicarse al pasar de un estado inicial natural a un estado altamente impermeabilizado. Debe remarcarse que esto es una análisis preliminar pero solo en términos de volúmenes de escurrimiento. Debe recordarse que aquí aún no se tiene en cuenta la incidencia sobre los caudales máximos.

Ejercicio 4.7

En una cuenca se ha verificado que al producirse una urbanización el valor del número de curva en condición media CN_{II} ha evolucionado según los siguientes valores:

% Impermeable	0	9	18	27	36	45	54	63	72	81	90
CN _{II}	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	88.4

Analizar mediante la metodología del CN el incremento del escurrimiento directo en términos de lluvia que escurre (P_e) para la condición I, II y III de humedad antecedente. La lluvia total es la correspondiente al ejercicio anterior P = 90.36 mm

Solución:

Mediante ecs. (4.21) y (4.22) se calculan los números de curva para condiciones I y III a partir de los valores conocidos para condición II. Mediante ec. (4.20) se calcula S y posteriormente con ec. (4.19) se calcula la precipitación que escurre P_e para cada caso de humedad antecedente y para cada grado de impermeabilización.

En la Tabla 4.11 se presentan los valores de escurrimiento directo calculados (en términos de mm) y en la Figura 4.18 se grafican los valores correspondientes.

La graficación permite ver el efecto de la urbanización sobre el escurrimiento y además como el efecto de aumento de escurrimiento en términos relativos es más importantes en condiciones de cuenca seca que en condiciones de cuenca húmeda. En este caso particular el aumento de escurrimiento en condición media (II) resulta del orden del 46%, en tanto que para una condición de cuenca húmeda (III) resulta del 20% y para cuenca seca (I) resulta del 133%.

Tabla 4.11. Modificación en el escurrimiento directo debido a la urbanización Para distintos estados de humedad antecedente. Ejercicio 4.7

% de Impermeabilización	CN _{II}	Pe (mm) Condición II	Pe (mm) Condición III	Pe (mm) Condición I
0	79	40.9	62.7	15.5
9	80	42.7	64.0	17.1
18	81	44.6	65.3	18.9
27	82	46.5	66.6	20.7
36	83	48.4	67.9	22.7
45	84	50.4	69.2	24.8
54	85	52.5	70.6	27.1
63	86	54.6	71.9	29.5
72	87	56.7	73.2	32.1
81	88	59.0	74.5	34.9
90	88.4	59.9	75.0	36.1

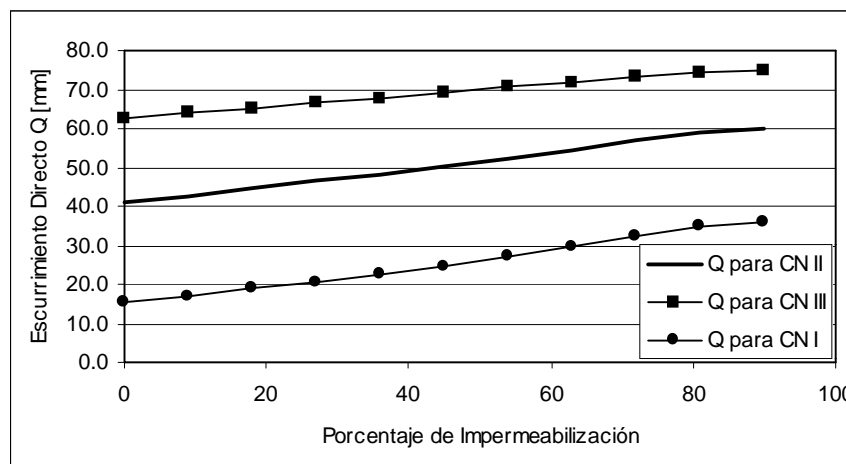


Figura 4.18. Aumento de Escurrimiento Directo en función del porcentaje de Impermeabilización

4.4 BIBLIOGRAFÍA

Aron G., (1993), Modeling of Infiltration and Other Losses, en Urban Storm Drainage (Cao C., Yen B. y Benedini M. (1993) eds.), Waters Resources Publications, Colorado, Estados Unidos.pp. 143-154.

ASCE and WEF (1994), Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems, ASCE-WEF, New York, EU. (730 pag.)

Bertoni J., Pedraza R. Collins J., Macor J., Pusineri G., Ocampo C. Maza J. y Secchi A. (1995), Apuntes de Curso Sistemas de Drenaje Urbano, Fac. de Ingeniería, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe. (300 pag.).

Bertoni, J.C., Maza, J. y Paoli C. (2002), Gestion de Crecidas en Áreas Urbanas en America del Sur, Programa Asociado de Gestion de Crecidas, Proyecto: Mejoramiento de las Prácticas de Gestión de Crecidas en Sudamérica, World Meteorological Organisation Global Water Partnership.

Bureau of Reclamation (1967), US Department of the Interior, Diseño de Pequeñas Presas, Cap. Estudio de Avenidas, Edit. Limusa, México. 639 p.

Chow, V. T., Maidment, D. y Mays, L. (1994), Hidrología Aplicada, McGraw-Hill Interamericana, Buenos Aires.584 p.

Horton R. (1939), Analysis of Runoff-Plat Experiments With Infiltration- Capacity, Vol. 20.-pp. 693-7111.

Maza J., Fornero L., Litwin C. y Fernandez P. (1993), Modelo AR-HYMO, Manual del Usuario, INA-CRA, Mendoza.

- Porto R. (1995), Escoamento Superficial Direto, Cap. 4 Drenagem Urbana, (Tucci C., Laina Porto R. y Barros M., 1995), Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre.pp- 107-165.
- Ritzema H. (Editor in Chief) (1994), Drainage Principles and Applications, ILRI Publication 16, Wageningen, Holanda. 1125 p.
- UDFCD (1967 a 1994), Drainage Criteria Manual, Vol. 1,2 y 3, Urban Drainage and Flood Control District, Denver, Colorado, EU, (750 p.)
- USSCS (1975) United State Soil Conservation Service, Urban Hydrology for Small Watersheds, Technical Release No. 55, Segunda Ed.,SCS-USDA, Washington, D.C.
- Wisner P. (1993), Modelo OTTHYMO, Manual del Usuario, Universidad de Ottawa, Canadá.
- Zimmermann E. y Orsolini H. (2000), Infiltración y Exceso de Lluvia, Cap. V Hidrología Procesos y Métodos, (Orsolini H., Zimmermann E. y Basile P., 2000), UNR Editora, Rosario. pp. 90-110.