

**Hidrología aplicada al estudio y
manejo de cuencas y de sistemas
de riego y drenaje**

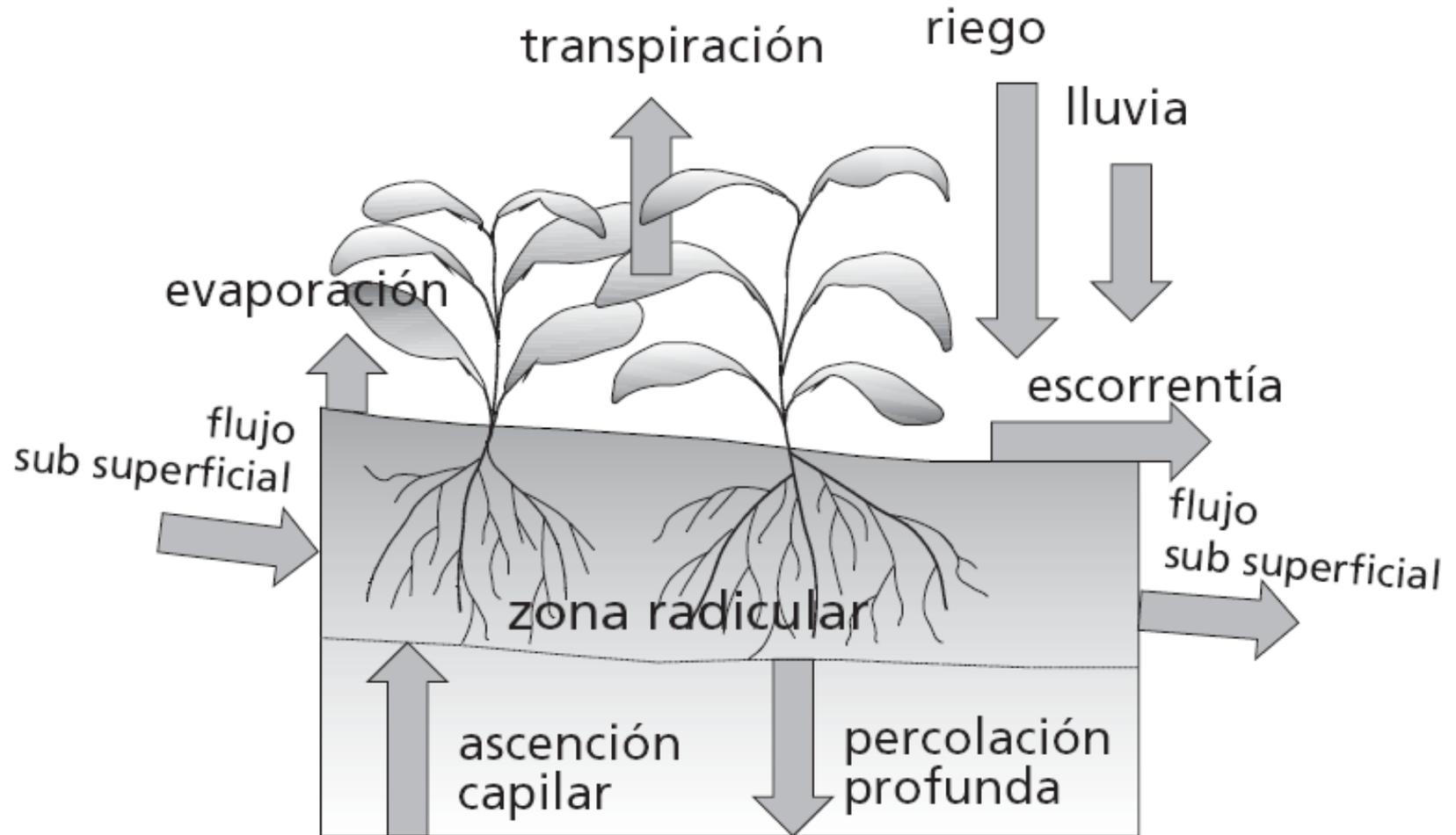
**Metodologías para la medición y
estimación de la infiltración y el
escurrimiento**

Temario

- Los procesos de infiltración y escurrimiento.
- Estimación de la infiltración.
 - Ensayos para la determinación a campo.
 - Representación gráfica de la I y de la I_{ac} .
 - Ajuste de los datos de campo para la construcción de modelos matemáticos que caracterizan la infiltración.
- Estimación del escurrimiento.

Ciclo hidrológico

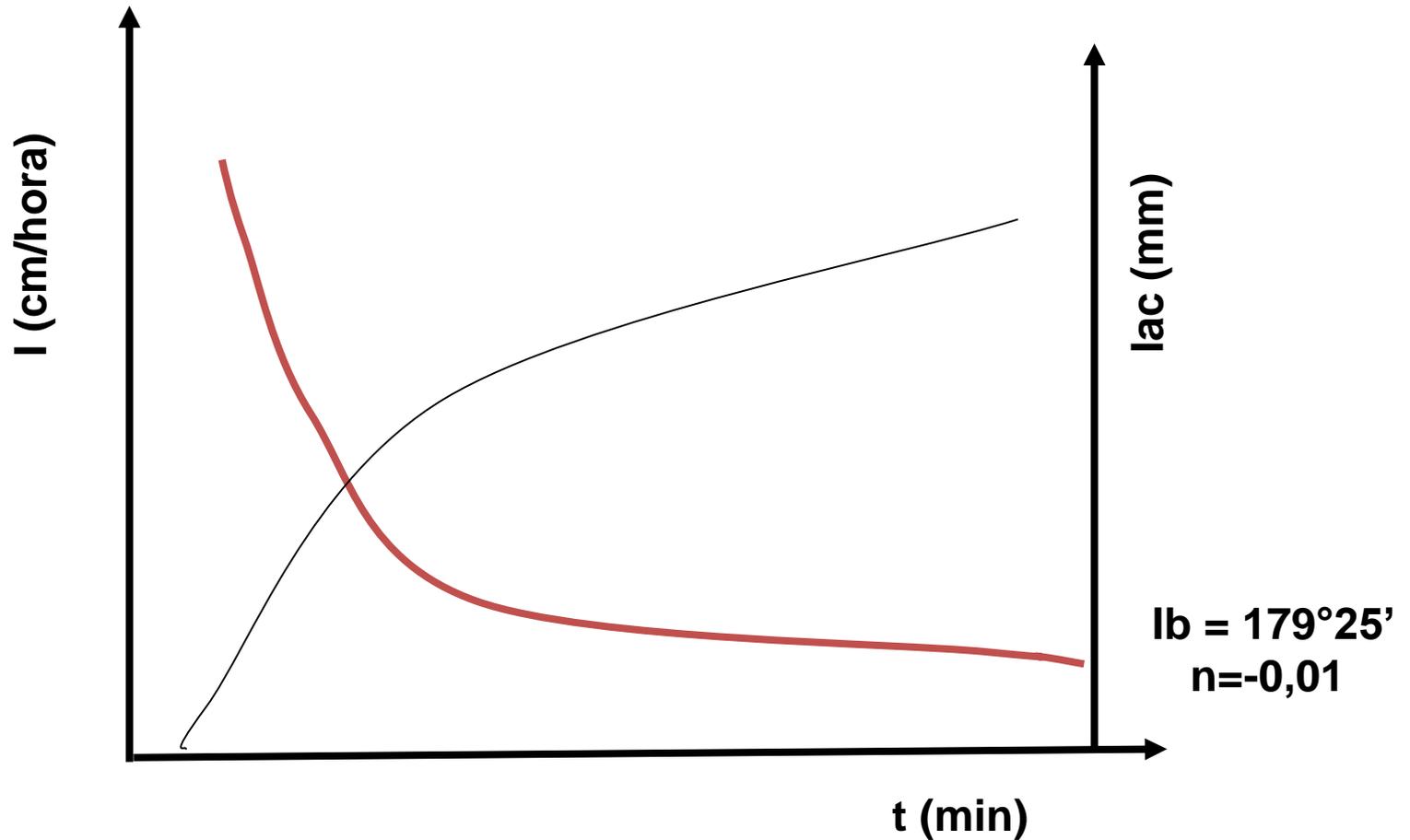
Balance de agua en el suelo de la zona radicular



Que es la Infiltración?

- Es el proceso de ingreso vertical del agua al suelo desde su superficie.
- El agua penetra por los macro y microporos del suelo, generando un frente húmedo que varia según: aporte de agua, textura, estructura, MO, contenido de humedad del suelo, salinidad, sodicidad y estado físico (arado, surqueado, sembrado, etc)
- Se modela para diseñar sistemas de riego y hacer balances de agua

Evolución de la infiltración



Tipos de infiltración

- **Infiltración a flujo no saturado:**
 - Es la que se produce cuando el suelo no esta saturado.
 - Frente húmedo.
 - Velocidad variable y depende del potencial gravitacional y mátrico.
- **Infiltración a flujo saturado:**
 - Es la que se produce cuando el suelo esta saturado,
 - Velocidad tiende a ser constante y depende del potencial hidráulico y gravitacional

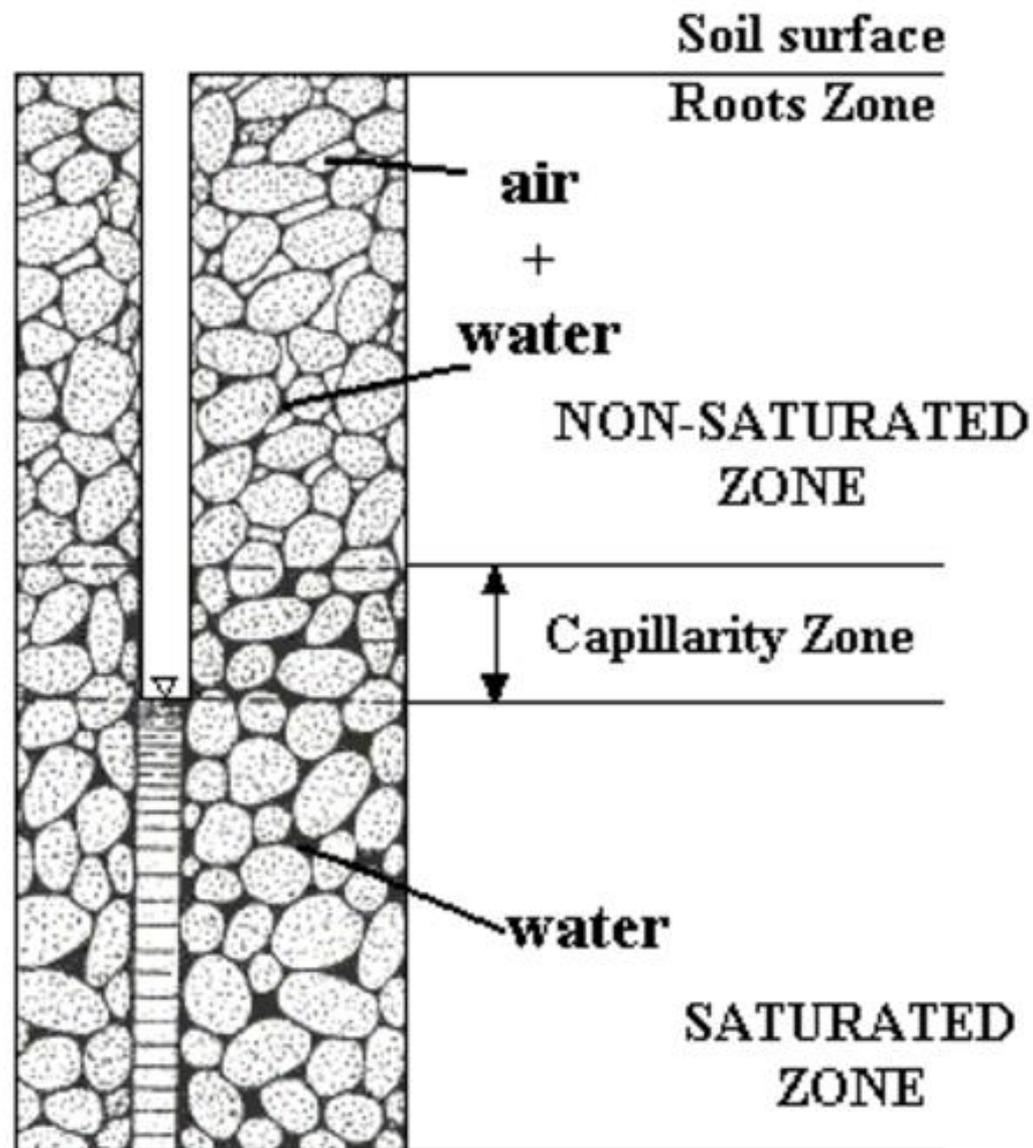


Figure 7.2. Distinction between saturated and unsaturated zones [Musy, 2001]

Infiltración: expresión y unidades

- I = Velocidad de infiltración. Lámina de agua que infiltra en el tiempo (mm/h ó cm/hora)
- I_b = Infiltración básica: I casi constante.
- I_{ac} = Lámina acumulada. Volumen infiltrado (mm ó cm)
- I_p = Infiltración promedio: Promedio en un período de tiempo.

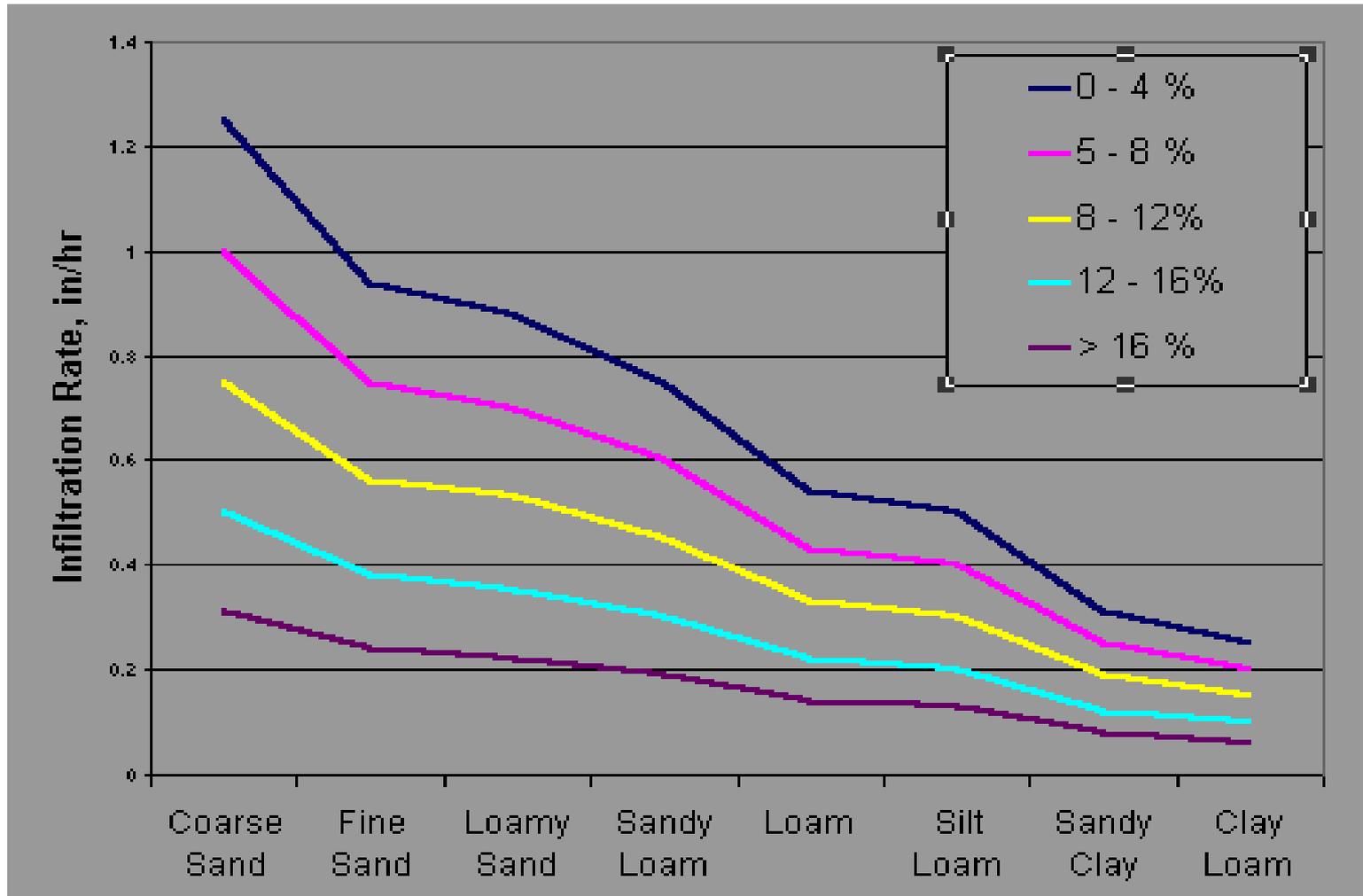
Para que se modela la Infiltración?

- Diseño y operación de sistemas de riego
- Construcción de modelos de balance hídrico
- Estudio de técnicas de conservación de suelos y de drenaje

Para que se modela la I acumulada?

- ¿Qué pretendemos hacer con un riego?
Reponer el agua consumida por el cultivo
- ¿Cómo?
Dejando el agua en contacto con la superficie del suelo para que infiltre.
- ¿Cuanto tiempo dura el riego?
Transformo **lámina** en **tiempo de contacto**

Infiltración en función de la textura y la pendiente

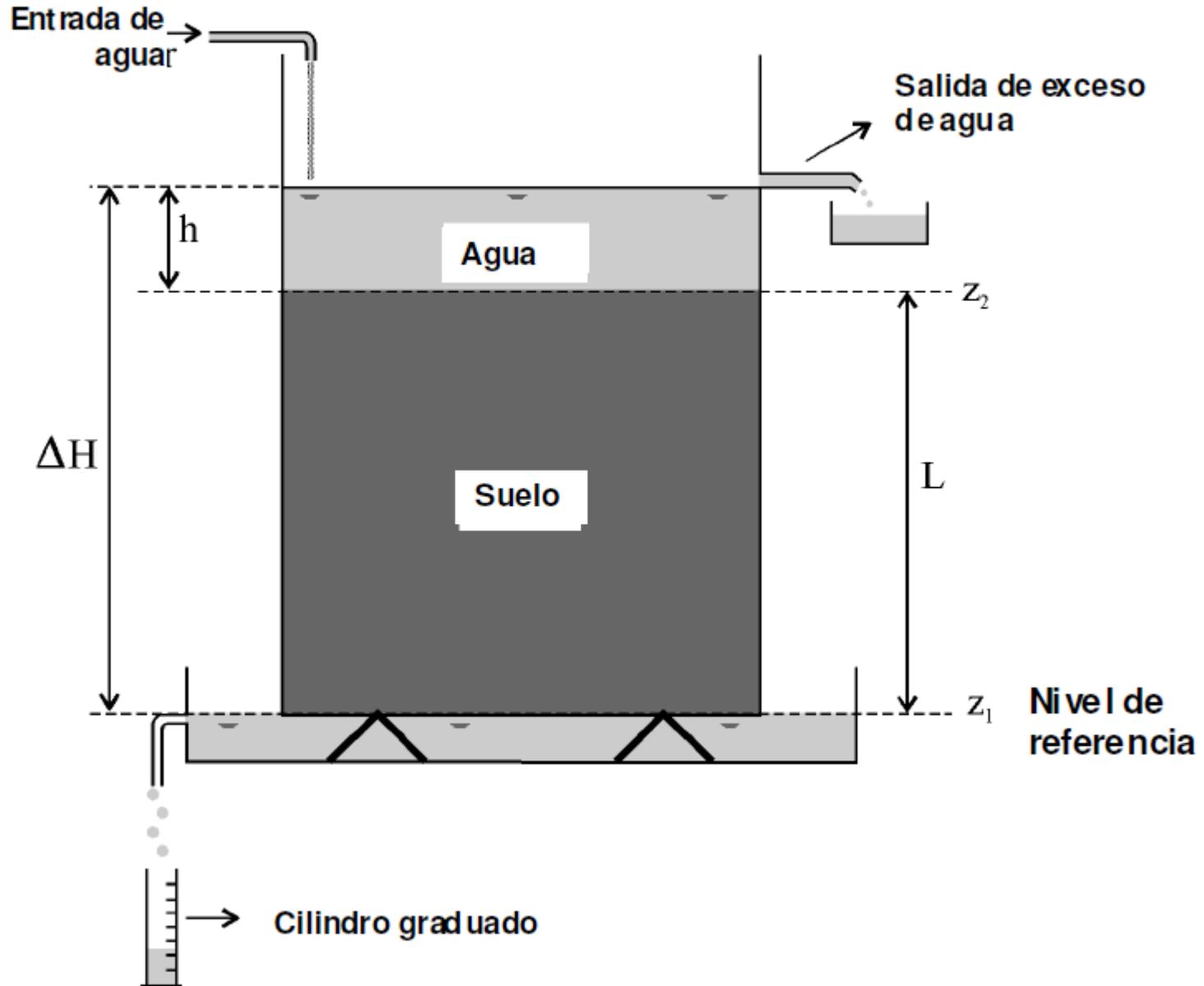


Fuente: Rainbird Corporation, derived from USDA Data

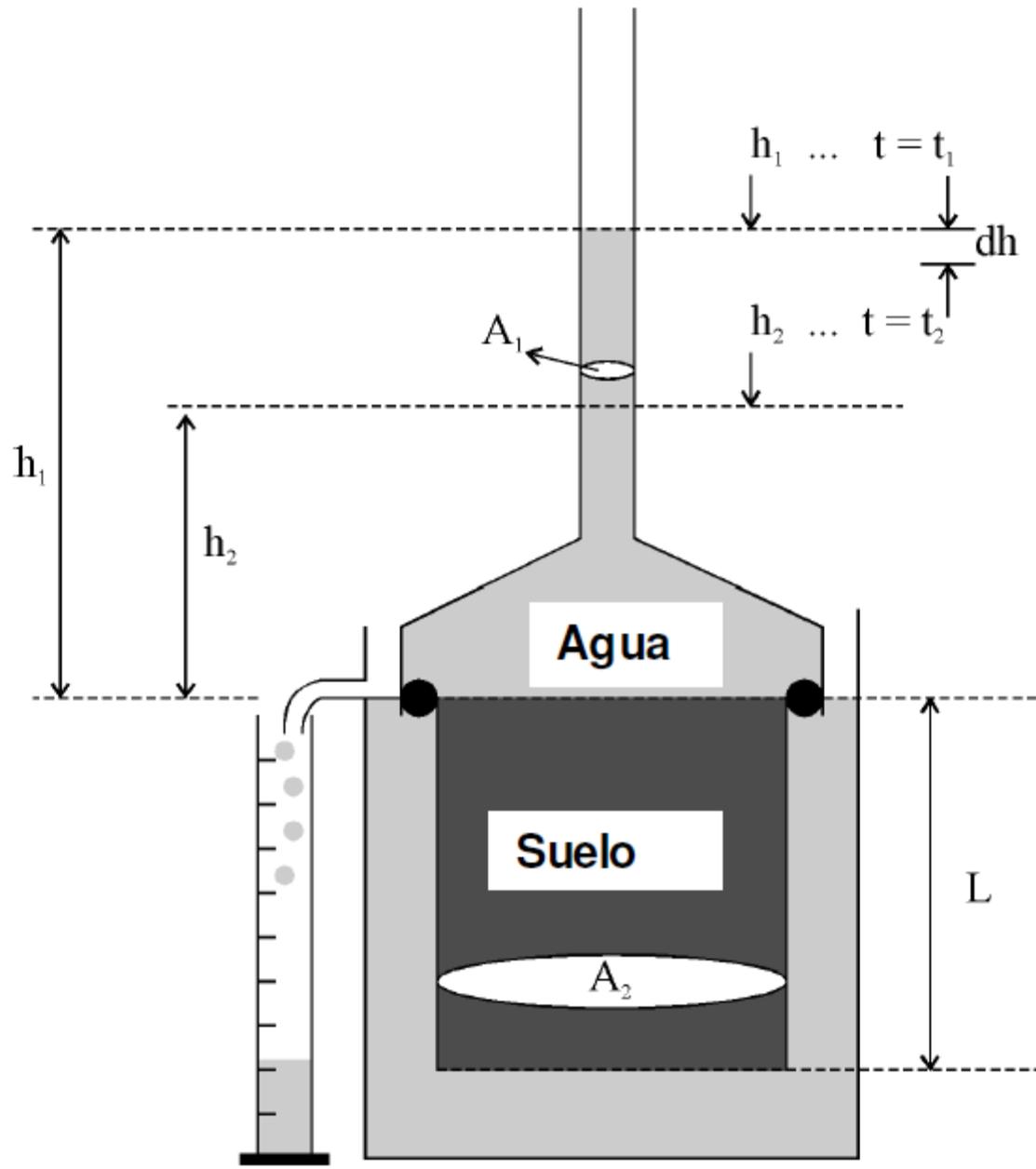
DETERMINACION DE LA INFILTRACIÓN

- **Laboratorio**
 - Carga constante y variable de agua
- **Campo**
 - Zona saturada: *Método del pozo o del piezómetro*
 - Zona no saturada:
 - *Infiltrómetro de doble anillo*
 - *Permeámetro de Guelph*
 - *Infiltrómetro de disco o de tensión*
 - **Método del pozo (invertido) (por encima del nivel freático)**
 - **Infiltrómetro de cubeta**
 - **Infiltrómetro de aspersion**
 - **Infiltrómetro de surcos**

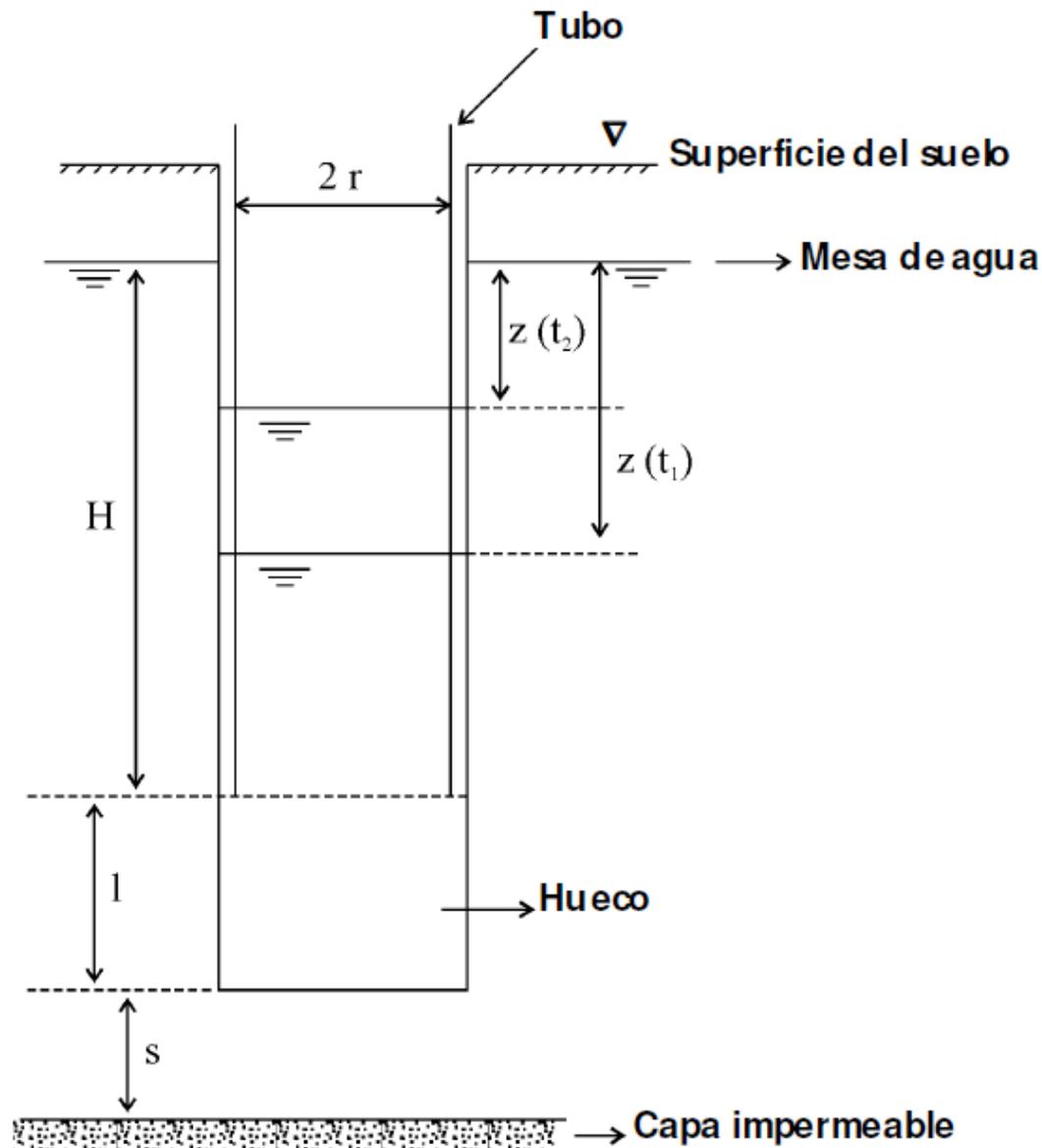
Lab: Carga constante de agua



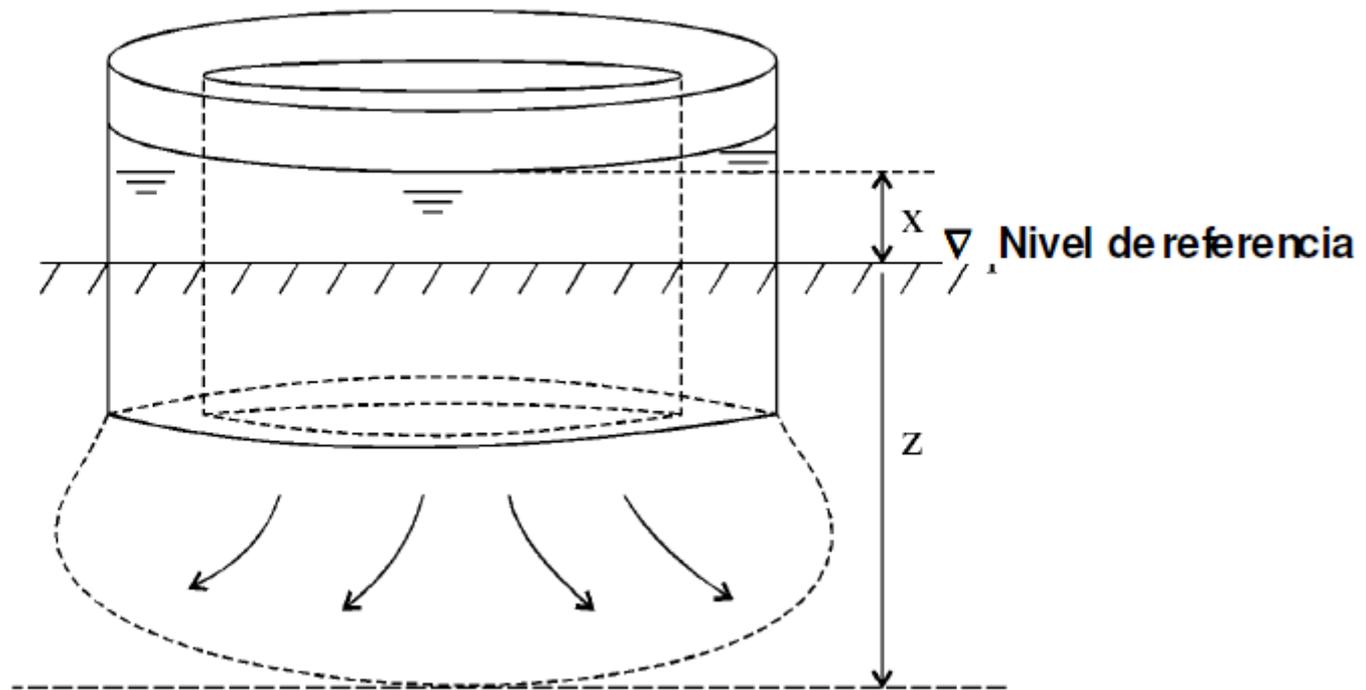
Lab: Carga variable de agua



Campo saturada: método Piezómetro



Campo no saturada: doble anillo

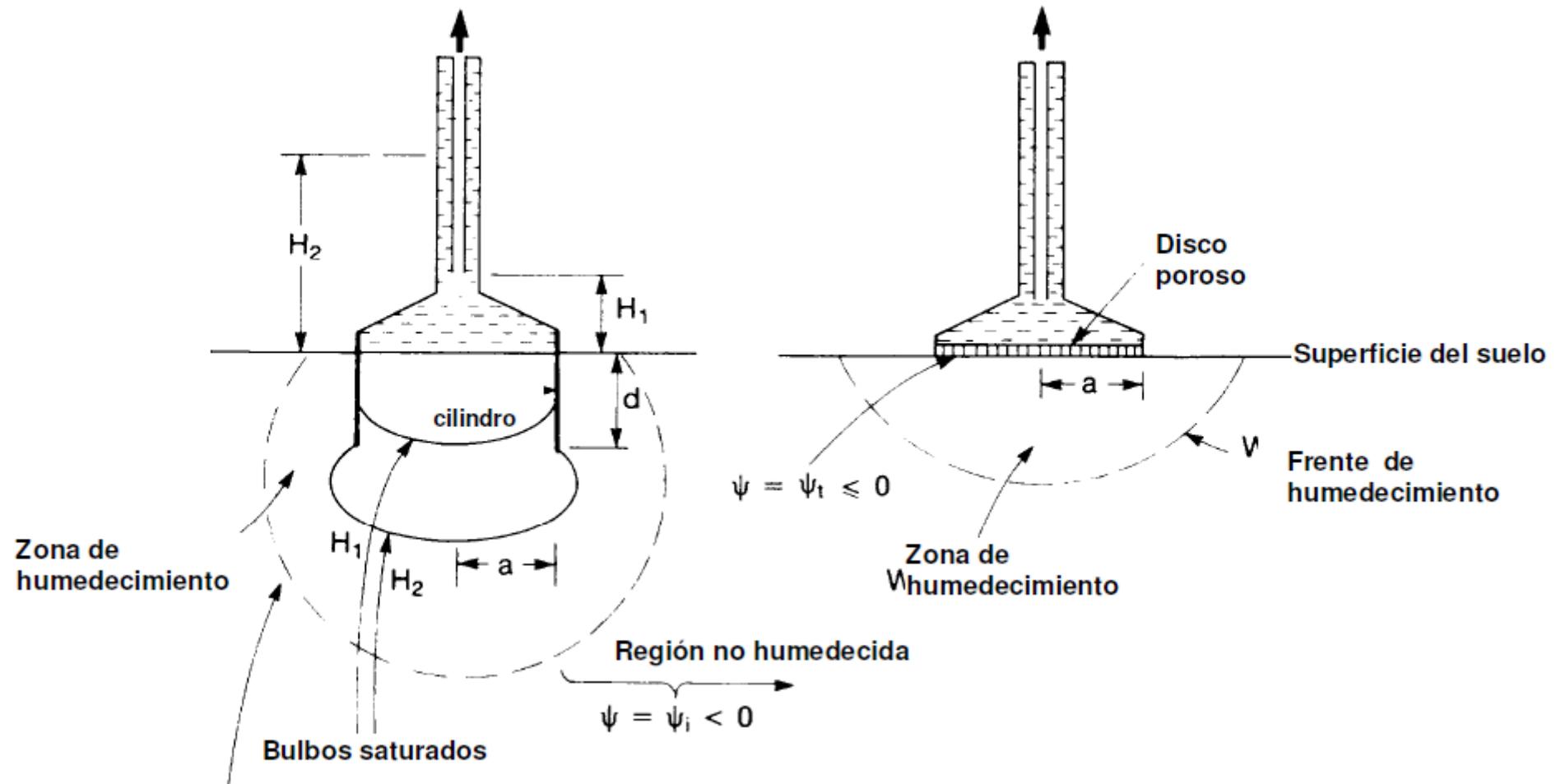






Hora	Tiempo parcial	Tiempo acumulado	Carga de agua inicial	Carga de agua final	Lámina infiltrada Parcial	Lámina infiltrada Acumulada	Velocidad de infiltración
	(min).	(min)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm/h)
8.01	0		15				
8.06	5	5	15	13.9	1.1	1.1	13.2
8.11	5	10	13.9	13.2	0.7	1.8	8,4
8.21	10	20	13.2	12.5	0.7	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

Campo no saturado: Infiltrómetro de disco o de tensión



Método para medir la infiltración básica con Microinfiltrómetro..

Para la medición de la infiltración a campo se utiliza un microinfiltrómetro de disco de succión, denominado Mini Disk Infiltrometer, marca Decagon Devices. (Figura 3), que permite medir la conductividad hidráulica (k) del suelo saturado, y dado que el ingreso del agua al suelo es desde su superficie, es equivalente a la infiltración básica. Consta de una probeta graduada separada por un tapón de goma, que divide la parte superior, donde funciona la cámara de control de succión, de la parte inferior, donde opera la columna de agua sobre el disco poroso de acero y el tubo de Mariotte

Microinfiltrómetro.

Minidisk Infiltrometer 2. The Infiltrometer

Features

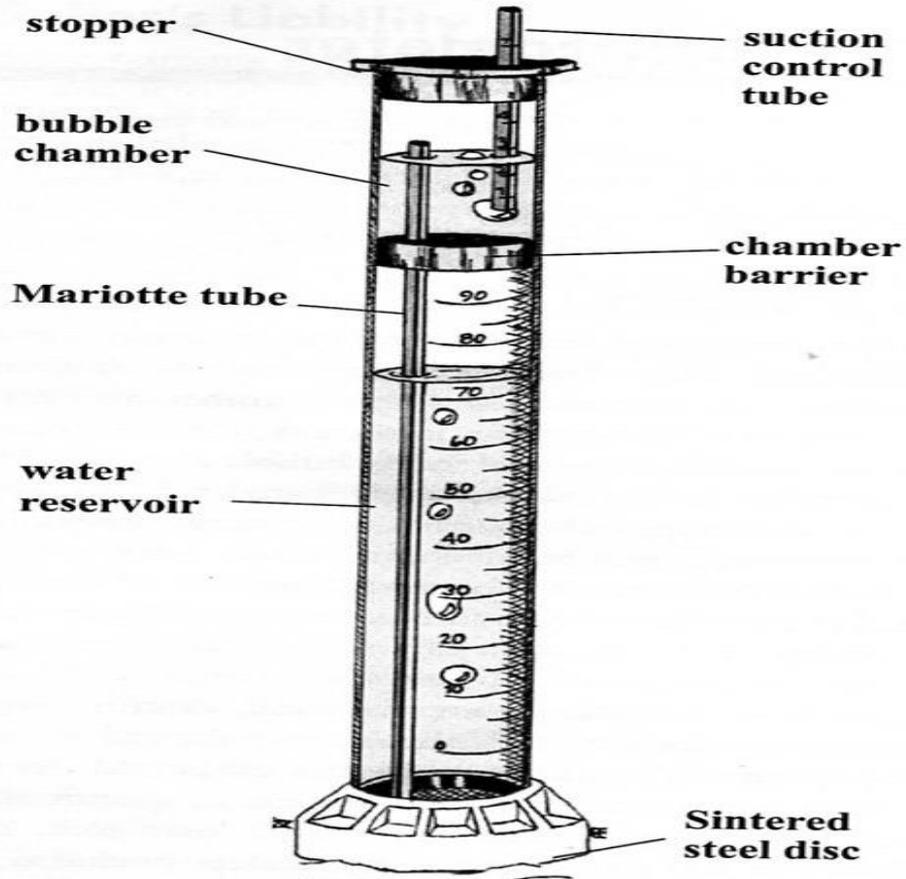


Fig. 1. Infiltrometer diagram



© 2009
509
MINDI
Decagon

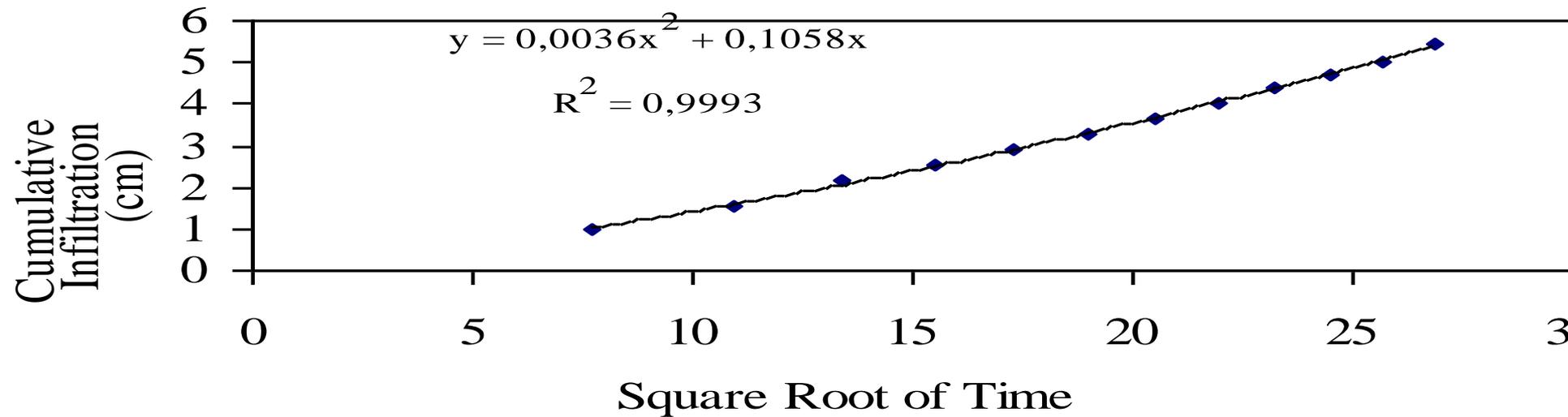
Zhang (1997) propuso el método de medición de la conductividad hidráulica usando el microinfiltrómetro de disco, que una vez cargado y seleccionada la succión adecuada, al ubicarlo sobre la superficie del suelo, comienza a infiltrar y burbujear el aire desplazado. Se van midiendo los volúmenes de agua infiltrados, en ml, observando la escala graduada en el exterior de la probeta, inicialmente entre 90 y 95 ml, cada intervalos regulares de tiempo, recomendados desde 2-3 segundos para suelos texturalmente muy gruesos hasta 30 minutos para suelos muy finos. Las diferencias de volúmenes (en cm^3 , ya que $1 \text{ ml} = 1 \text{ cm}^3$) se transforman en láminas infiltradas (en cm) haciendo el cociente entre los volúmenes y la sección del infiltrómetro ($15,9 \text{ cm}^2$). P. ej. $4 \text{ cm}^3 / 15,9 \text{ cm}^2 = 0,2517 \text{ cm}$. El registro de láminas y tiempos se completa con el cálculo de la raíz cuadrada del tiempo ($t^{-1/2}$) y los pares conjugados de valores de infiltración acumulada I_{ac} y $t^{-1/2}$ se grafican y ajustan a una ecuación cuadrática. La pendiente de la curva de $I_{ac} - t^{-1/2}$ es el coeficiente C (m/s) y $k = C/A$, donde A es un parámetro de van Genutchen para distintas texturas de suelo, succiones y diámetro de disco infiltrómetro. Para suelos de 12 tipos texturales, 7 valores de succión y diámetro de disco de 4,5 cm, los valores de A se encuentran en la Tabla 2.

Parámetros de van Genuchten. Fuente: Zhang (1997).

Tipo	Textura (inglés)	Textura (español)	Succión (cm)								
			alfa	n	-0,5	-1	-2	-3	-4	-5	-6
1	sand	arenoso franco	0,145	2,68	2,84	2,40	1,73	1,24	0,89	0,64	0,46
2	loamy sand	arenoso franco	0,124	2,28	2,99	2,79	2,43	2,12	1,84	1,61	1,40
3	sandy loam	franco arenoso	0,075	1,89	3,88	3,89	3,91	3,93	3,95	3,98	4,00
4	loam	franco	0,036	1,56	5,46	5,72	6,27	6,87	7,53	8,25	9,05
5	silt	limoso	0,016	1,37	7,92	8,18	8,71	9,29	9,90	10,55	11,24
6	silt loam	franco limoso	0,020	1,41	7,10	7,37	7,93	8,53	9,19	9,89	10,64
7	sandy clay loam	franco arcillo arenoso	0,059	1,48	3,21	3,52	4,24	5,11	6,15	7,41	8,92
8	clay loam	franco arcilloso	0,019	1,31	5,86	6,11	6,64	7,23	7,86	8,55	9,30
9	silty clay loam	franco arcillo limoso	0,010	1,23	7,89	8,09	8,51	8,95	9,41	9,90	10,41
10	sandy clay	arcillo arenoso	0,027	1,23	3,34	3,57	4,09	4,68	5,36	6,14	7,04
11	silty clay	limo arcilloso	0,005	1,09	6,08	6,17	6,36	6,56	6,76	6,97	7,18
12	clay	arcilloso	0,008	1,09	4,00	4,10	4,30	4,51	4,74	4,98	5,22

Ejemplos de aplicación.

Utilizando el microinfiltrómetro Decagon se mide la infiltración acumulada y calcula la infiltración básica I_b (mm/h)



C	A	I_b	I_b	I_b
(cm/s)	(adimen.)	(cm/s)	(cm/h)	(mm/h)
0,0036	7,93	0,00045	1,63	16,3

Infiltrómetro de surcos

- Mínimo: 3 surcos de 60 metros de largo
- $Q_e = Q_{MNE}(l/s) = 0,63/i(\%)$ (Criddle)
- Q_s : Se afora hasta que se hace cte.
- $Q_i = Q_e - Q_s$
- Ecuación de igualdades volumétricas
- $Q * t = L_{am} * A$
 - Q = caudal, en m^3/s .
 - t = tiempo, en s.
 - L_{am} = lámina, en m.
 - A = área de infiltración, en m^2 .
- $Q_i / A = L_{am} / t = I$ (cm/h)



2 9:15





SAE40 BITUMEN

2 11:15

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

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

Gráfico de velocidad de infiltración I

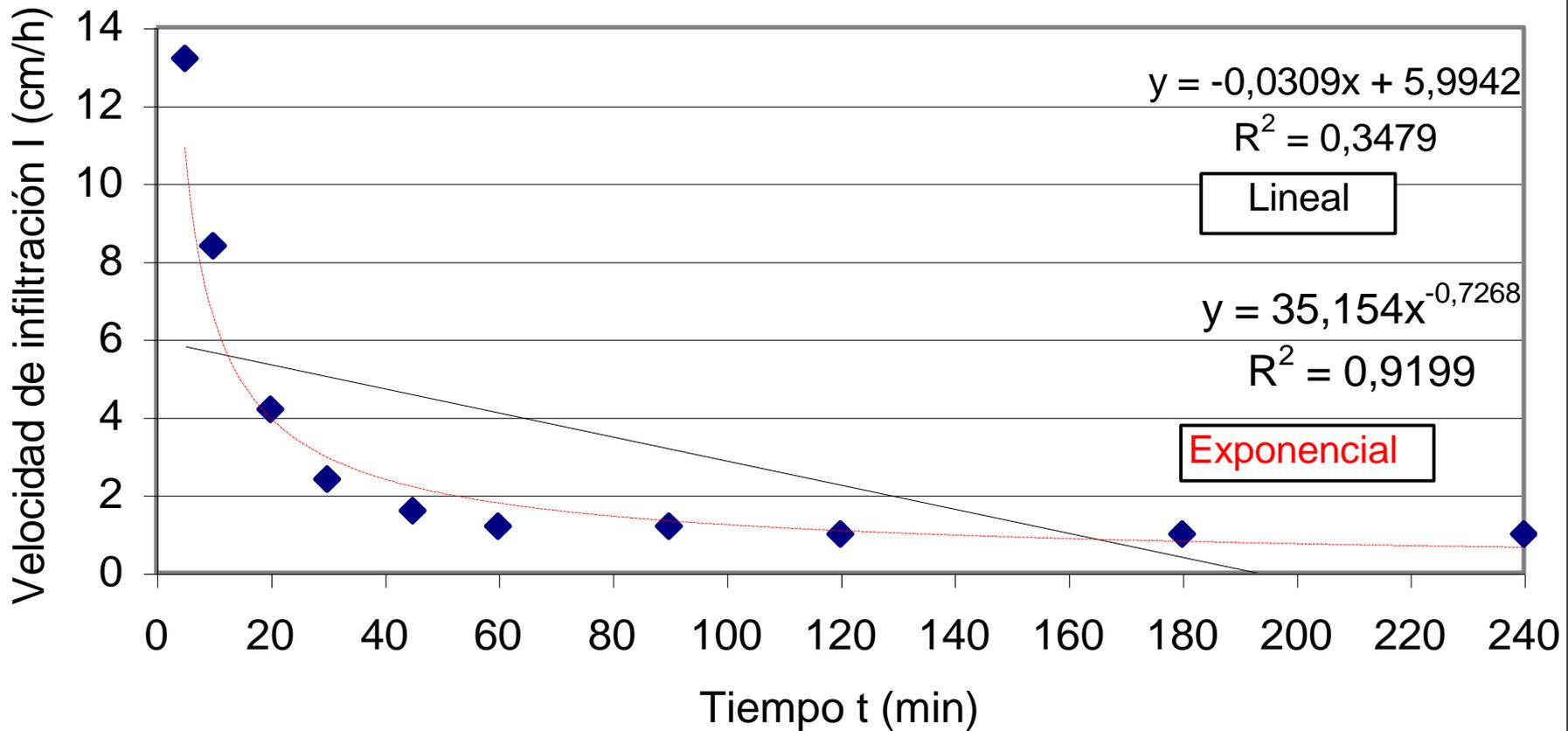
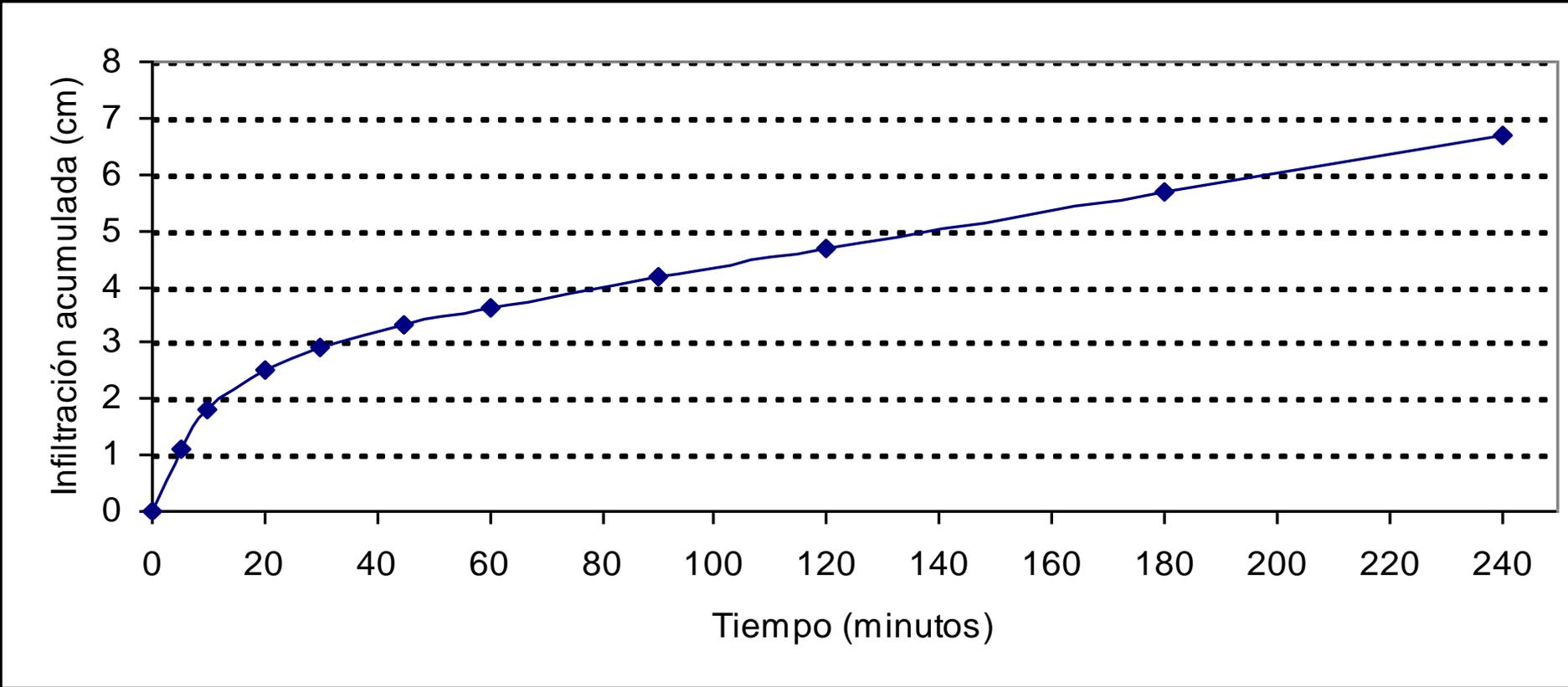


Gráfico infiltración acumulada lac



Infiltración: Modelos matemáticos

- Kostiakov (1932) modificado por Lewis (1979):

$$I = k \cdot t^n$$

- I = infiltración, en cm/h.
 - k = factor adimensional, representa la infiltración durante el intervalo inicial. Obtención de los datos de campo
 - t = tiempo de infiltración, en minutos
 - n : exponente que varía entre 0 y -1 . Representa el cambio de la Infiltración respecto del tiempo. Es la pendiente de la curva.
- Modificación USDA:

$$I = k \cdot t^n + I_b$$

- I_b = infiltración básica.

Rangos de Ib según suelo

- Muy arenoso 20-25 mm/h
- Arenoso 15-20 mm/h
- Limo-arenoso 10-15 mm/h
- Limo-arcilloso 8-10 mm/h
- Arcilloso < 8 mm/h

Infiltración acumulada

- $lac = K t^N$

- lac = infiltración acumulada en cm.

- K = factor que surge de la integración, calculado $K = k / 60 (n+1)$

- N = calculado en la integración como $N = n + 1$ y representa la tasa de cambio de la lac respecto del t , explica el crecimiento de lac con el tiempo.

- t = tiempo, en minutos.

La función de avance define el largo óptimo de la unidad de riego

- Para ello se necesita conocer el escurrimiento del agua realizando la curva de avance del agua sobre el suelo

¿Como regar?

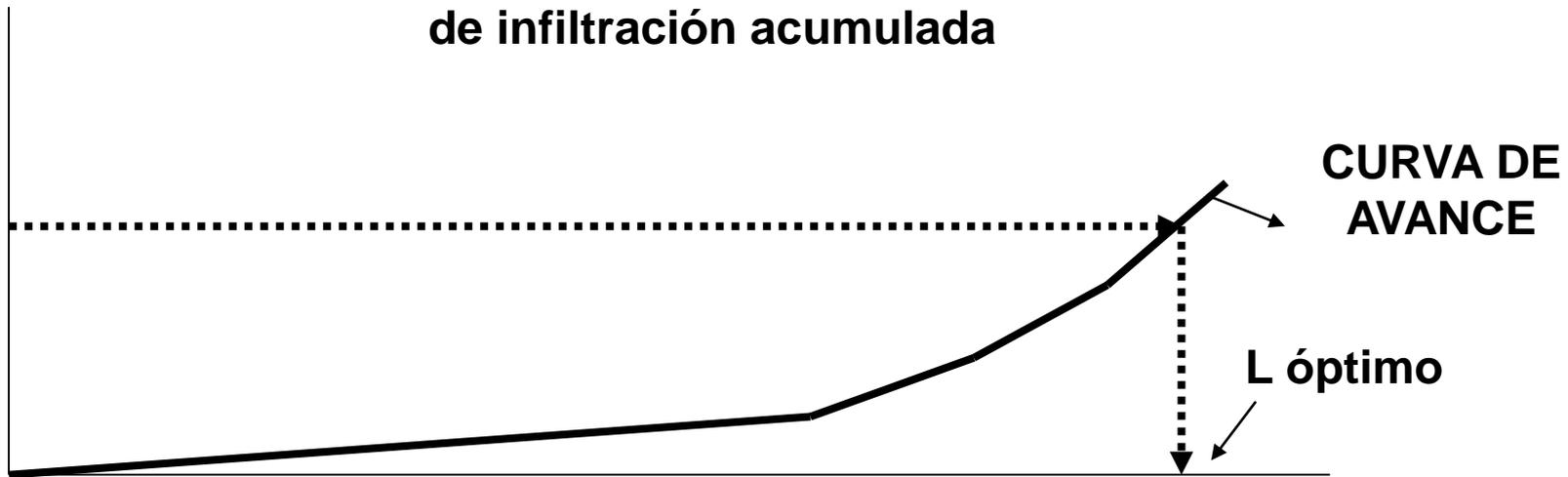
Largo óptimo de la unidad de riego

$T_{\text{avance}} = \frac{1}{4}$ del tiempo de infiltración

TIEMPO (minutos)

Tiempo de contacto: se obtiene de la curva de infiltración acumulada

$T_{\text{óptimo}}$



DISTANCIA DESDE EL PUNTO DE ENTRADA (m)

Ejemplo

- Definir la lac = K t^{-N}, partiendo de la siguiente ecuación:

- $l \text{ (cm/h)} = k t \text{ (min)}^n$

- $l \text{ (cm/h)} = 42,52 t \text{ (min)}^{-0.7}$

- Para calcular la lac:

- $K = k / (n + 1) 60$

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

- $N = n + 1$

- $N = - 0,7 + 1 = 0,3$

- $lac(\text{cm}) = 2,362 t(\text{min})^{0,3}$

Velocidad de Infiltración promedio

- $I_p \text{ (cm/h)} = I_{ac} \text{ (cm)} / t \text{ (min)}$
- $I_p = I_{ac}/t = K * t^N / t = K * t^{(N-1)} = K * t^n$
- Ej:
 - $I_{ac} \text{ (cm)} = 2,362 t \text{ (min)}^{0,3}$ en 120 min
 - $I_{ac} \text{ (cm)} = 2,362 * 120 \text{ min}^{0,3} = 9,93 \text{ cm}$
 - $I_p = I_{ac} / t \text{ total} = 9,93 \text{ cm} / 120 \text{ min} = 0,08275 \text{ cm/min} * 60 \text{ min/h} = 4,96 \text{ cm/h}$
 - $I_p = K t^{(N-1)} = 2,362 * 120 \text{ min}^{0,3-1} = 2,362 * 120 \text{ min}^{-0,7}$
 - $I_p = 0,0827622 \text{ cm/min} * 60 \text{ min/h} = 4,96 \text{ cm/h}$

Escurrimiento o escorrentía

1. Concepto de Escorrentía

2. Tipos de escorrentía

3. Ciclo de escorrentía

4. Factores que influyen

5. Cálculo

5.1. A partir de datos de aforos

5.2. Coeficiente de escorrentía

5.3. Caudal

Escorrentía

1. Concepto de Escorrentía

Agua procedente de la lluvia que llega a alimentar a las corrientes continuas o intermitentes de una cuenca.

2. Tipos de escorrentía

2.1. Escorrentía Superficial o Directa

Agua procedente de la lluvia y/o riego que no se infiltra en ningún momento y llega a la red de drenaje moviéndose por la superficie del terreno por acción de la gravedad

Escorrentía

2. Tipos de escorrentía

2.2. Escorrentía subsuperficial

Agua procedente de la lluvia y/o riego que se infiltra y que se mueve subhorizontalmente pudiendo reaparecer en la superficie en forma de manantiales

2.3. Escorrentía subterránea

Agua procedente de la lluvia y/o riego que se infiltra y que alcanza el nivel freático desde donde circula hasta el cuerpo receptor de aguas de drenaje (arroyo, río, mar, bajos, etc.)

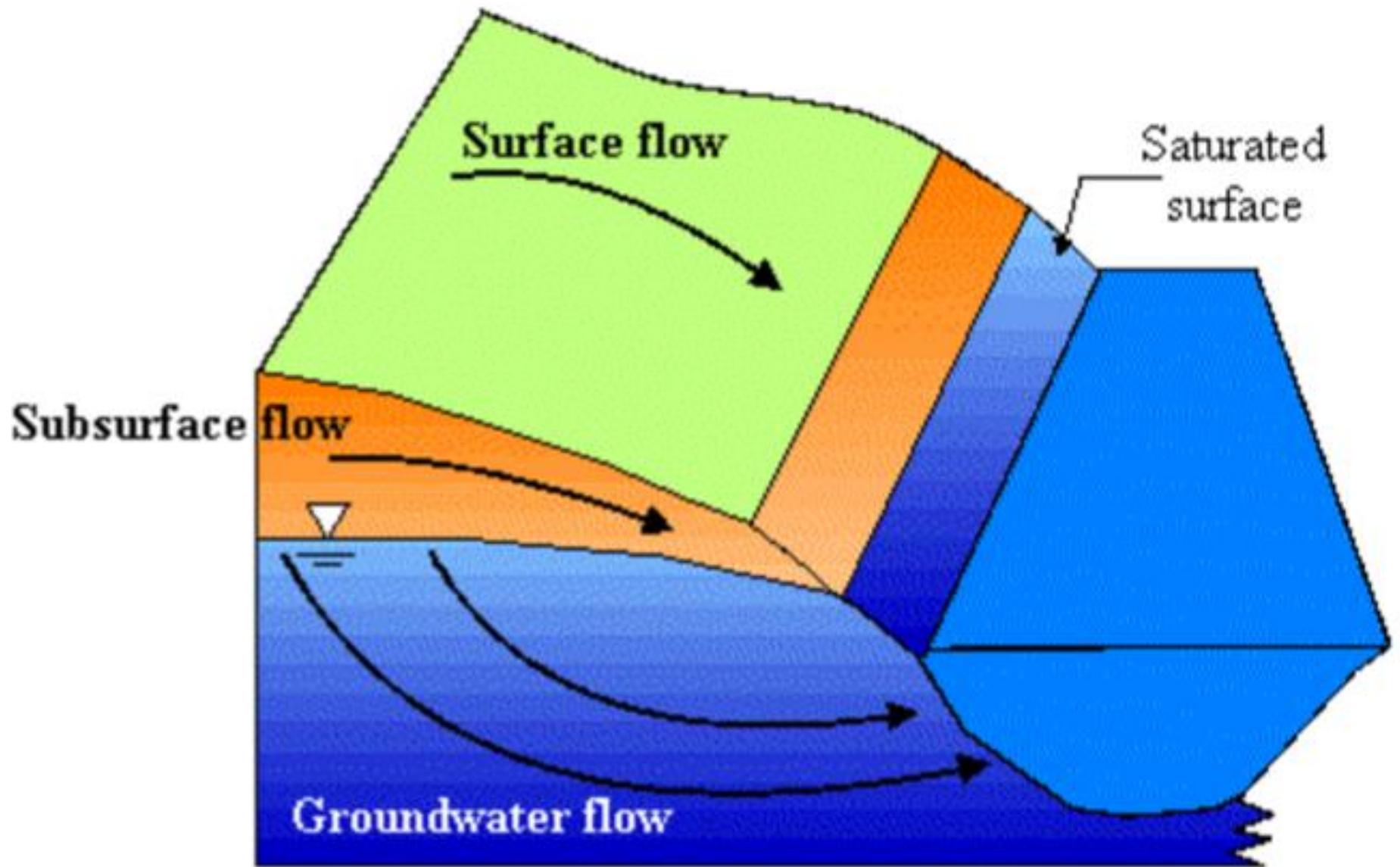
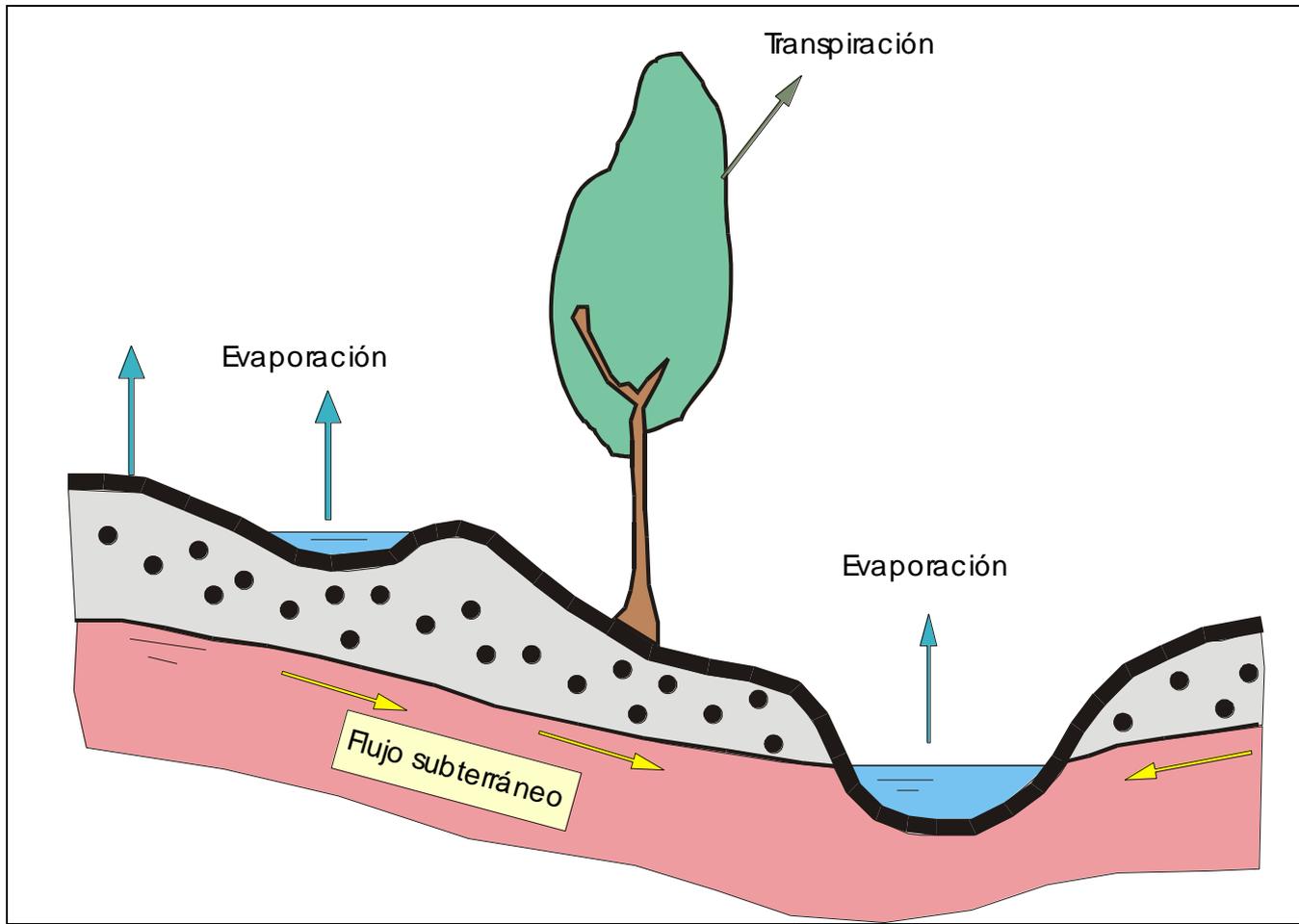


Figure 6.5 Different flow types [Musy, 2001]

Escorrentía

3. Ciclo de escorrentía

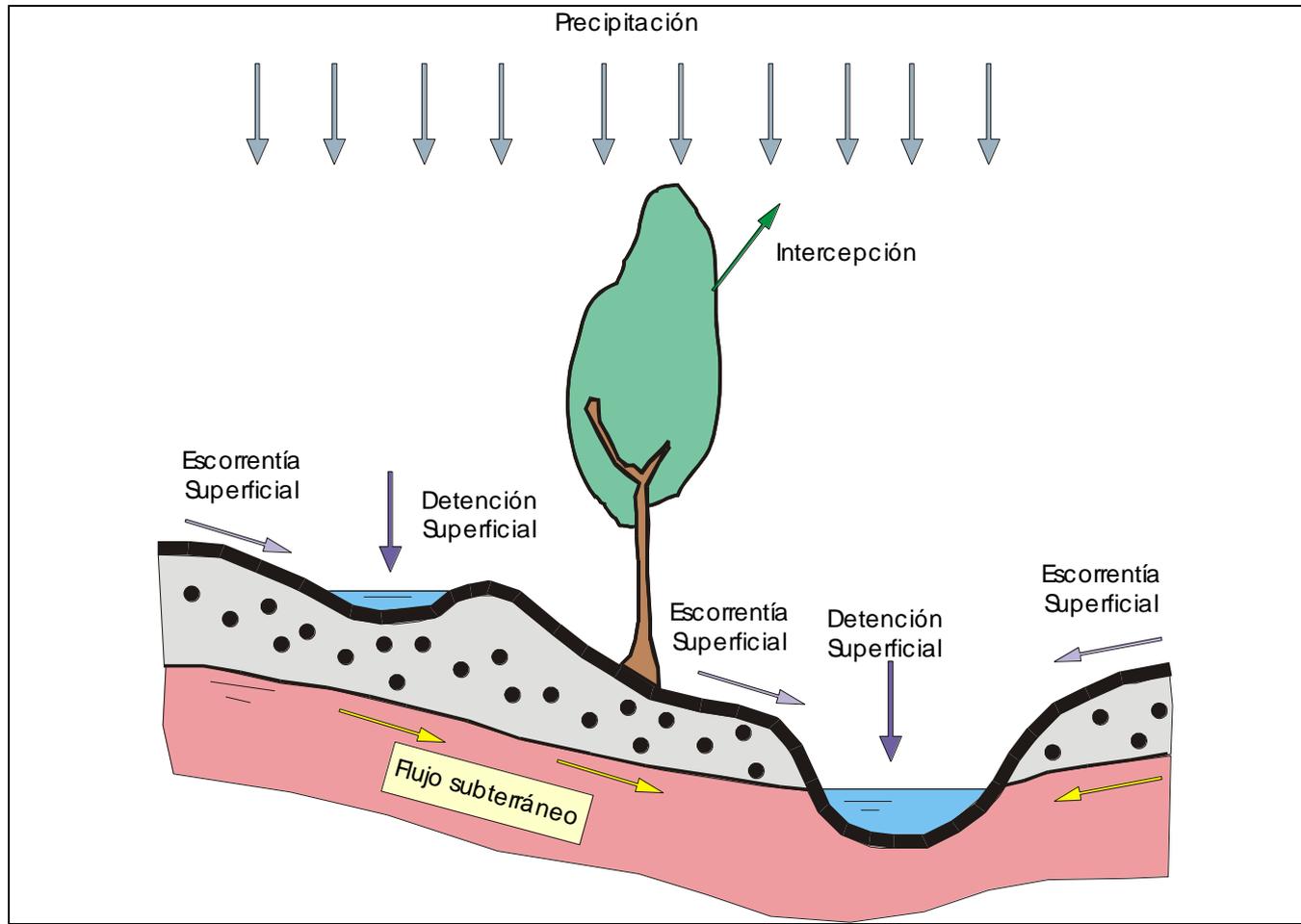
Situación inicial



Escorrentía

3. Ciclo de escorrentía

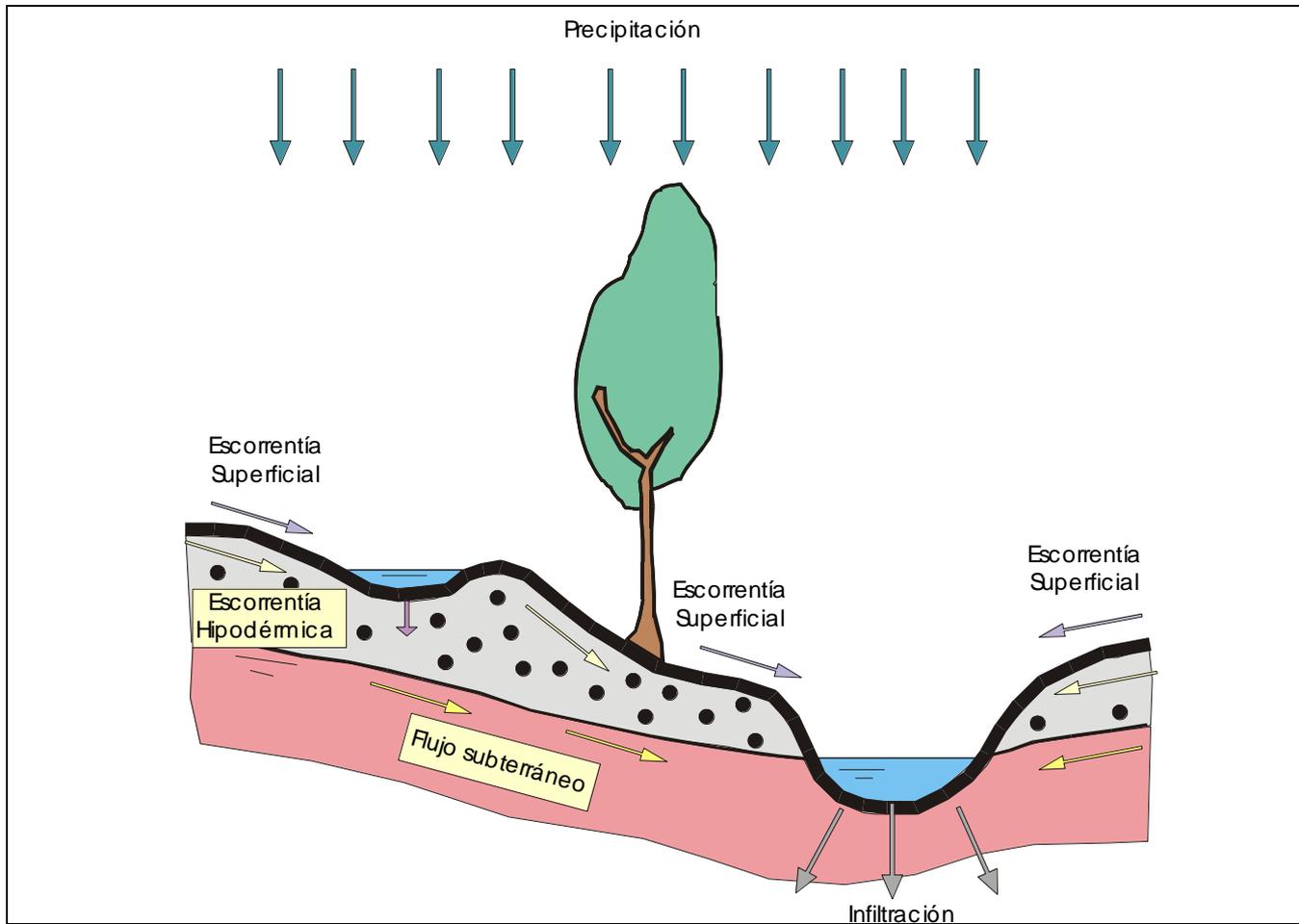
Inicio precipitación: escurrimiento superficial



Escorrentía

3. Ciclo de escorrentía

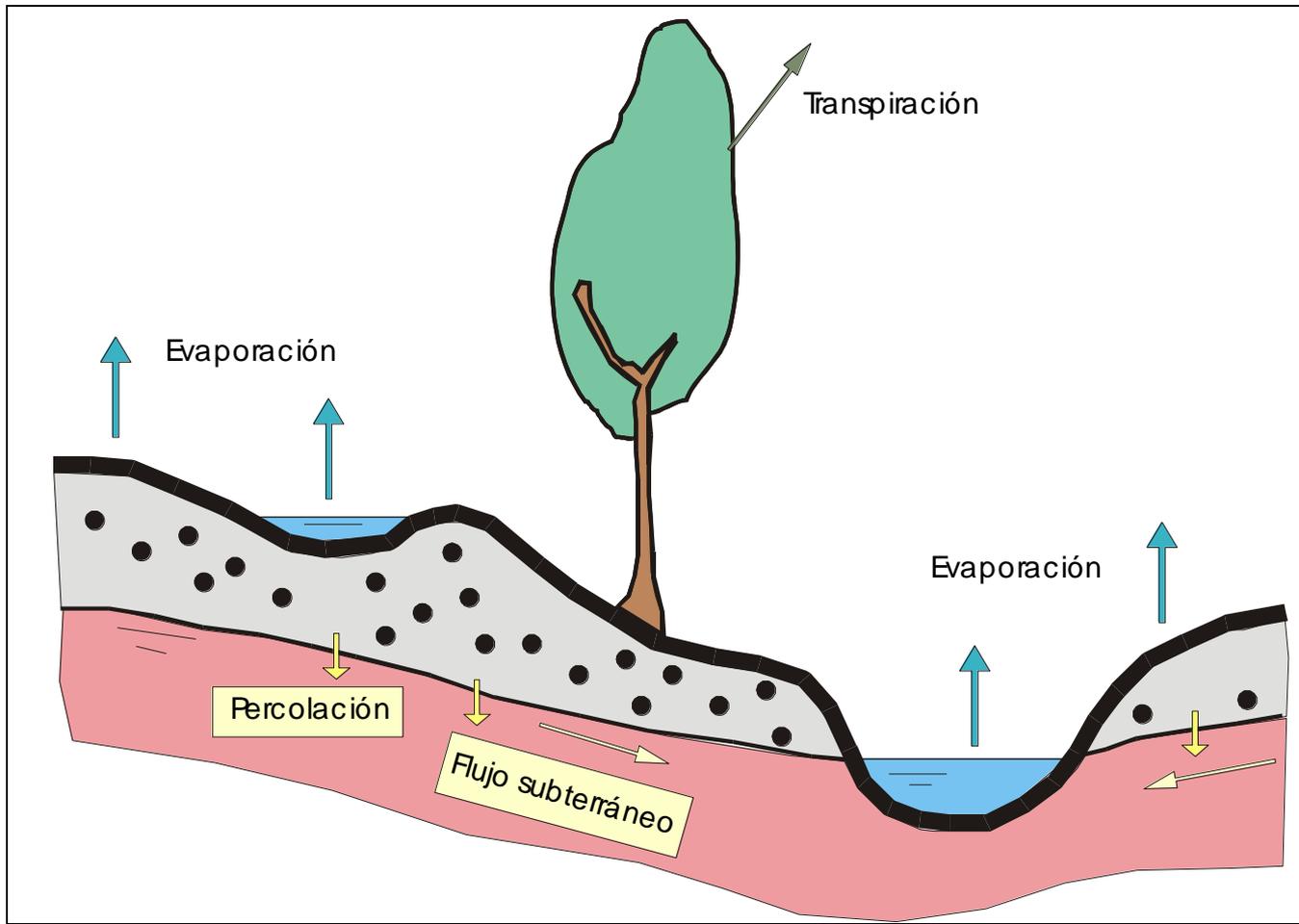
Precipitación: escurrimiento subsuperficial



Escorrentía

3. Ciclo de escorrentía

Percolación y flujo subterráneo



Escurrimiento o escorrentía

- Superficial
 - Mantiforme o no encauzado
 - Encauzado
 - Natural ríos arroyos
 - Artificial canales acequias
- Subsuperficial
 - Drenaje
- Subterráneo
 - Acuífero
 - freático o libre
 - Confinados o semiconfinados

Determinación del escurrimiento superficial no encauzado

- Se riega por aspersión una superficie delimitada por una caja rectangular, con tres lados cerrados y uno abierto



CCDCES PERIEN

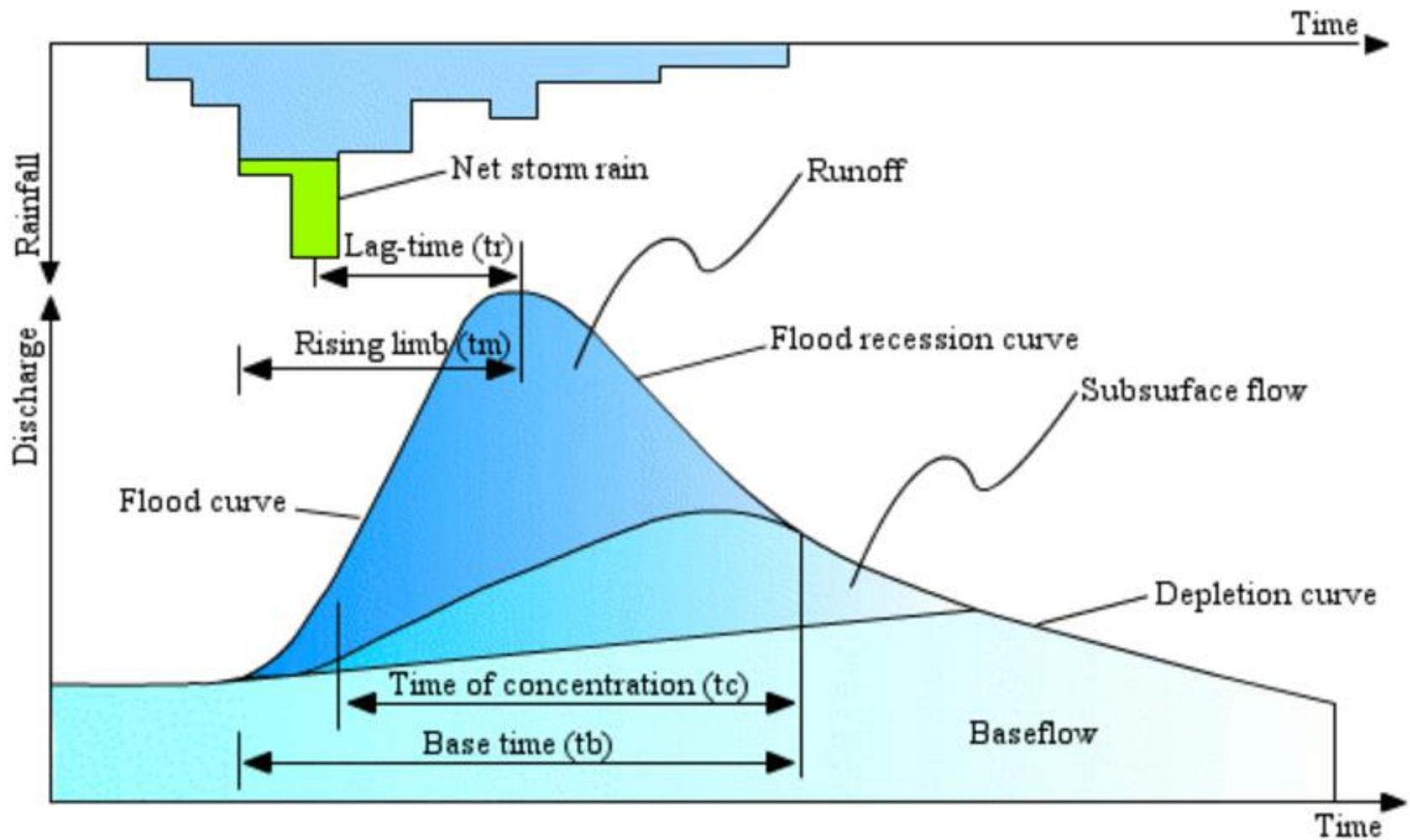
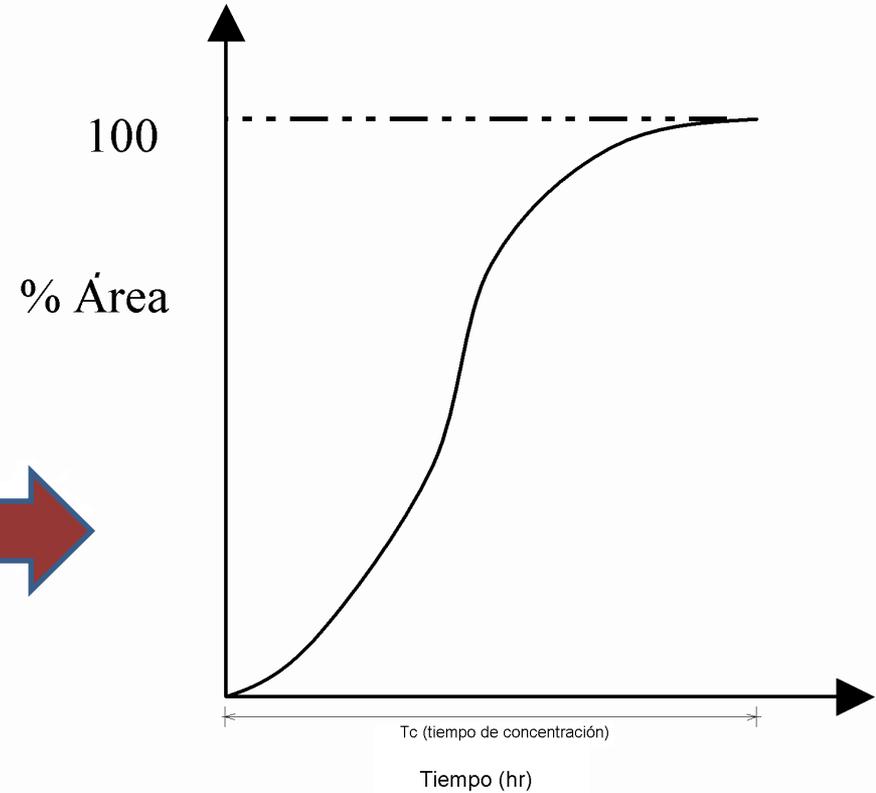
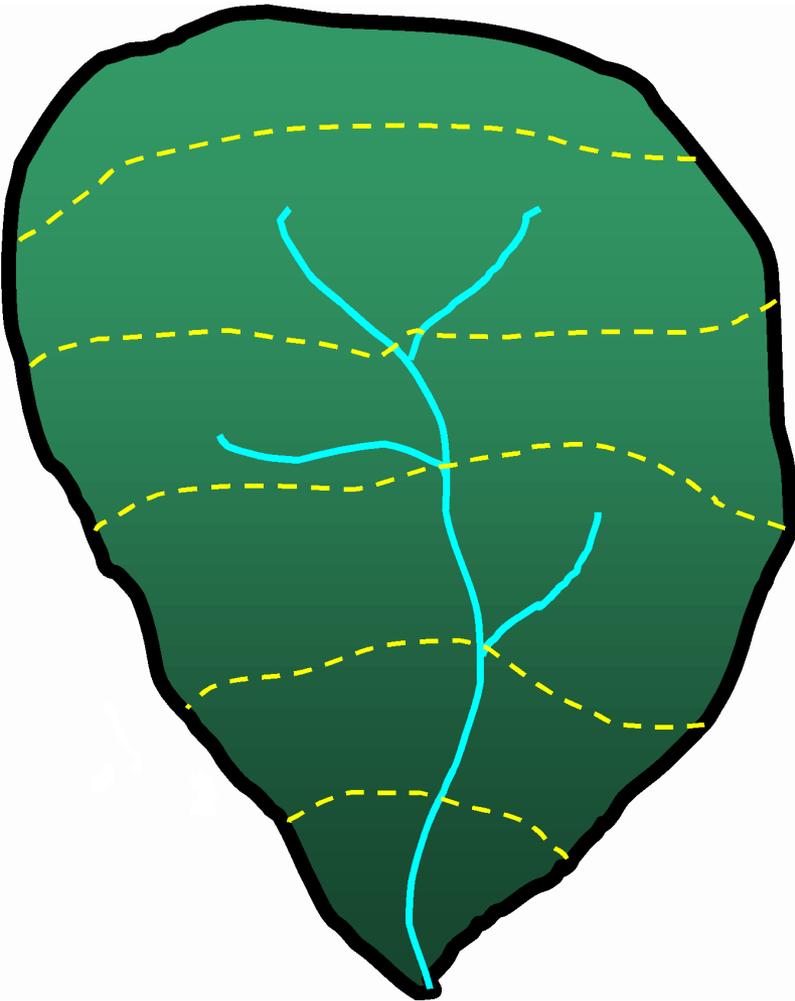


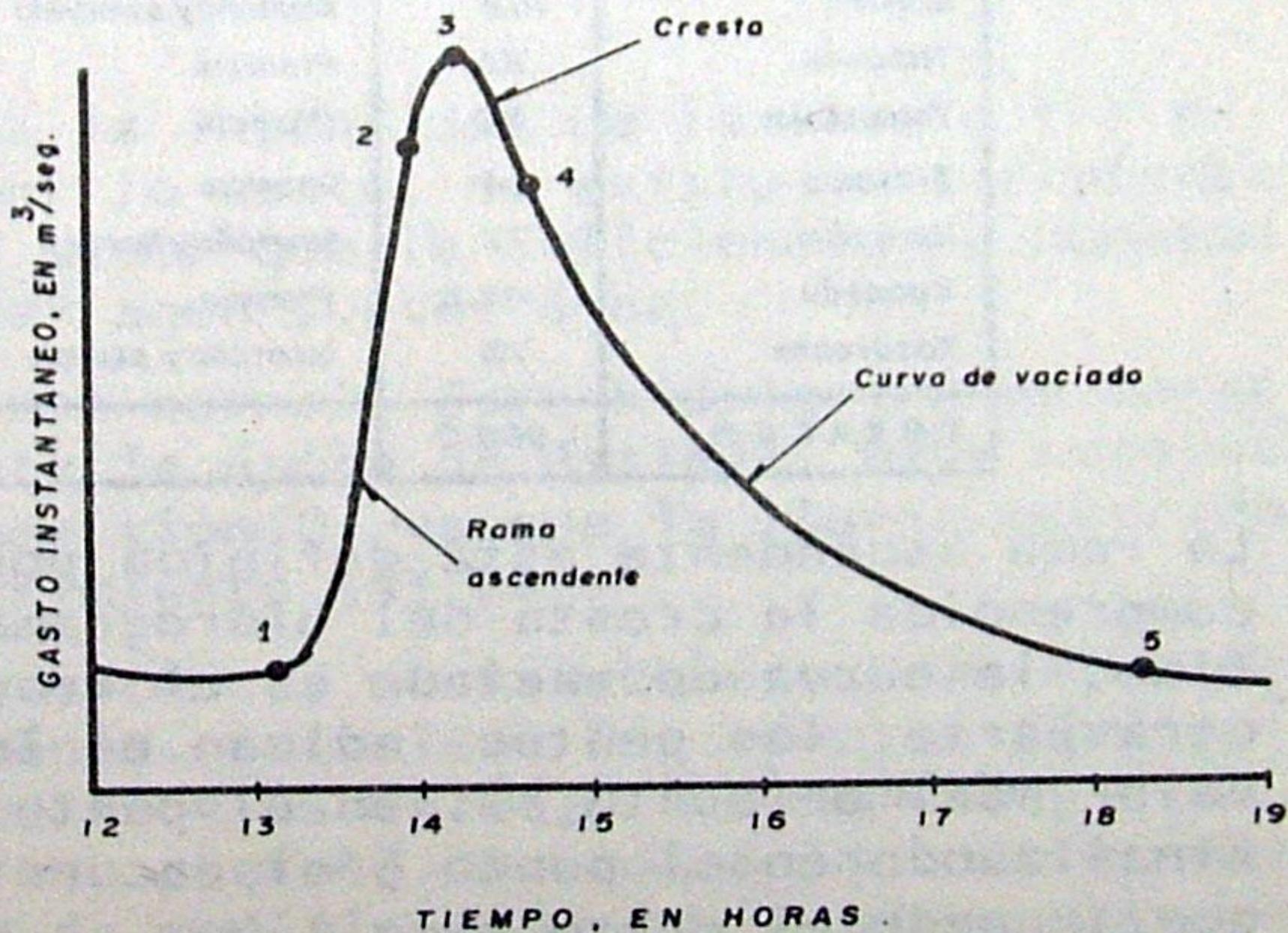
Figure 8.7 Hyetogram and hydrograph resulting from a storm event (rain - flow) [Musy, 2001]

Tiempo de concentración (T_c)



El tiempo de escurrimiento desde la parte hidráulicamente más distante de la cuenca a la salida.

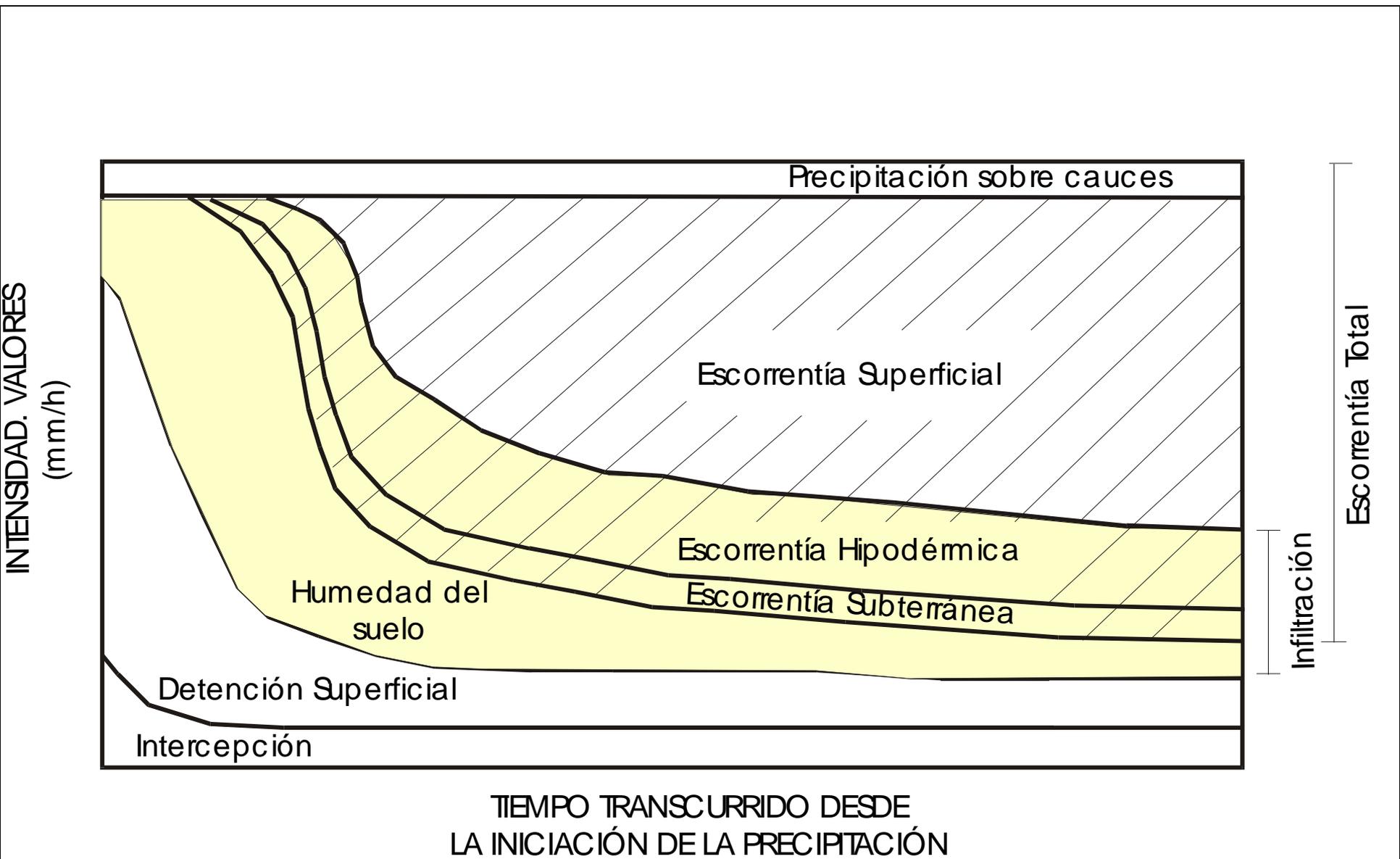
HIDROGRAMA DE TORMENTA AISLADA.



Hidrograma

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

Escorrentía



Escorrentía

4. Factores que influyen

- **Meteorológicos**
- **Geográficos**
- **Hidrogeológicos**
- **Biológicos**

5. Cálculo

5.1. A partir de datos de aforos

Escorrentía

5. Cálculo

5.2. Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía C surge del cociente entre la escorrentía superficial provocada por una lluvia y la precipitación caída.
Adimensional entre 0 y 1

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

Escorrentía

5. Cálculo

5.2. Coeficiente de escorrentía

Estimación mediante tablas

Tabla 5.1. Tabla de Prevert (1986).

Uso del suelo	Pendiente (%)	Textura del suelo		
		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

• Prevert

Escorrentía

5. Cálculo

5.2. Coeficiente de escorrentía

Estimación mediante tablas

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		

• Nadal

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

Escorrentía

5. Cálculo

5.2. Coeficiente de escorrentía

Estimación directa: Método del Número de Curva

Escorrentía

5. Cálculo

5.2. Caudal

Caudal máximo esperado

- **Expresión**

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

A = área de la cuenca (Km^2)

I = intensidad del aguacero (mm/h)

C = coeficiente de escorrentía

Q = caudal máximo instantáneo (m^3/s)

Interrelaciones ambientales y antropogénicas en los cuerpos de agua

Emisiones y precipitación

