

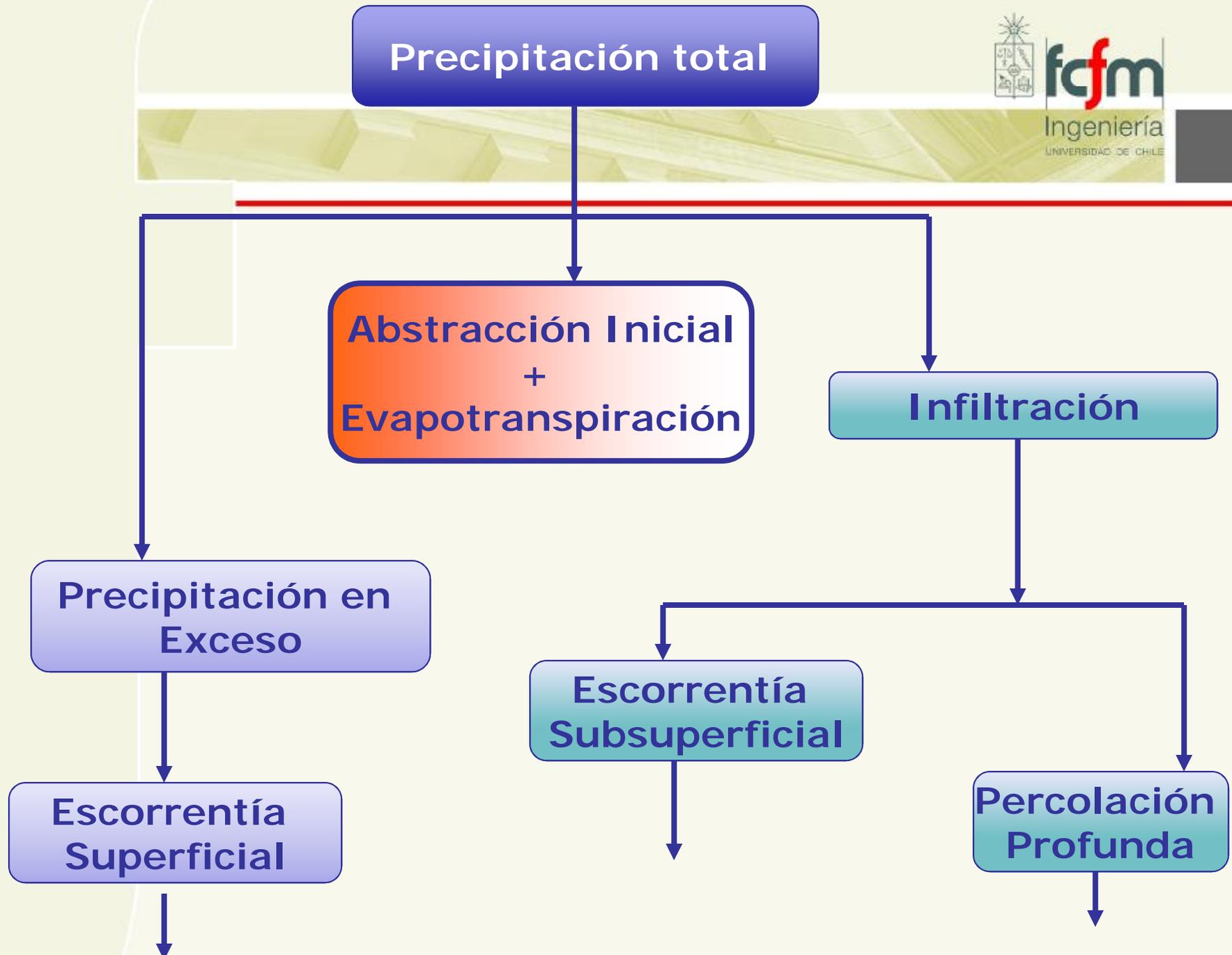


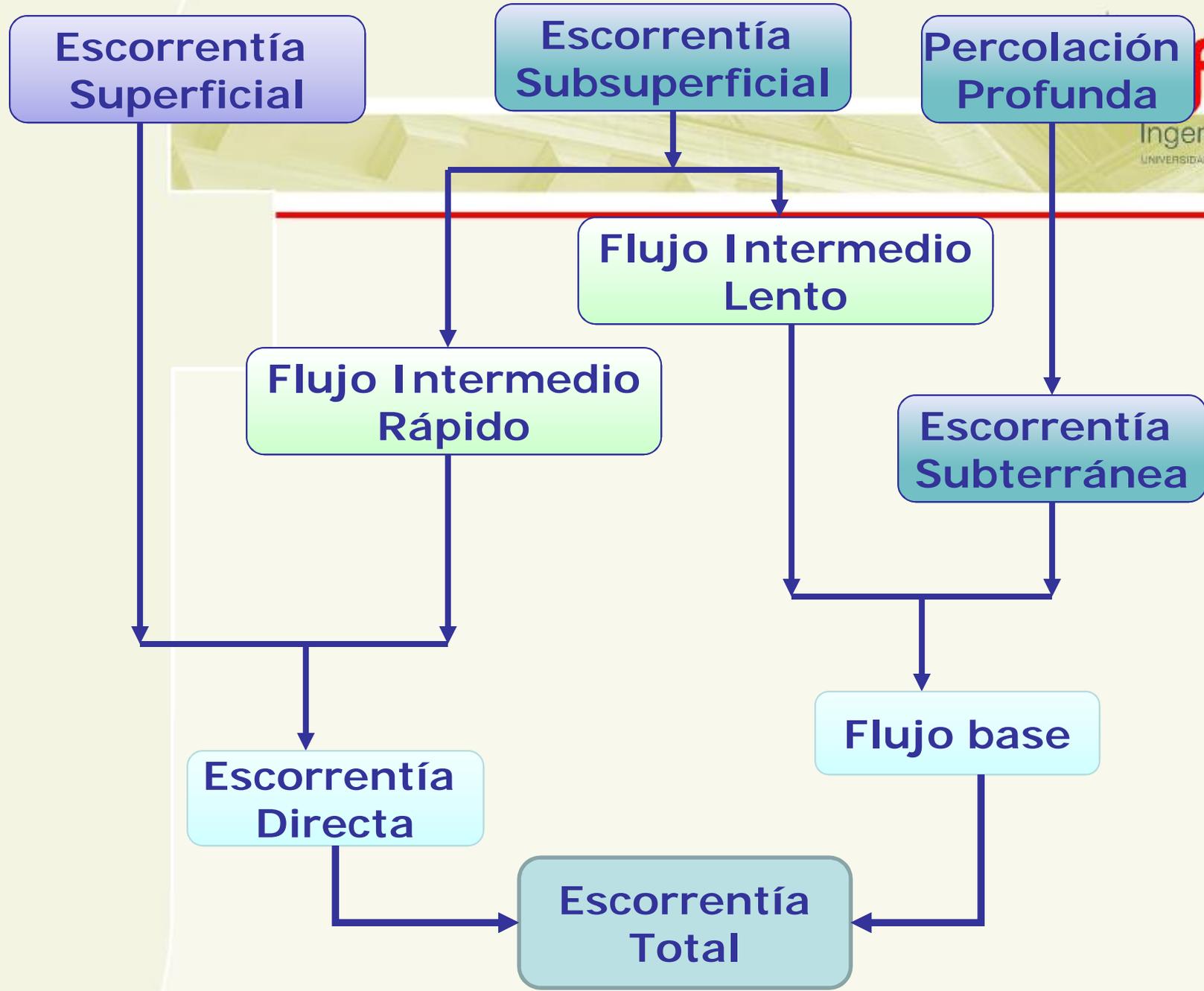
fcfm
Ingeniería
UNIVERSIDAD DE CHILE

Infiltración y Escorrentía

James McPhee

Departamento de Ingeniería Civil
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile





Infiltración

- Definición: el paso de agua, a través de la superficie del suelo, hacia el perfil de suelo
- Necesaria para crecimiento vegetal
- Contribuye a suministro de aguas subterráneas
- Control de escorrentía y erosión
- Control de transporte de sedimentos y contaminantes hacia cuerpos de agua superficial

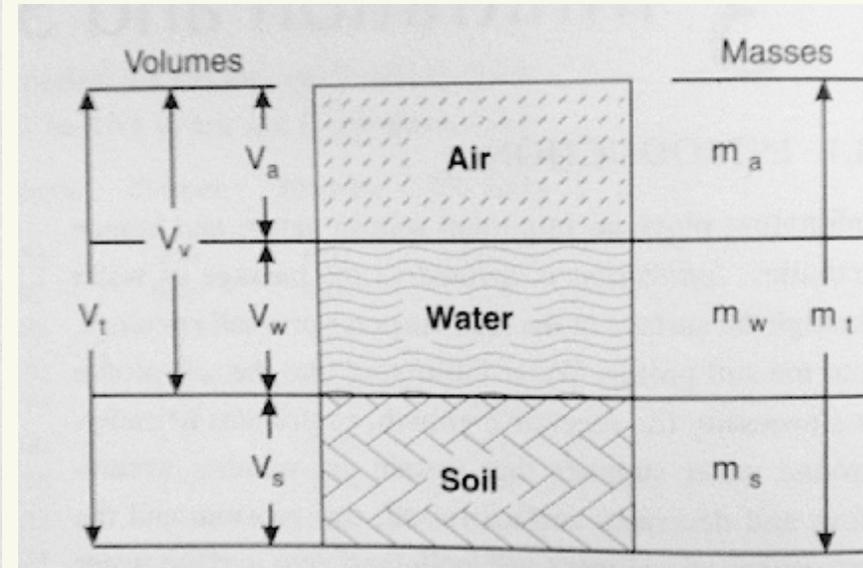
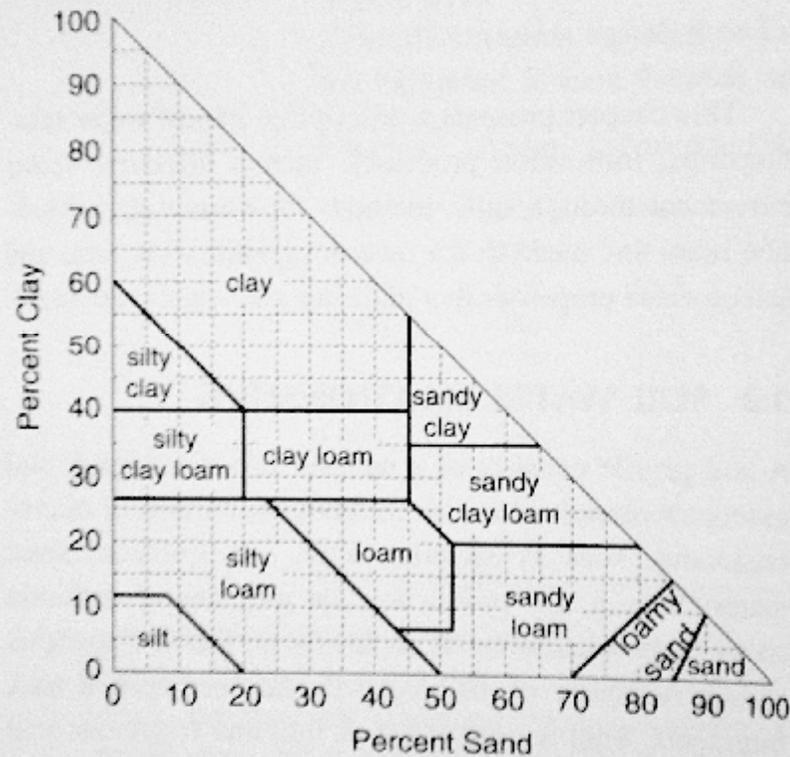
Infiltración

- Procesos complejos y difíciles de cuantificar
- Métodos de estimación
 - Ecuaciones teóricas basadas en física de los procesos
 - Ecuaciones empíricas con parámetros con significado físico
 - Ecuaciones empíricas con parámetros sin significado físico
 - Medición *in situ*

Infiltración: relaciones agua suelo

CE USBR	Fines (clay or silt)			Fine Sand		Coarse Sand		
AASHO ASTM	Colloids	Clay	Silt	Fine Sand		Coarse Sand		
USDA	Clay	Silt		Very Fine Sand	Fine Sand	Medium Sand	Coarse Sand	Very Coarse Sand
ISSS	Clay	Silt	Fine Sand		Coarse Sand			
	0.0002	0.002	0.02	0.2	2.0			
	Particle size, mm							

Infiltración: relaciones agua suelo



Infiltración: cantidades útiles

- Volumen total $V_t = V_a + V_w + V_s$
- Volumen de poros $V_v = V_a + V_w$
- Porosidad $n = \frac{V_v}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t}$
- Contenido de humedad $q_v = \frac{V_w}{V_t}$
- Grado de saturación $q_v = Sn$

Infiltración: cantidades útiles

- Masa total $m_t = m_a + m_w + m_s$
- Contenido gravimétrico de agua $q_g = \frac{m_w}{m_s}$
- Densidad aparente $r_b = \frac{m_t}{V_t}$
- Densidad aparente seca $r_{seca} = \frac{m_s}{V_t} = r_b(1 - n)$
- Gravedad específica $G_s = \frac{r_p}{r_w}$

Retención de agua en el suelo

- Combinación de *fuerzas gravitacionales* y tensión superficial
- Tensión superficial:



edo
mm

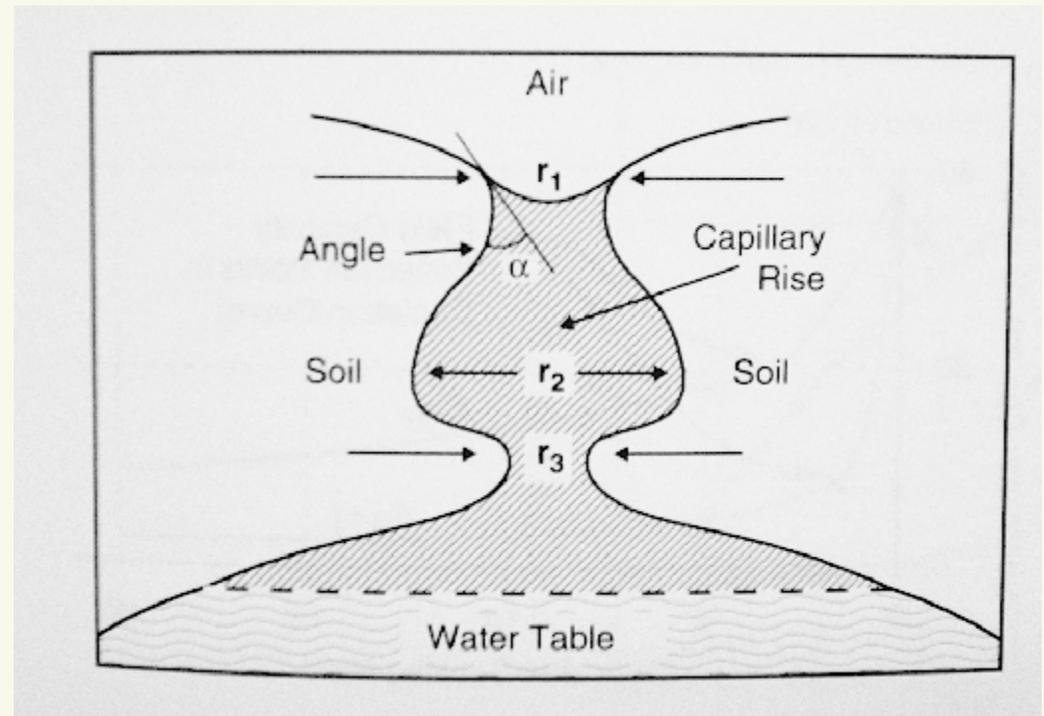


Muy seco

$> 25 \times 10^6$
mm

Retención de agua en el suelo

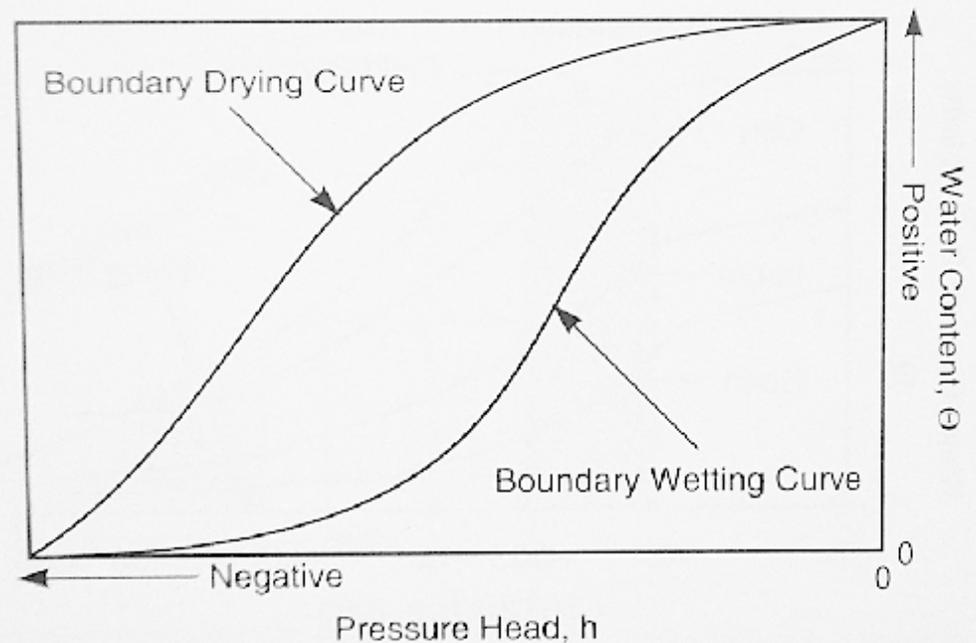
- En equilibrio,
$$(pr_1^2)hr_w = (2pr_1)t \cos a$$
- Poros pequeños se llenan (mojan) antes
- Poros grandes se vacían (secan) antes



Ward & Trimble, Environmental Hydrology (2004)

Retención de agua en el suelo

- Durante mojado, gravedad y tensión actúan en el mismo sentido
- Durante secado, gravedad extrae agua desde el poro, mientras que tensión intenta retener agua en éste

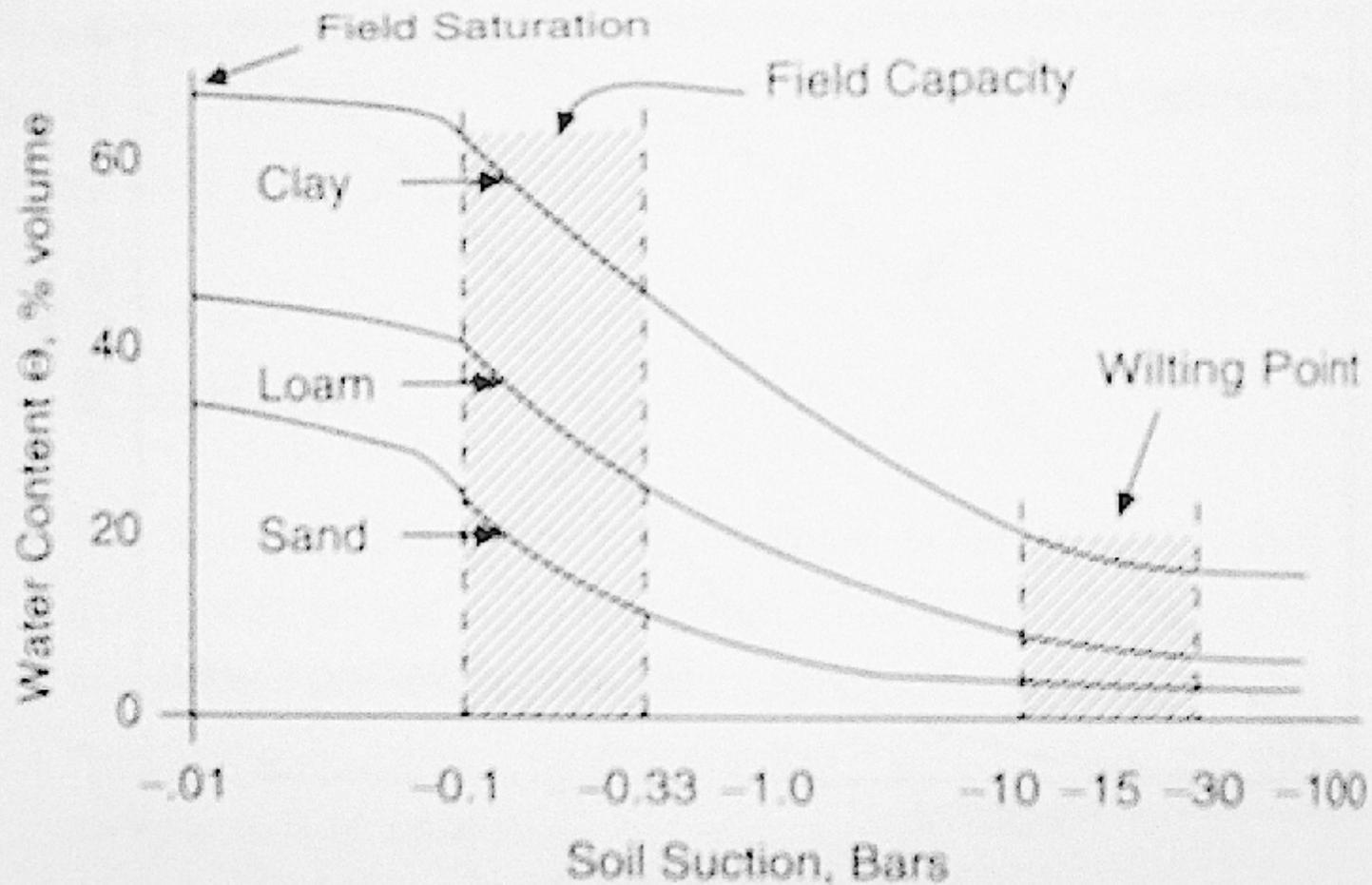


Ward & Trimble, Environmental Hydrology (2004)

Retención de agua en el suelo

- *Capacidad de Campo (FC)*: grado de saturación al cual no existe flujo gravitacional
- *Punto de marchitez*: contenido de humedad al cual plantas comienzan a marchitarse y no recuperan turgidez si se moja el suelo

Retención de agua en el suelo



Flujo

- Nivel piezométrico
- Viscosidad
- Química agua
- Química suelo
- Temperatura
- Presencia aire

Superficie suelo

- Uso suelo
- Cubierta vegetal
- Rugosidad
- Encostramiento
- Sello

INFILTRACION

Influencias

- Procesos mecánicos
- Escarcha
- Materia orgánica
- Compactación
- Humedad antecedente
- Actividad química
- Actividad biológica
- Actividad microbiana

Hidrofobicidad

- Sequedad
- Calor
- Químicos vegetales
- Aceites aromáticos
- Otros químicos

Condiciones subsuperficiales

- Suelo
 - Grupo hidrológico
 - Textura
 - Porosidad
 - Profundidad
 - Estructura de capas
 - Variabilidad espacial
 - Estructura
- Sistema de raíces
- Prof. Nivel freático
- Drenaje subsuperficial
- Conductividad hidráulica

Factores

Estimación de tasas de infiltración

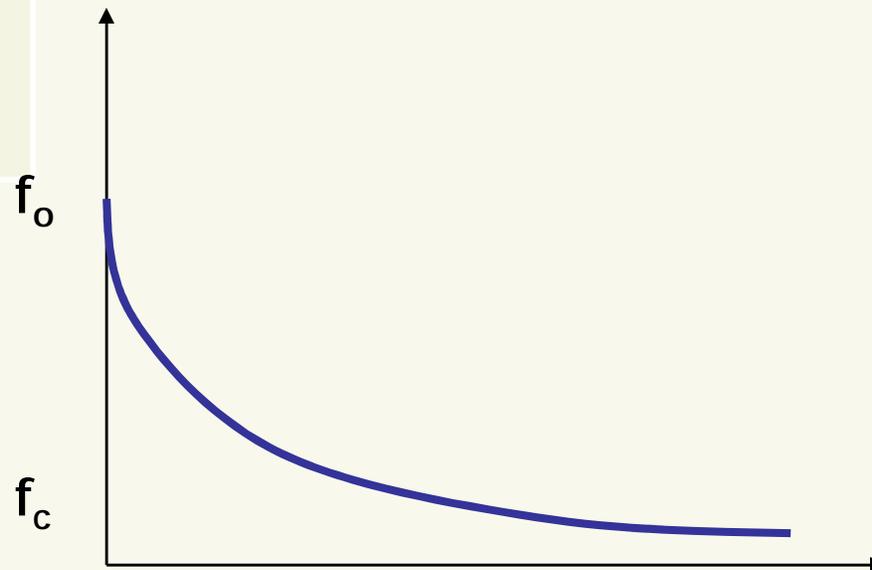
- Ecuación de Horton (1939)

Tasa de infiltr.
(L/T)

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-bt}$$

- + Ecuación simple
- + Se ajusta bien a datos empíricos
- + Pocos parámetros
- Sin significado físico
- Datos de terreno requeridos
- Se aplica sólo después de **encharcamiento**

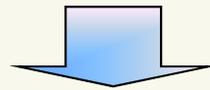
Supuestos Horton



corresponde a la solución de la ecuación de Richards para la tasa de difusión de humedad ($D(\delta\theta/\delta z)$) en la superficie del suelo, cuando se considera que K y D son constantes independientes de la humedad del suelo.

Metodo de Philip

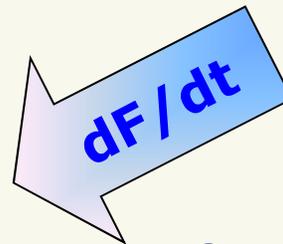
Solucion de ecuacion de Richards suponiendo que K y D pueden variar con el contenido de humedad θ .



transformación de Boltzman $B(\theta) = zt^{-1/2}$

infiltración acumulada $F(t)$:

$$f(t) = \frac{1}{2} St^{-1/2} + K$$



dF/dt

$$F(t) = St^{1/2} + Kt$$

Sorptividad o Adsorción

Philip

Potencial capilar en el frente de humedad

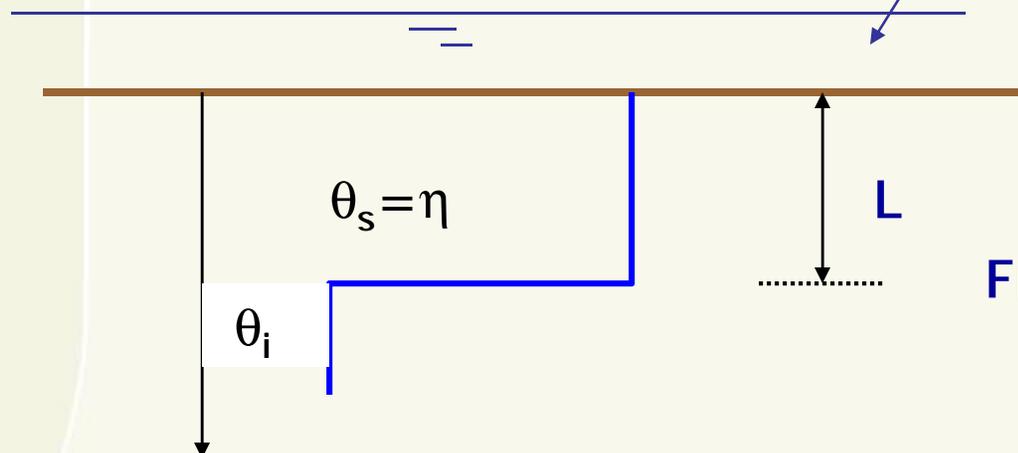


permeabilidad

$$f = \frac{dF}{dt} = \frac{k}{m} \left(1 + \frac{(q - q_i)(y + H)}{F} \right)$$

viscosidad

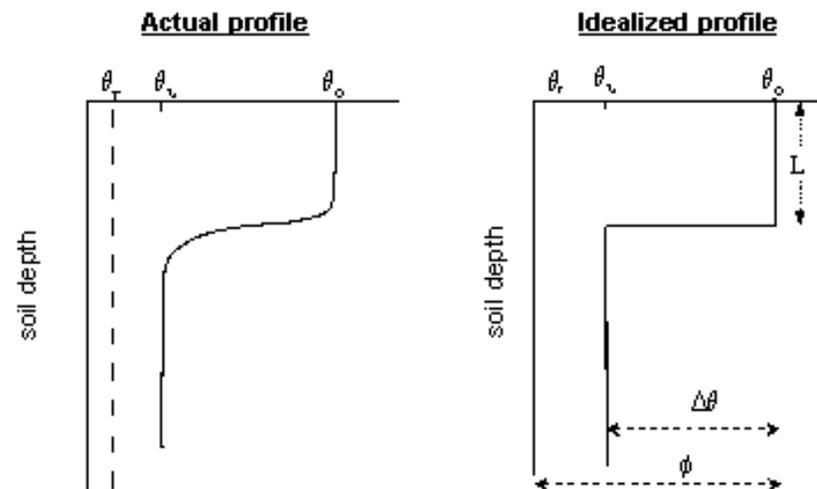
Profundidad de agua sobre el suelo



Frente húmedo

- Método de Green-Ampt (1911)

- Basado en analogía física con solución analítica exacta
- Supone precipitación constante
- Se basa en Ley de Darcy



Green-Ampt (cont.)

- La tasa de infiltración,

Prof. Agua encharcada

Succión efectiva en frente de mojado

$$f = K \frac{(h_0 + S_w + L)}{L}$$

Conductividad hidráulica zona transmisión

Prof. Frente de mojado

- Se define F como la infiltración acumulada
- Dado que $F = L(h - q_i) = L\Delta q$

$$F(t) - S_w \Delta q \ln \left(1 + \frac{F(t)}{S_w \Delta q} \right) = Kt$$

$$f(t) = K \left(1 + \frac{S_w \Delta q}{F(t)} \right)$$

Parámetros del modelo de Green-Ampt

- Conductividad hidráulica, K
- Porosidad, n
- Potencial de succión en el *frente de mojado*, S_w
- Porosidad efectiva, $n_e = n - n_r$
- Saturación efectiva, $s_e = (n - n_r) / (n - n_r)$
- Brooks-Corey (1964): $s_e = [y_b / y]^l$

TABLA 4.3.1
Parámetros de infiltración de Green–Ampt para varias clases de suelos

Clase de suelo	Porosidad	Porosidad efectiva	Cabeza de succión del suelo en el frente de mojado	Conductividad hidráulica
	η	θ_e	ψ (cm)	K (cm/h)
Arena	0.437 (0.374–0.500)	0.417 (0.354–0.480)	4.95 (0.97–25.36)	11.78
Arena margosa	0.437 (0.363–0.506)	0.401 (0.329–0.473)	6.13 (1.35–27.94)	2.99
Marga arenosa	0.453 (0.351–0.555)	0.412 (0.283–0.541)	11.01 (2.67–45.47)	1.09
Marga	0.463 (0.375–0.551)	0.434 (0.334–0.534)	8.89 (1.33–59.38)	0.34
Marga limosa	0.501 (0.420–0.582)	0.486 (0.394–0.578)	16.68 (2.92–95.39)	0.65
Marga arenoarcillosa	0.398 (0.332–0.464)	0.330 (0.235–0.425)	21.85 (4.42–108.0)	0.15
Marga arcillosa	0.464 (0.409–0.519)	0.309 (0.279–0.501)	20.88 (4.79–91.10)	0.10
Marga limo–arcillosa	0.471 (0.418–0.524)	0.432 (0.347–0.517)	27.30 (5.67–131.50)	0.10
Arcilla arenosa	0.430 (0.370–0.490)	0.321 (0.207–0.435)	23.90 (4.08–140.2)	0.06
Arcilla limosa	0.479 (0.425–0.533)	0.423 (0.334–0.512)	29.22 (6.13–139.4)	0.05
Arcilla	0.475 (0.427–0.523)	0.385 (0.269–0.501)	31.63 (6.39–156.5)	0.03

Los números entre paréntesis debajo de cada parámetro son una desviación estándar alrededor del valor del parámetro dado. Fuente: Rawls, Brakensiek y Miller, 1983.

Ejemplo:

- Calcule la tasa de infiltración f y la infiltración acumulada F después de 1 hr de precip. sobre un suelo limoso de marga que tenía una saturación efectiva inicial del 30%.

Tiempo de encharcamiento

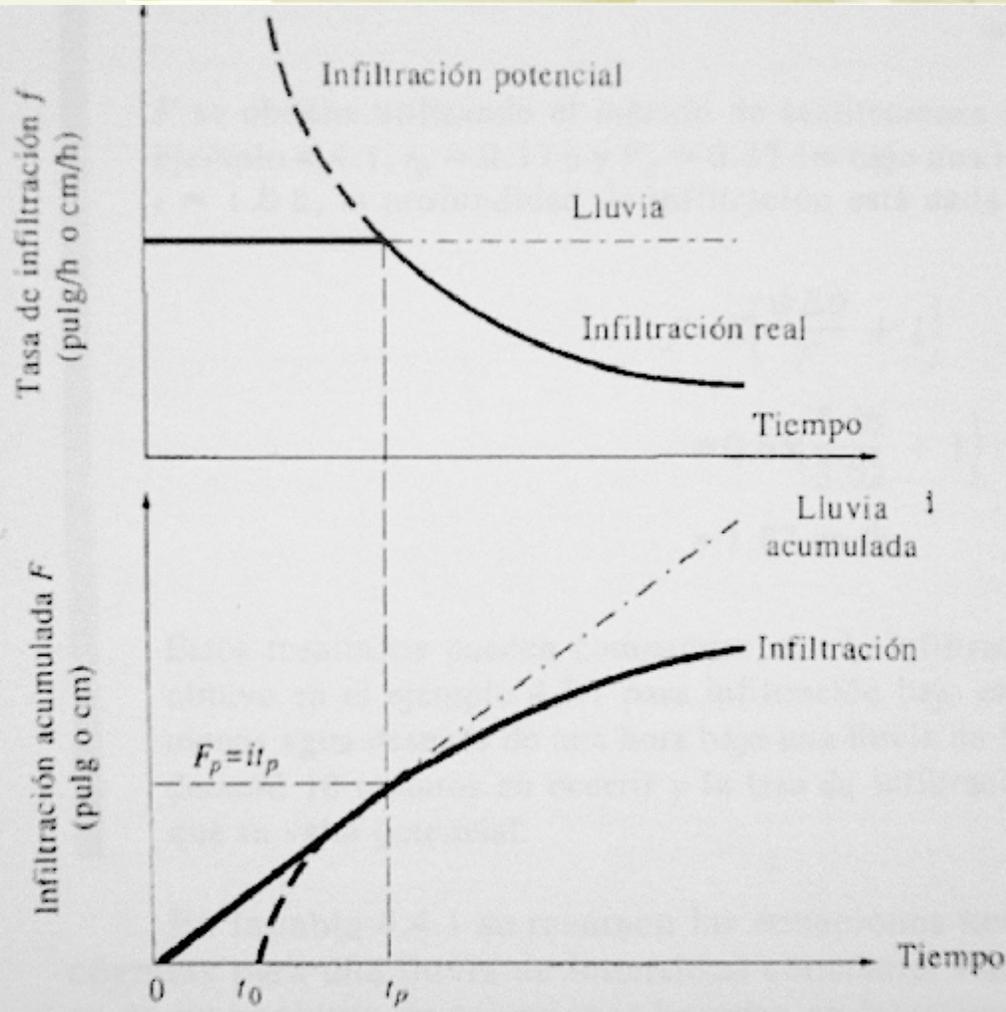
- Los métodos revisados hasta el momento suponen que sobre el suelo existe una **lámina de agua** que suministra de humedad al suelo
- Durante una tormenta, el agua se encharcará sólo si la **intensidad de lluvia, i** , es mayor que la capacidad de infiltración
- **Tiempo de encharcamiento (t_p)**: lapso entre comienzo de la lluvia e inicio de apozamiento del agua sobre la superficie del suelo

Tiempo de encharcamiento

- Principios:
 - Antes de t_p toda la lluvia se infiltra
 - Infiltración potencial, f , es función de infiltración acumulada, F
 - Encharcamiento ocurre cuando cuando $f < i$
- A partir de Green-Ampt, en $t=t_p$:

$$F_p = i \times t_p$$

$$f = i$$



$$i = K \left(\frac{S_w \Delta q}{i t_p} + 1 \right)$$

$$t_p = \frac{K S_w \Delta q}{i(i - K)}$$

Supone
intensidad
 $i = \text{constante}$

Después del encharcamiento...

$$F(t) - F_p - S_w \Delta q \ln \left(\frac{S_w \Delta q + F(t)}{S_w \Delta q + F_p} \right) = K (t - t_p)$$

- Es decir, primero se infiltra F_p y luego se continúa el análisis como si se tratara de una lluvia de intensidad constante comenzada en t_p