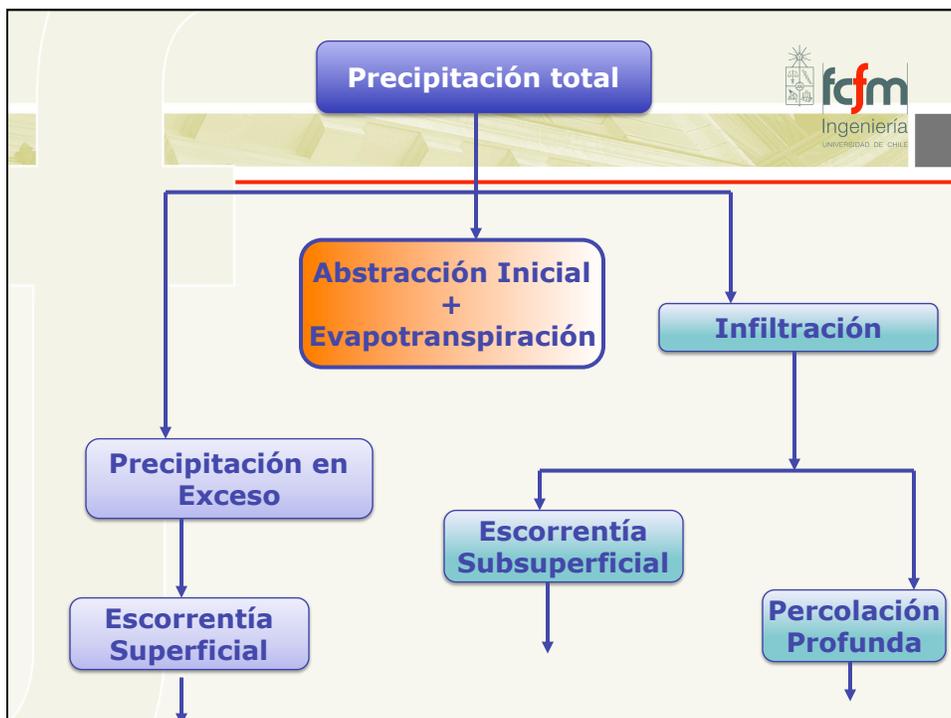
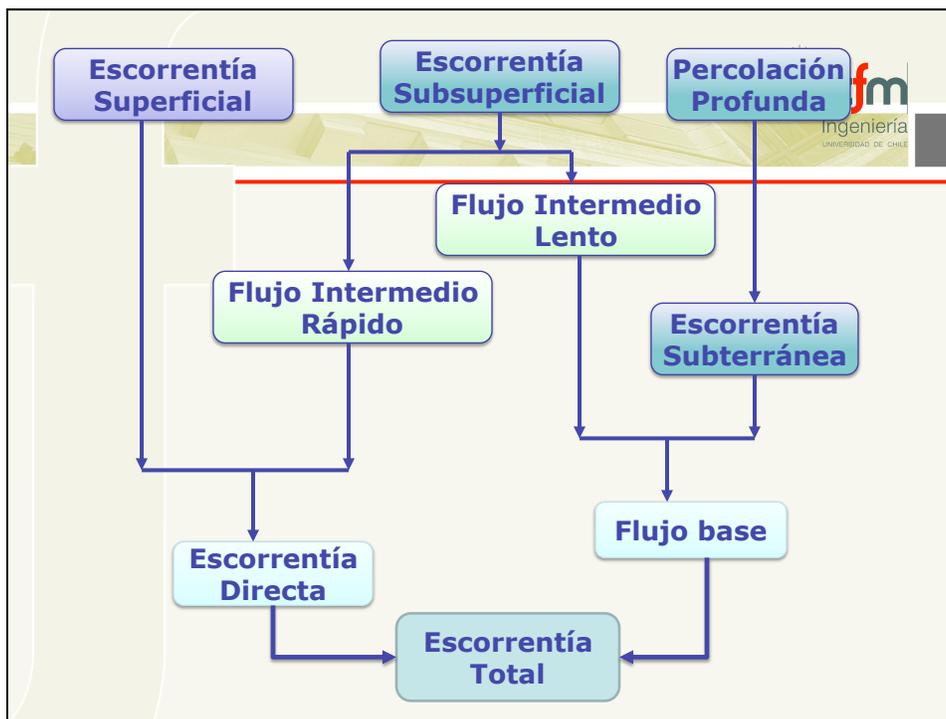




# Infiltración y Escorrentía

**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 escoorrentía y erosión
- Control de transporte de sedimentos y contaminantes hacia cuerpos de agua superficial

# Infiltración



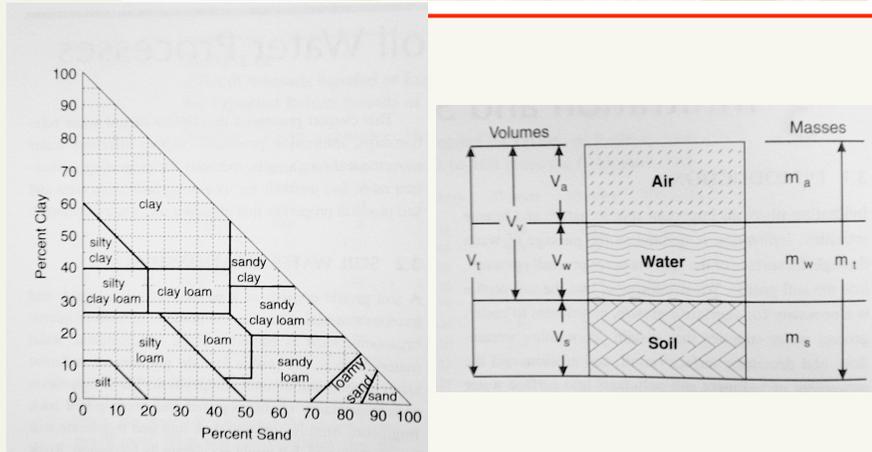
- Procesos complejos y difíciles de cuantificar
- Métodos de estimación
  - Ecuaciones teóricas basadas en física de los procesos
  - Ecuaciones empíricas con parámetros con significado físico
  - Ecuaciones empíricas con parámetros sin significado físico
  - Medición *in situ*

# Infiltración: relaciones agua suelo



CE USBR	Fines (clay or silt)			Fine Sand	Coarse Sand			
AASHTO 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  $\theta_v = \frac{V_w}{V_t}$
- Grado de saturación  $\theta_v = S n$

## Infiltración: cantidades útiles



- Masa total  $m_t = m_a + m_w + m_s$
- Contenido gravimétrico de agua  $\theta_g = \frac{m_w}{m_s}$
- Densidad aparente  $\rho_b = \frac{m_t}{V_t}$
- Densidad aparente seca  $\rho_{seca} = \frac{m_s}{V_t} = \rho_b(1 - n)$
- Gravedad específica  $G_s = \frac{\rho_p}{\rho_w}$

## Retención de agua en el suelo



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

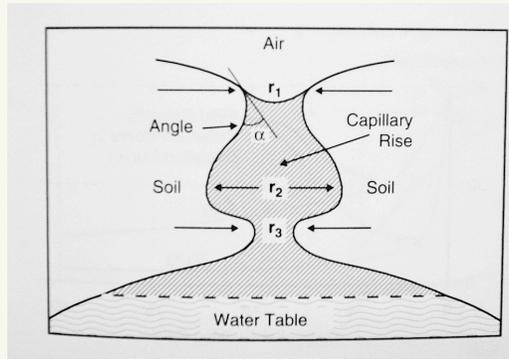


## Retención de agua en el suelo



- En equilibrio,  

$$(\pi r_1^2) h \rho_w = (2\pi r_1) \tau \cos \alpha$$
- Poros pequeños se llenan (mojan) antes
- Poros grandes se vacían (secan) antes

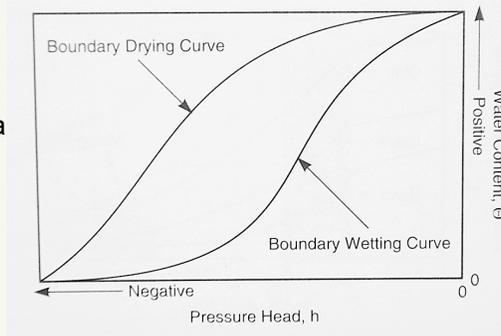


Ward & Trimble, Environmental Hydrology (2004)

## 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

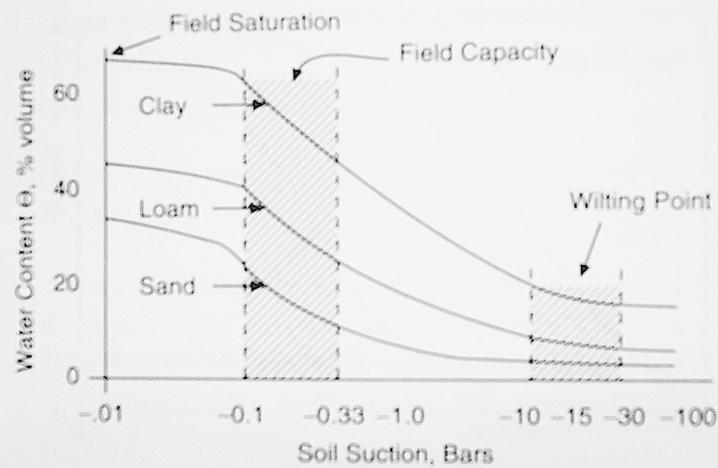


Ward & Trimble, Environmental Hydrology (2004)

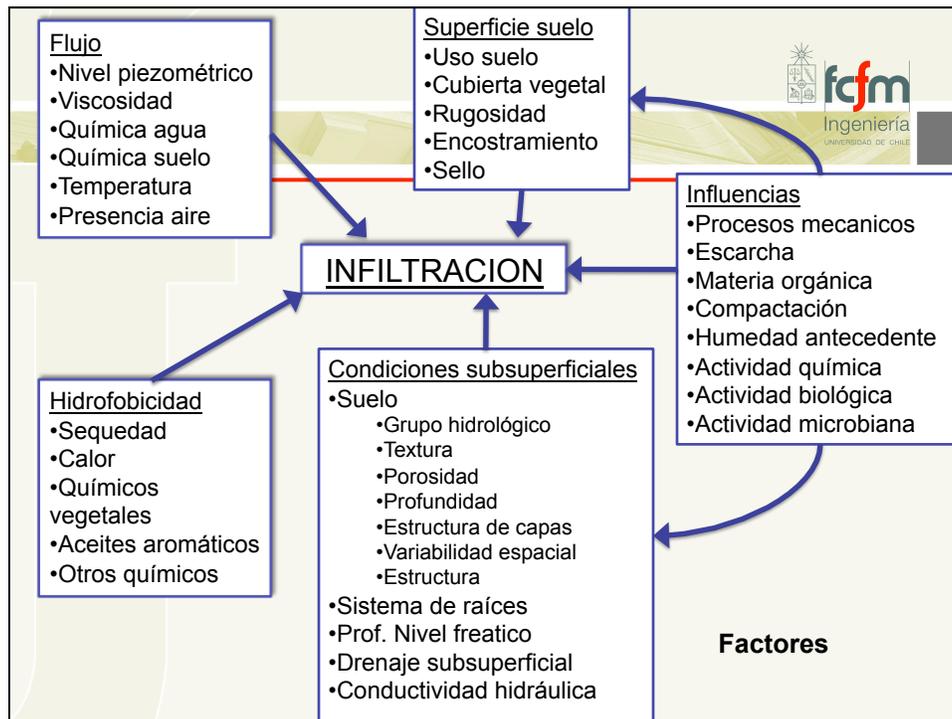
## Retención de agua en el suelo

- *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



Ward & Trimble, Environmental Hydrology (2004)



## Estimación de tasas de infiltración

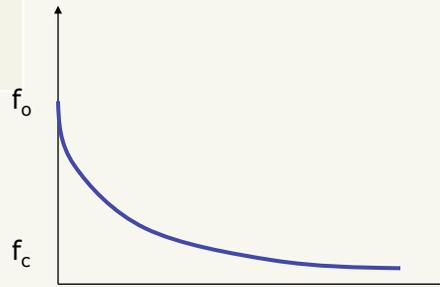
- Ecuación de Horton (1939)

Tasa de infiltr.  
(L/T)

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-\beta t}$$

- + 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 ( $D(d\theta/dz)$ ) 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  $\theta$ .**



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

**infiltración acumulada  $F(t)$ :**

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



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

**Sorptividad o Adsorción**

**Philip**

Potencial capilar en el frente de humedad

permeabilidad

viscosidad

Profundidad de agua sobre el suelo

$$f = \frac{dF}{dt} = \frac{k}{\mu} \left( 1 + \frac{(\theta - \theta_i)(\psi + H)}{F} \right)$$

$q_s = h$

$q_i$

$L$

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,

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

Diagram illustrating the components of the Green-Ampt infiltration rate equation:

- $h_0$ : Prof. Agua encharcada (Water table depth)
- $S_w$ : Succión efectiva en frente de mojado (Effective suction at the wetting front)
- $L$ : Prof. Frente de mojado (Wetting front depth)
- $K$ : Conductividad hidráulica zona transmisión (Hydraulic conductivity of the transmission zone)

- Se define  $F$  como la infiltración acumulada
- Dado que  $F = L(\eta - \theta_i) = L\Delta\theta$

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

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

## Parámetros del modelo de Green-Ampt

- Conductividad hidráulica,  $K$
- Porosidad,  $\eta$
- Potencial de succión en el *frente de mojado*,  $S_w$
- Porosidad efectiva,  $\theta_e = \eta - \theta_r$
- Saturación efectiva,  $s_e = \theta - \theta_r / \eta - \theta_r$
- Brooks-Corey (1964):  $s_e = [\psi_b / \psi]^\lambda$

AGUA SUBSUPERFICIAL

117

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
	$\eta$	$\theta_e$	$\psi$ (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



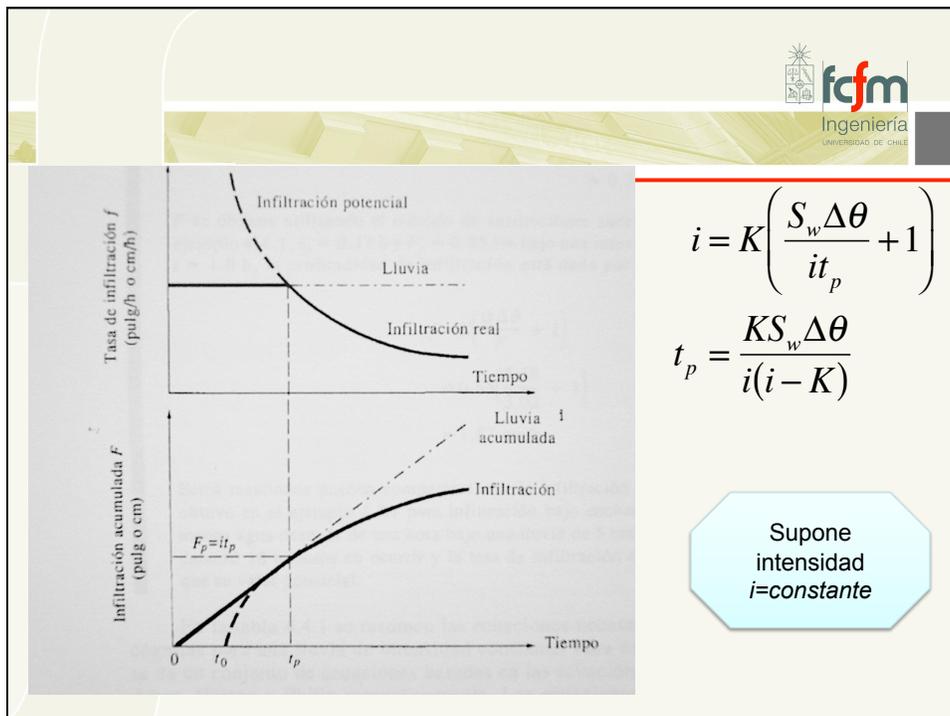
- Los métodos revisados hasta el momento suponen que sobre el suelo existe una **lámina de agua** que suministra de humedad al suelo
- Durante una tormenta, el agua se encharcará sólo si la **intensidad de lluvia,  $i$** , es mayor que la capacidad de infiltración
- **Tiempo de encharcamiento ( $t_p$ )**: 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  $t=t_p$ :

$$F_p = i \times t_p$$

$$f = i$$



Después del encharcamiento...



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

- 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  $t_p$