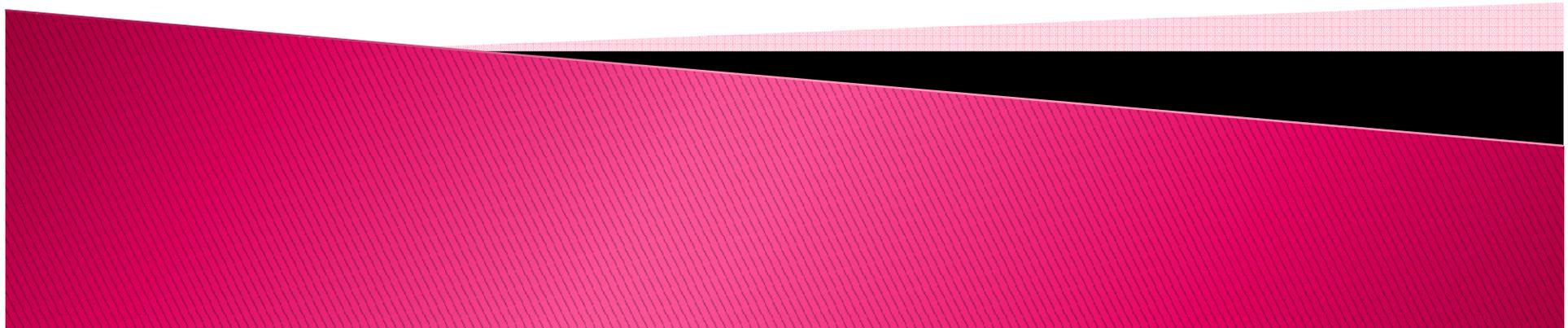




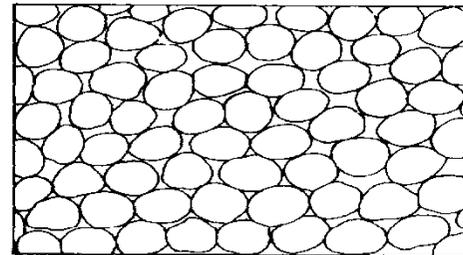
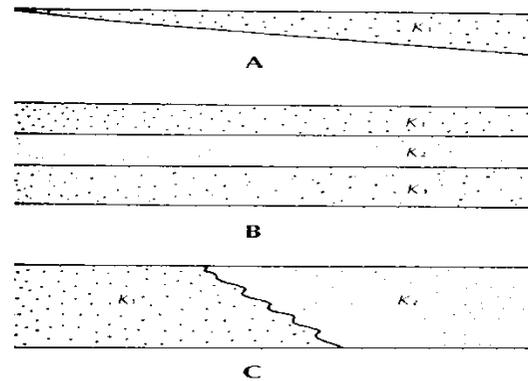
# **MOVIMIENTO DEL AGUA EN MEDIOS POROSOS**



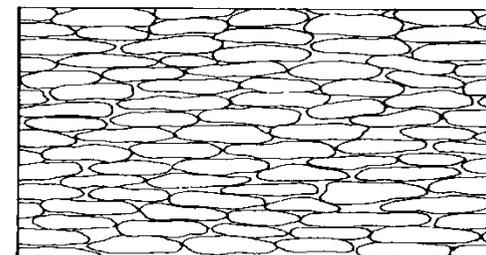
## EL AGUA EN EL SUELO

- Las prácticas del riego y avenamiento tienen como objetivo mantener una relación aire/agua en el suelo adecuados para la producción del cultivo
- Estudio de la filtración líquida producida por el gradiente de potencial hidráulico
- El movimiento del agua en el suelo está afectado por su estructura y las fuerzas con las que el agua queda retenida

# Caracterización del suelo

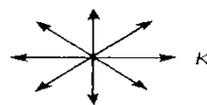


A

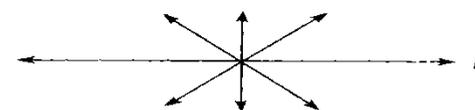


B

Isótropo



Anisótropo



# Caracterización del suelo

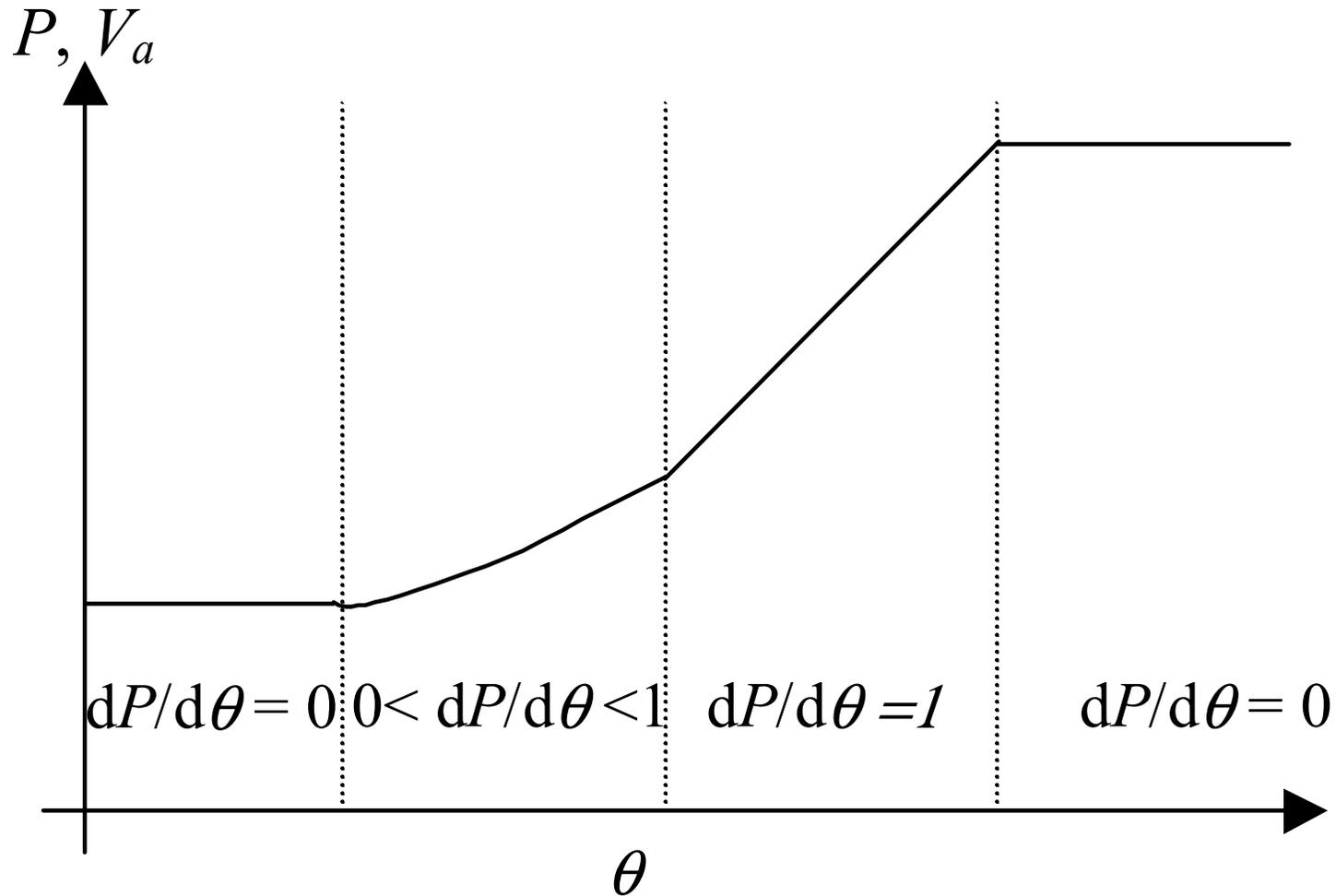
## Caracterización físico -química

### Porosidad

$$P = \frac{V_p}{V_s}$$

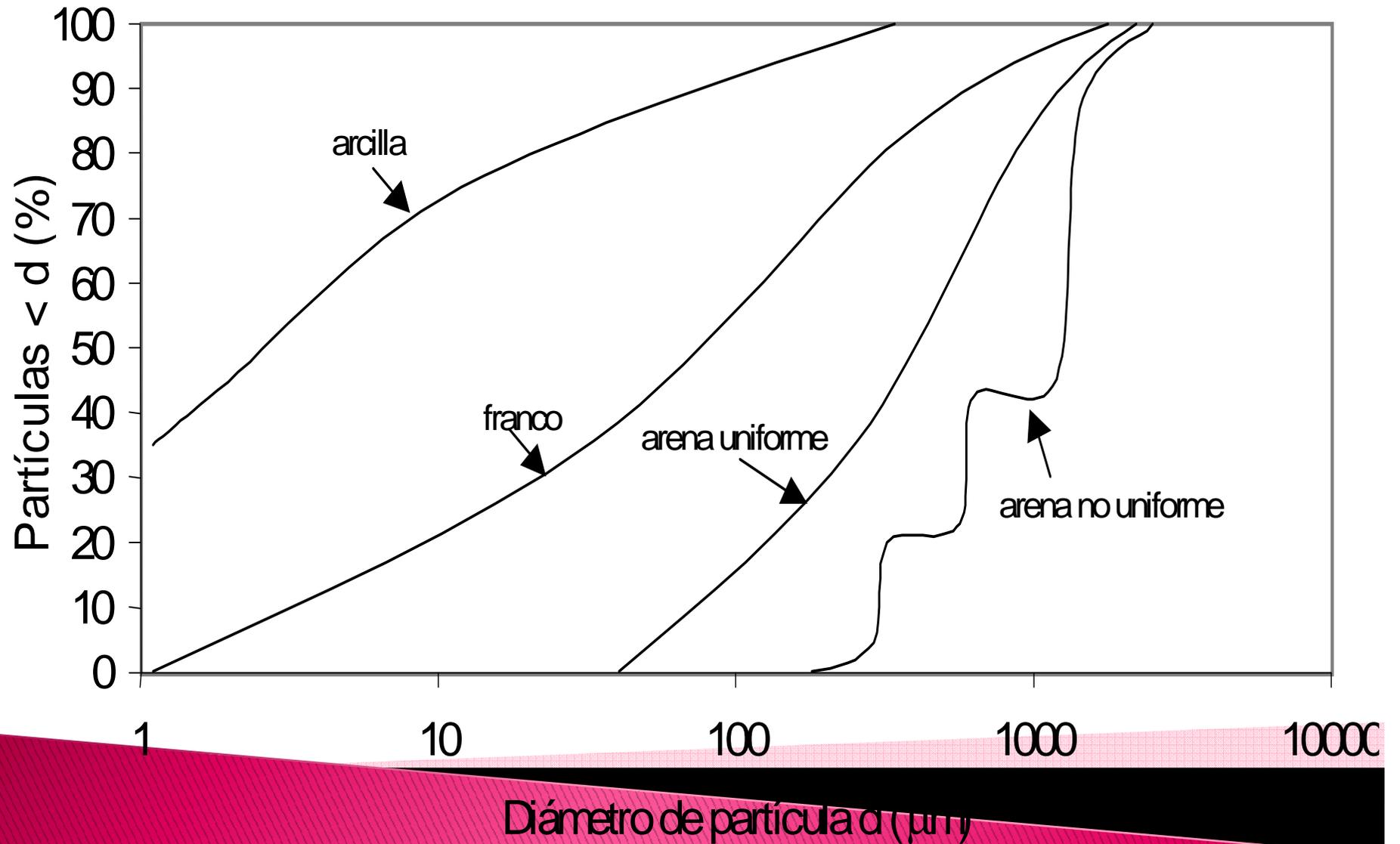
Suelo	Porosidad ( $P$ ) (%)	Densidad aparente ( $\rho_a$ ) (g/cm <sup>3</sup> )
Arenoso	36-56	1,16-1,70
Franco	30-55	1,20-1,85
Arcilloso	35-70	0,88-1,72

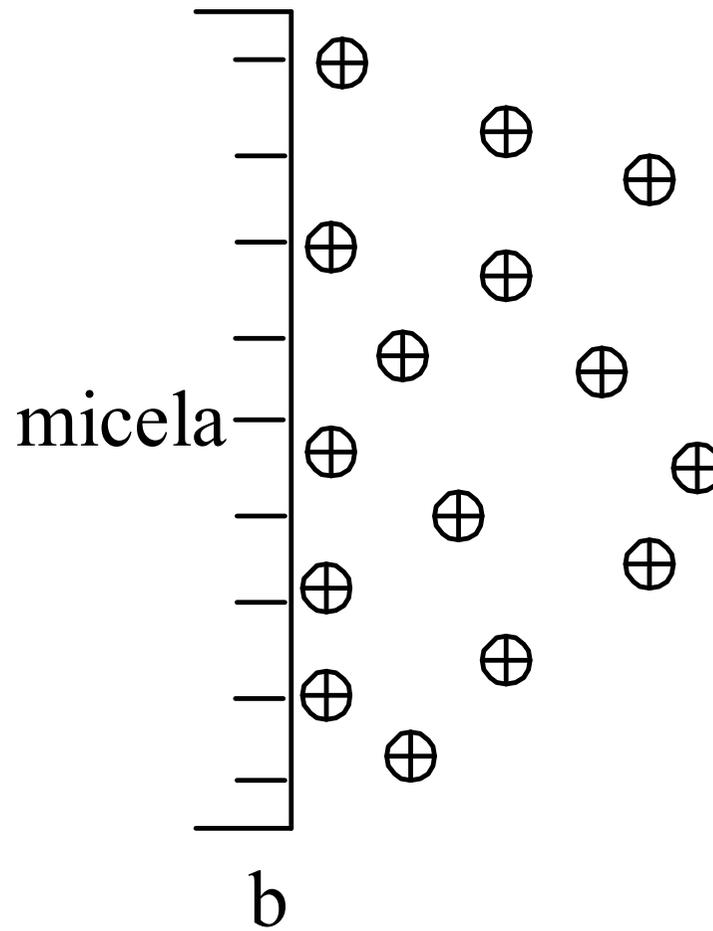
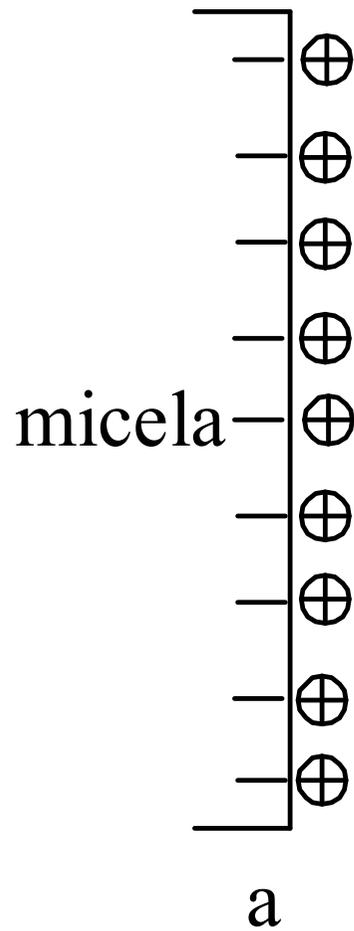
Intervalo típico de valores de  $P$  y  $\rho_a$  en distintos suelos



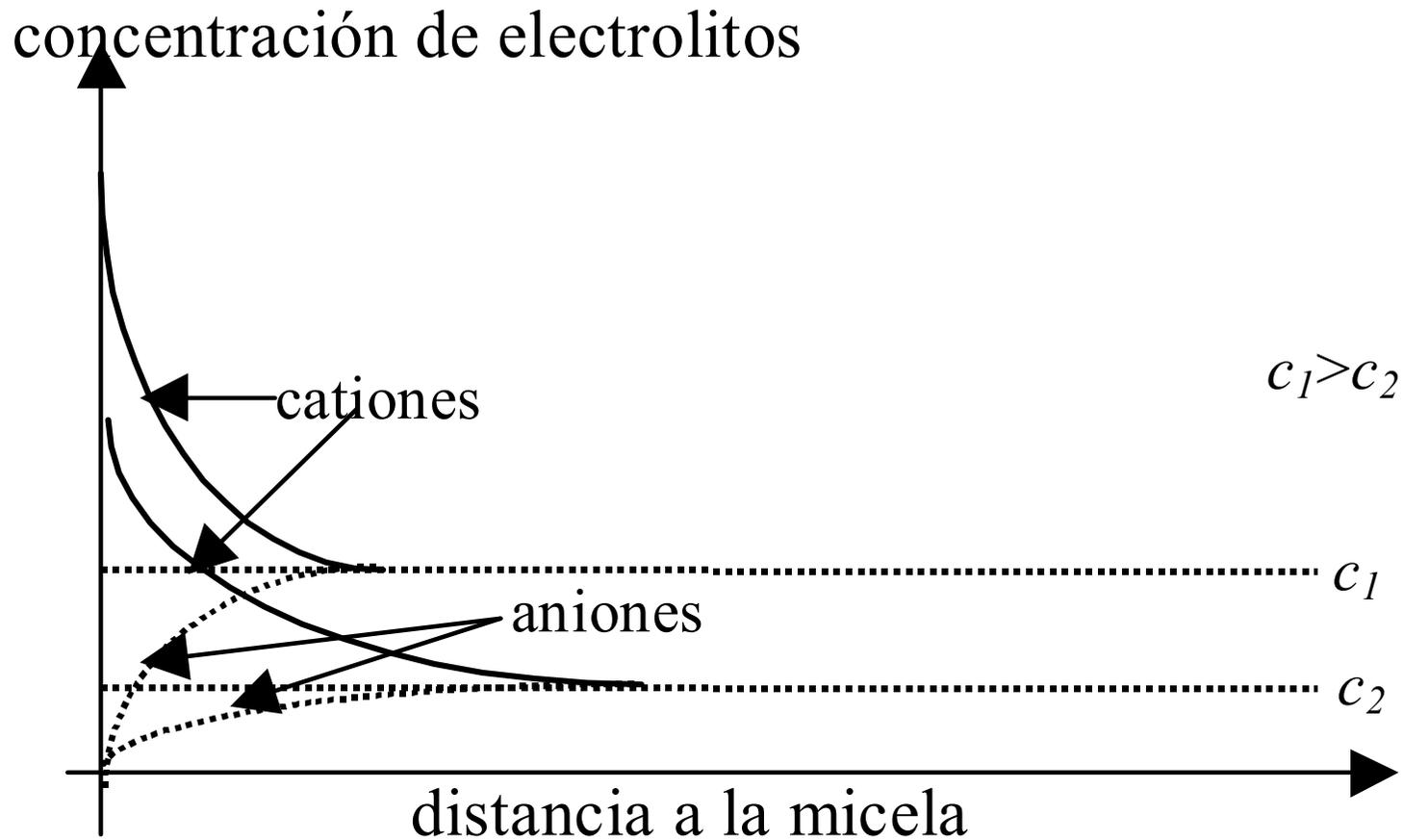
Variación de la porosidad  $P$  y volumen aparente  $V_a$  con el contenido de agua  $\theta$  en suelos con arcillas expandibles.

# CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

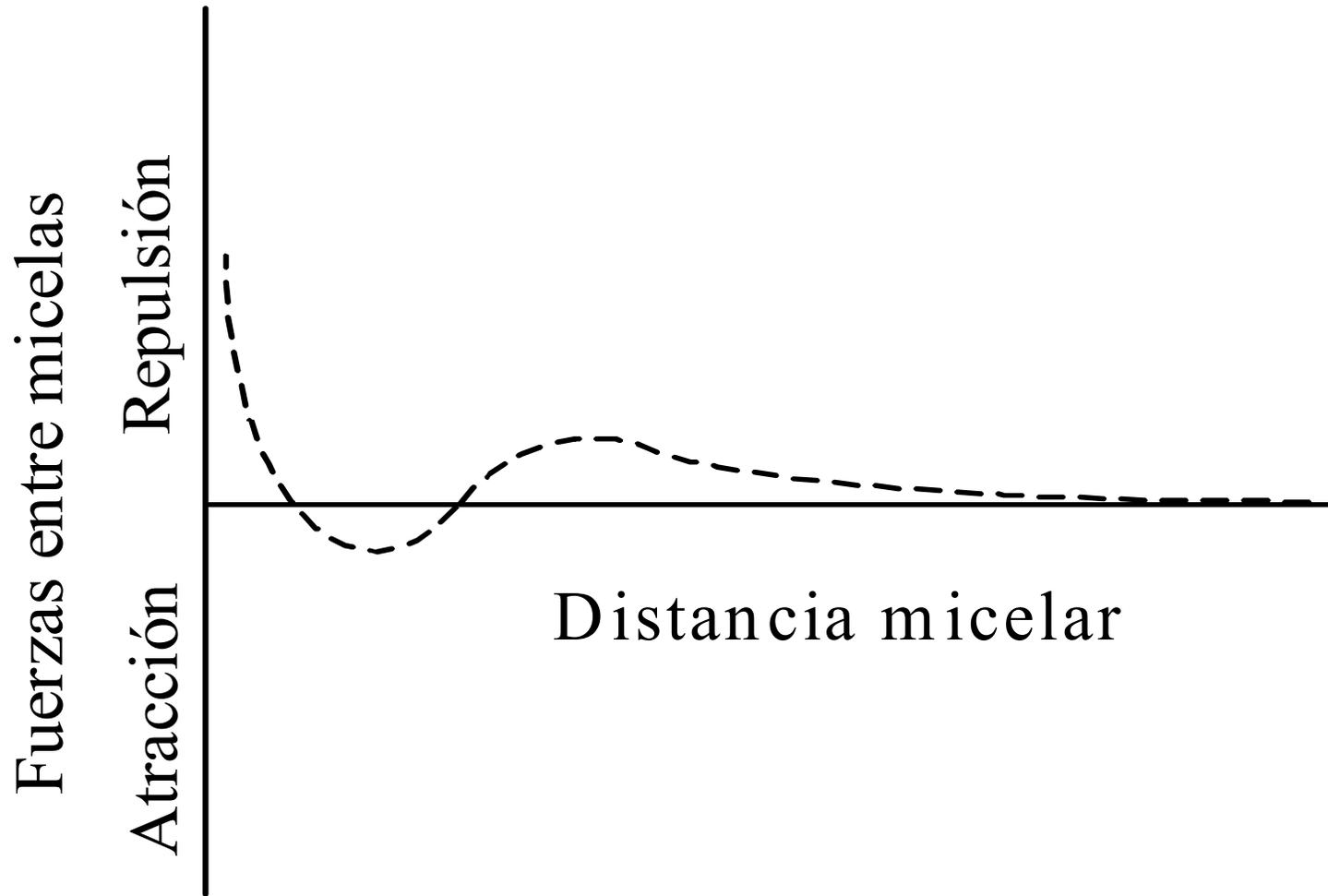




Formación de la doble capa electrostática: (a) micela seca y (b) micela hidratada.



Distribución de cationes y de aniones en las proximidades de la micela ( $c_1$  y  $c_2$  son concentraciones de electrolitos fuera de la influencia de la doble capa).



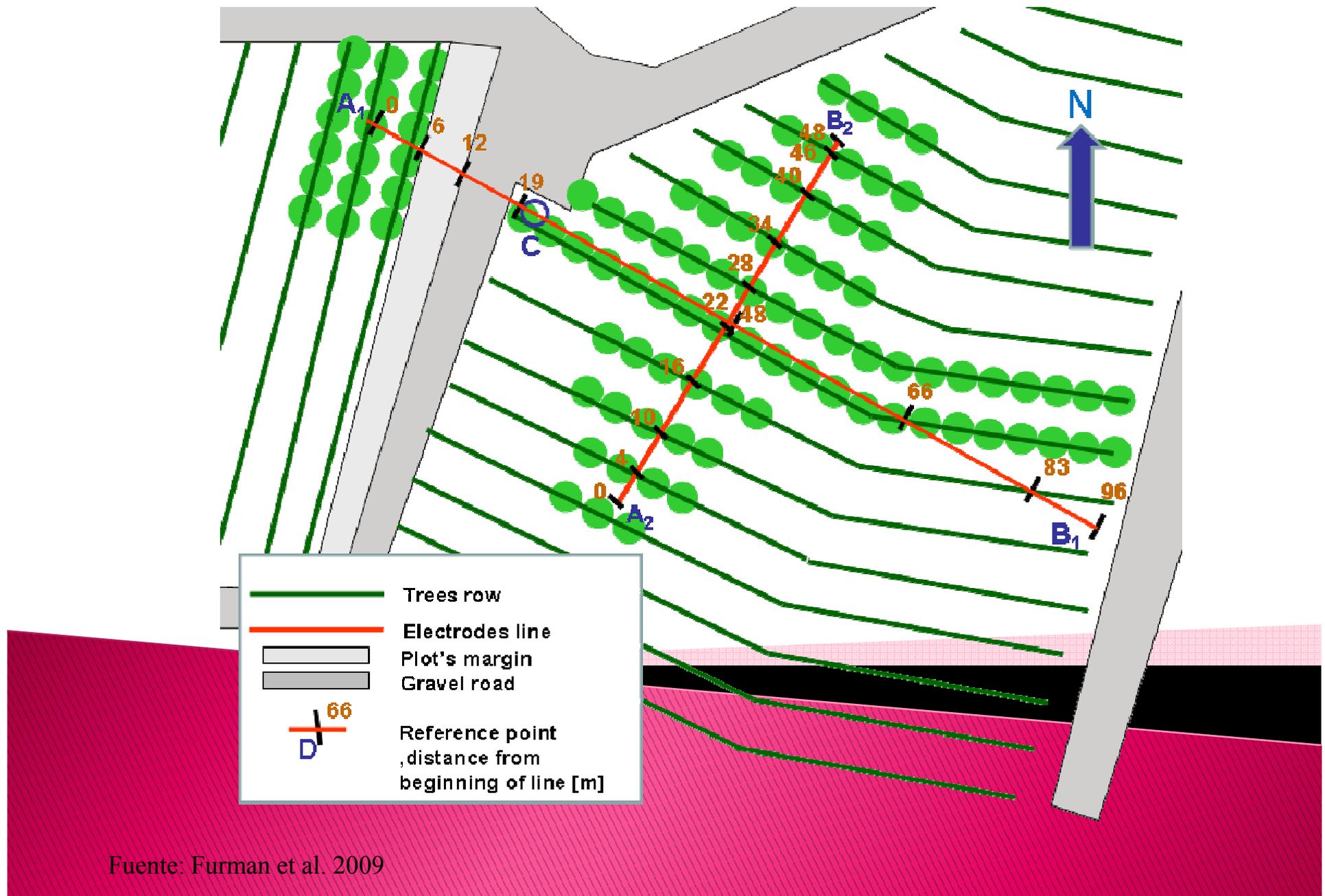
Fuerzas entre micelas hidratadas



# CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

- ⇒ **Caracterización espacial de las propiedades del suelo**
  - **Coeficientes de variación. Funciones de probabilidad**
  - **Elección de escala**
  - **Utilización de la Geoestadística**
    - ✓ **Semivariogramas. Varianza**
    - ✓ **Técnicas de interpolación: krigreado**

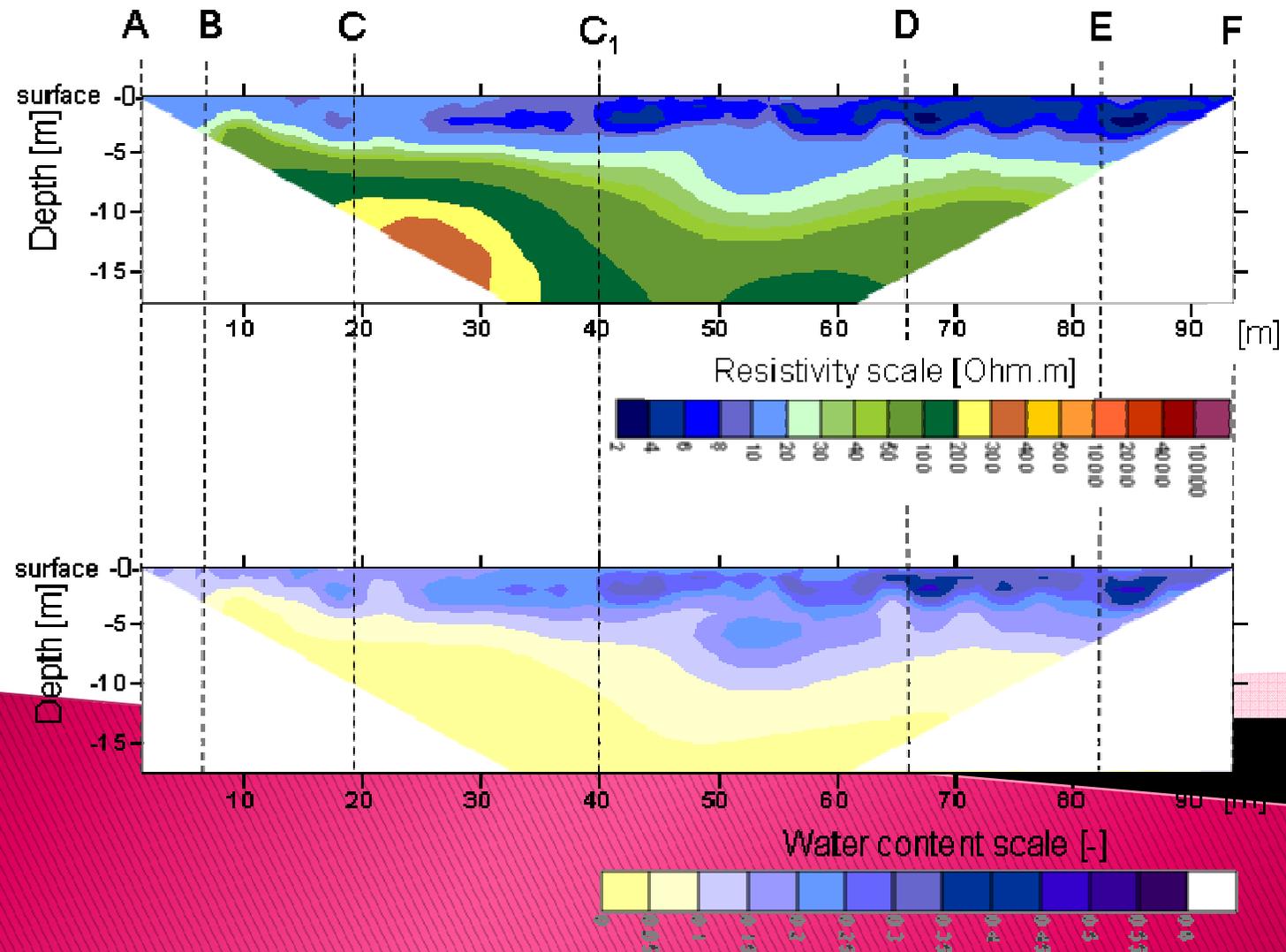
# EL AGUA EN EL SUELO



Fuente: Furman et al. 2009

# EL AGUA EN EL SUELO

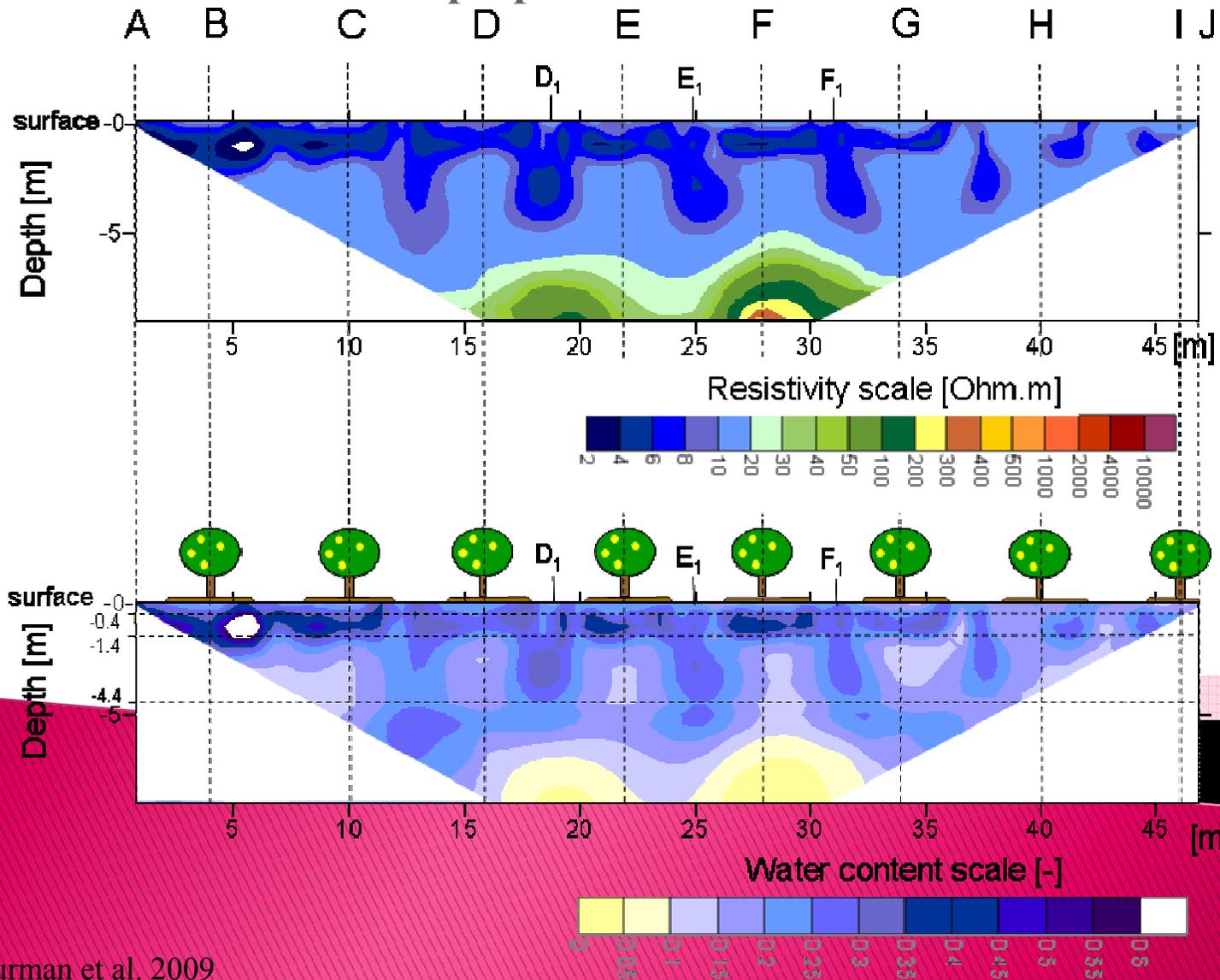
## Section 1: entre filas



Fuente: Furman et al. 2009

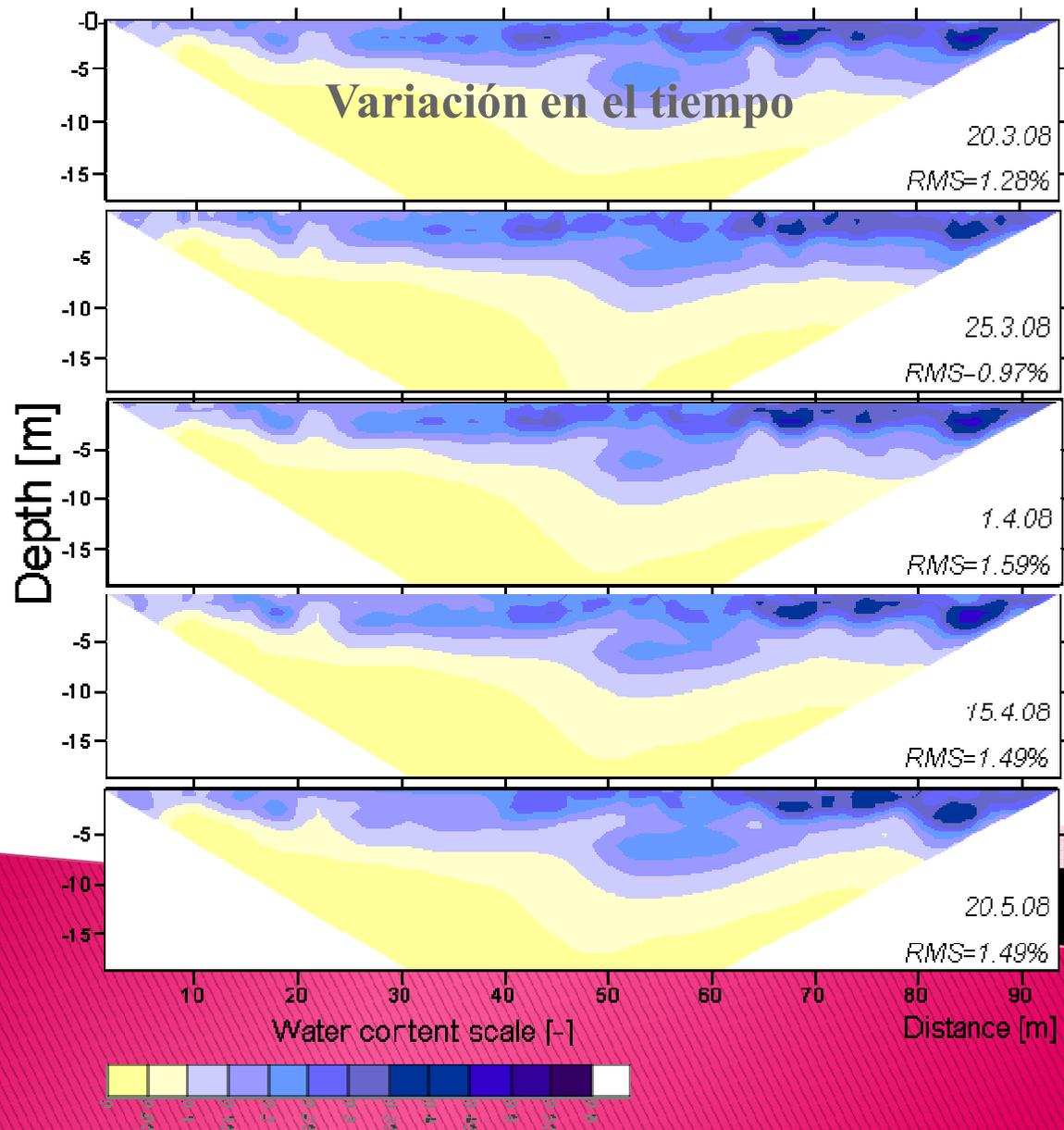
# EL AGUA EN EL SUELO

## Seccion 2: perpendicular a las filas



Fuente: Furman et al. 2009

# EL AGUA EN EL SUELO



# Caracterización del suelo

## Equilibrio estático suelo-agua

### Contenido de agua:

proporción volumétrica de solución

### Estado de energía de agua del suelo:

fuerzas a que está sometida el agua en el suelo

$$\theta = \frac{V_a}{V_s}; \quad \theta_m = \frac{m_a}{m_s}; \quad \theta = \theta_m \frac{D_a}{\rho}$$

Lámina de agua [L]:  $H = \int_{z_1}^{z_2} \theta dz$

# Caracterización del suelo

## Equilibrio estático suelo-agua

Energía potencial es la energía asociada a una masa de agua según la posición que ocupa dentro de un campo de fuerzas.

El agua del suelo está sometida a la acción de las fuerzas:

- gravitatoria (movimiento en el sentido de la gravedad).
- adsorción (atracción de la superficie de las micelas por las moléculas de agua).
- capilares (favorece la formación de meniscos en la interfaz líquido-gas)
- atracción entre los electrolitos de la disolución del suelo y las moléculas de agua.

# Caracterización del suelo

Potencial asociado al agua del suelo

Potencial total del agua en el suelo  $\phi$ :

$$\phi = \phi_T + \phi_m + \phi_p + \phi_o + \phi_g$$

$\phi_T$ : potencial térmico

$\phi_m$ : el potencial matricial;  $t = -\gamma h$

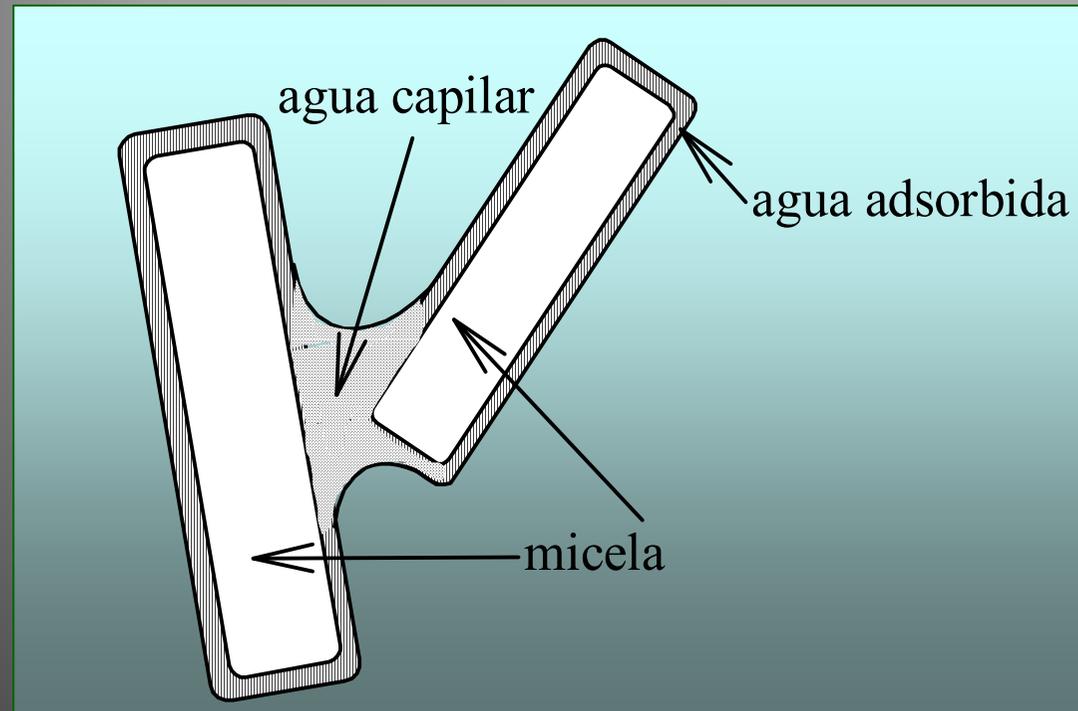
$\phi_p$ : potencial de presión  $\phi_p (\text{Energía} / \text{peso}) = \frac{p}{\gamma} = h$

$\phi_o$ : potencial osmótico  $\phi_o = -\frac{\Pi}{\gamma}$

$\phi_g$ : potencial gravitatorio  $\phi_g \gamma = z$

# Caracterización del suelo

Potencial matricial  $\phi_m$

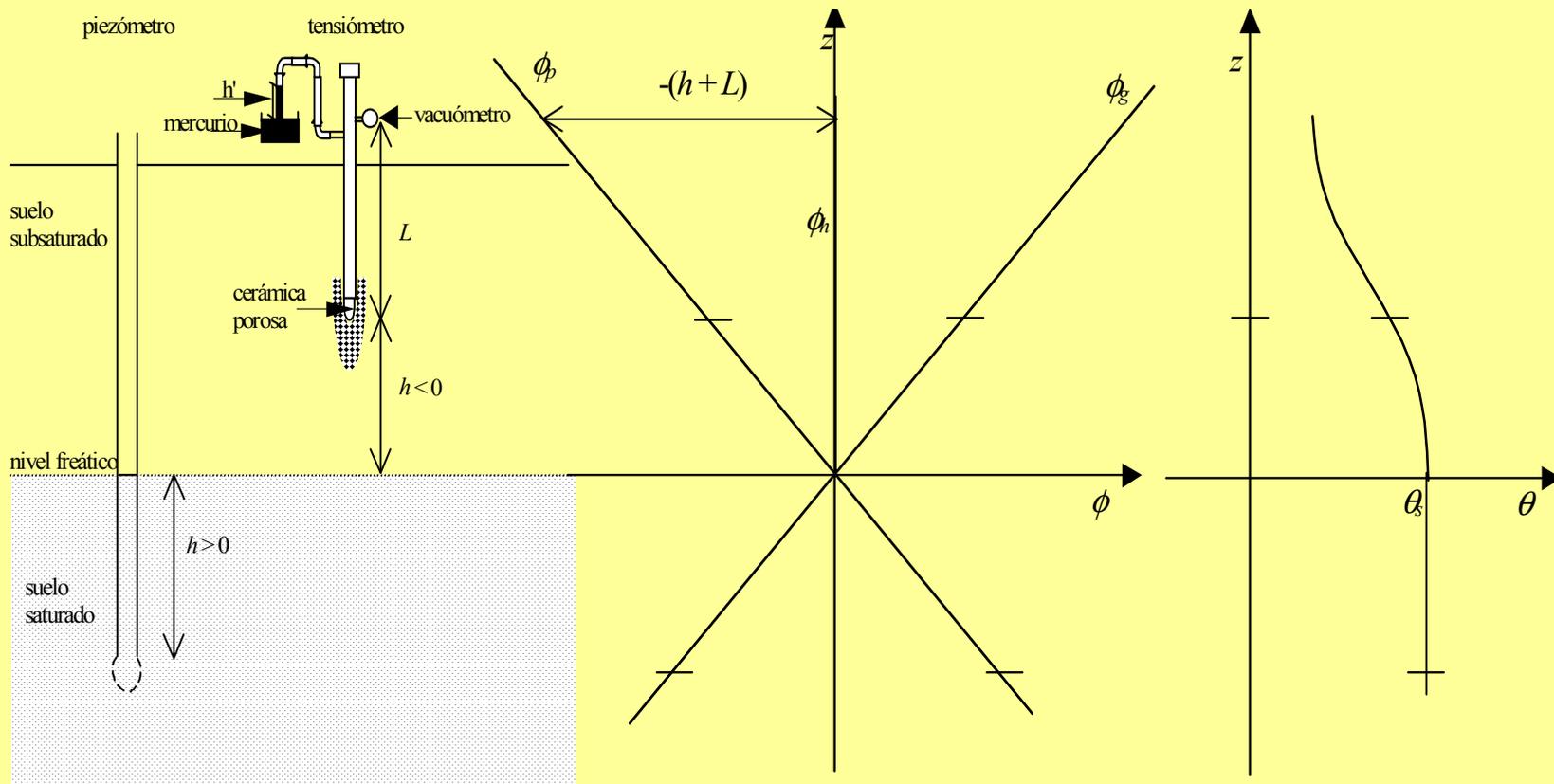


Agua retenida en un suelo subsaturado

# Caracterización del suelo

## Potencial hidráulico del agua del suelo

$$\phi_h = \phi_p + \phi_g$$



Suelo, con nivel freático, donde el agua está en equilibrio hidrostático:  
(a) Piezómetro y tensiómetro; (b) Distribución de  $\phi_h$  y (c) Distribución  $\theta$ .

# Caracterización del suelo

## Presión de vapor

**Presión de vapor de saturación  $p_v$  :**  
**Equilibrio entre la intensidad de evaporación y condensación.**

**depende de:**

- **la presión**
- **la temperatura,**
- **los solutos disueltos en la solución**

**no depende de la cantidad de líquido o vapor en el sistema.**

# Caracterización del suelo

## Presión de vapor

$$\phi = \frac{\Delta W}{n_v M} = \frac{R T}{M} \ln \frac{p}{p_v}$$

$\Delta W/n_v$  = pérdida de energía, por mol de vapor, al disminuir  $p$

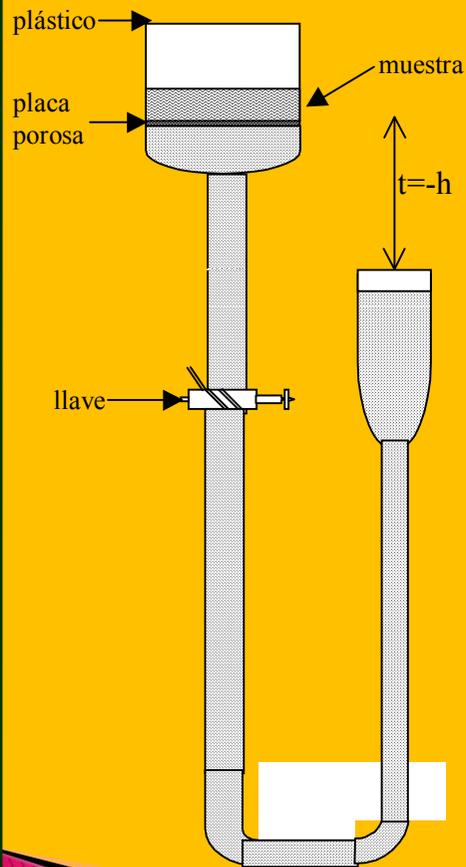
$M$  = peso molecular del vapor

$p/p_v$  = humedad relativa (relación entre la presión de vapor de agua con respecto a la que tendría a saturación)

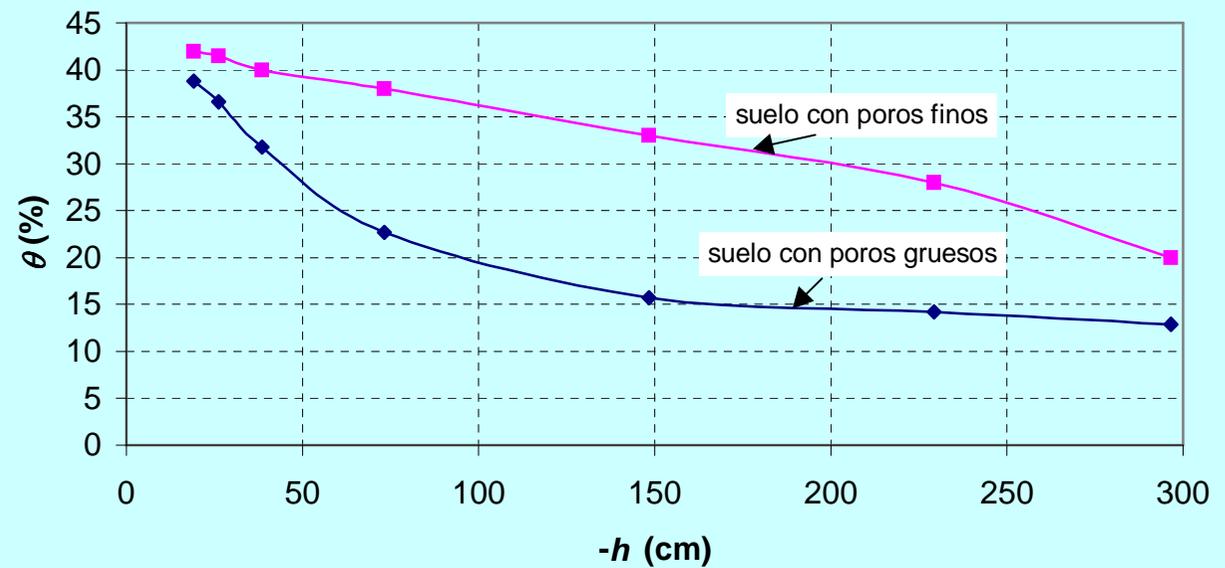
$R$  = constante universal de los gases

# Caracterización del suelo

## Retención del agua



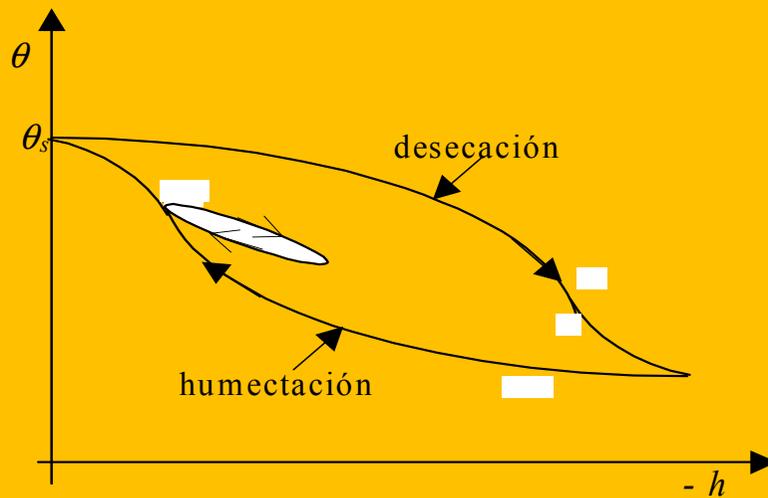
## Curvas características de retención hídrica



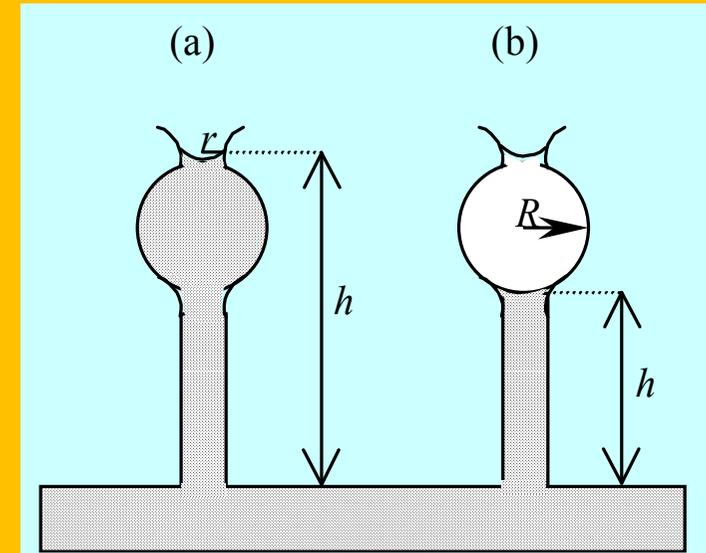
Equipo de laboratorio

# Caracterización del suelo

## Curvas de retención hídrica



Histéresis



Efecto tintero:

- a) fase de desecación
- b) fase de humectación.

# Movimiento del agua en el suelo

## Flujo en un permeámetro

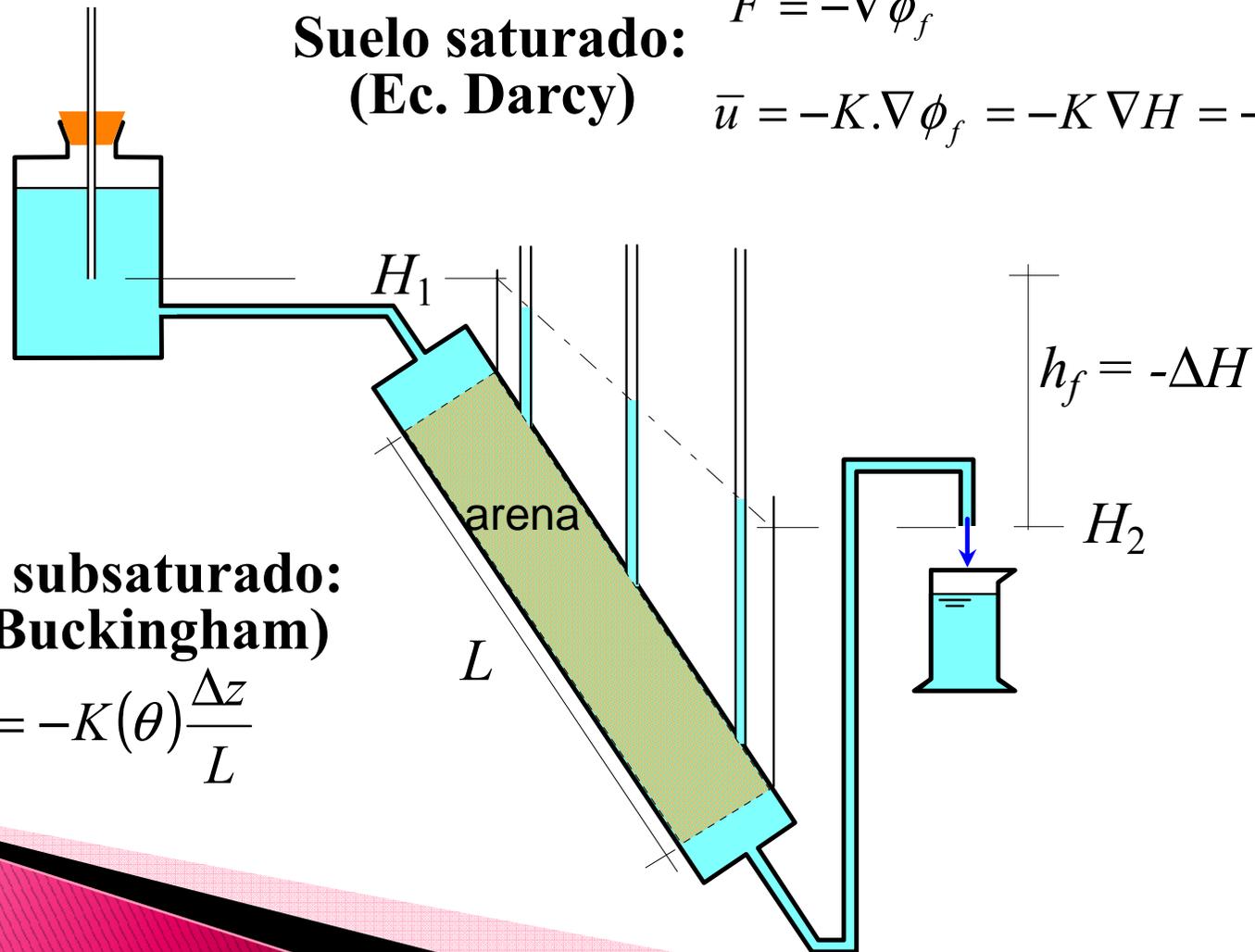
**Suelo saturado:  
(Ec. Darcy)**

$$\vec{F} = -\nabla \phi_f$$

$$\bar{u} = -K \cdot \nabla \phi_f = -K \nabla H = -K \frac{\Delta z}{L}$$

**Suelo subsaturado:  
(Ec. Buckingham)**

$$\bar{u} = -K(\theta) \frac{\Delta z}{L}$$



# Movimiento del agua en el suelo

Ec. continuidad:

$$\nabla \cdot \vec{u} = -\frac{\partial \theta}{\partial t}$$

Ec. filtración:

$$\vec{u} = -K(\theta) \cdot \nabla \phi_f$$

Ec. general del movimiento de Richards:

$$\nabla \cdot [K(\theta) \cdot \nabla \phi_f] = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

# Movimiento del agua en el suelo

## Flujo en un permeámetro saturado

### Supuestos:

- Matriz porosa rígida e inerte con los poros saturados.
- Medio poroso continuo y homogéneo con características medias invariable en el espacio.
- Estudio macroscópico donde coinciden los límites del medio poroso con las paredes que lo limitan y el área limitada por esos contornos es su sección transversal.
- Régimen laminar.

# Caracterización del suelo

Sistema suelo-planta-atmósfera: sistema hidrodinámico que considera el medio físico-químico del suelo agrícola. Su estudio se fundamenta en el concepto de potencial de energía.