



**UNCUYO**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE CUYO



FACULTAD DE  
**INGENIERÍA**

**MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS II**

# SUELOS NO SATURADOS

Introducción a la mecánica de suelos no saturados

JUAN PABLO IBAÑEZ

JUNIO 2022

- La **Mecánica de los Suelos No Saturados** es una rama reciente de la Mecánica de Suelos clásica.
- Analiza a partir de la termodinámica y la físico-química la interacción entre las fases sólido-agua-aire en la matriz de suelo.
- **Nuevos ejes**: Tres fases en vez de dos, validez del principio de las tensiones efectivas, interacción con el medioambiente.
- Existen algunas **Universidades pioneras** en este tema:
  - UPC Barcelona (profesores Alonso y Gens)
  - University of Saskatchewan, Canadá (profesor Fredlund)
  - USP São Paulo (professor Marinho)
  - Profesor Juan Carlos Santamarina
  - Otras...

- La **Mecánica de los Suelos No Saturados** es una rama reciente de la Mecánica de Suelos clásica.
- En Argentina hay gran cantidad de suelos no saturados, algunos de ellos con alta sensibilidad a variaciones de humedad, como son los suelos colapsibles y los suelos expansibles.

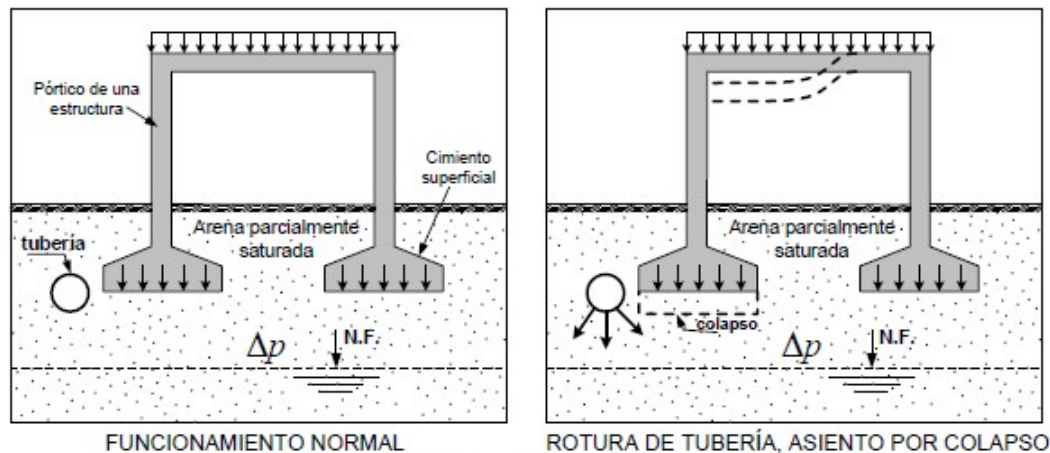


Figura 11. Daños por causa del colapso del suelo de fundación.

- Definiciones básicas
- Origen de los suelos no saturados
- Interacción de fases
- Concepto de succión
- Curva de retención
- Permeabilidad no saturada
- Tensiones efectivas
- Cambio de volumen
- Hinchamiento y colapso
- Resistencia al corte

- **Volumen del suelo**

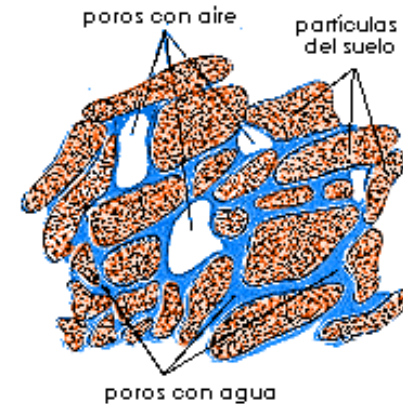
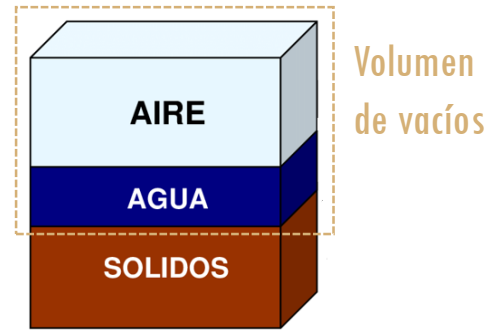
- Sólido.
- No sólido o de vacíos.

- **Fases del suelo:**

- Sólida: Esqueleto sólido.
- Líquida: Agua.
- Gaseosa: Aire.

- **Suelo**

- Seco: sin fase agua presente.
- Saturado: sin fase gaseosa presente, pues la fase líquida ocupa todo el volumen de vacíos.
- No saturado (parcialmente saturado): Las fases líquida y gaseosa se reparten en distintos % el volumen de vacíos.



Teniendo en cuenta su origen, los suelos parcialmente saturados pueden ser naturales o artificiales. Respecto a los primeros se han descrito en la bibliografía una gran variedad de ejemplos tanto en suelos sedimentarios (eólicos, aluviales, coluviales, etc.), como en suelos residuales lateríticos y saprolíticos. Gran parte de los suelos sedimentario se han depositado en ambientes acuosos, quedando inicialmente saturados y posteriormente desecados debido a las circunstancias ambientales. Estos suelos abundan en lugares de clima árido y semi-árido, en que las estaciones son muy marcadas con periodos secos prolongados. Según diversos autores, estos lugares ocupan cerca del 30 % de la superficie de la Tierra. Respecto a los suelos residuales, su formación está asociada a los agentes de meteorización y el tipo de roca matriz. Los suelos tropicales lateríticos y saprolíticos, frecuentemente están en estado no saturado, debido a sus características de alta permeabilidad y las condiciones climáticas en las cuales se encuentran (Vaughan, 1985). Estos suelos son originados por la intensa y profunda descomposición de la roca matriz, bajo condiciones climáticas y biológicas que prevalecen en los trópicos. Por otra parte, dentro de los suelos artificiales se encuentran los suelos compactados extensamente utilizados en obras de tierra (presas, terraplenes, etc.), que debido a su naturaleza son suelos no saturados. Según Barden (1965) es razonable aceptar ciertas similitudes de comportamiento entre los suelos compactados y los suelos naturales desecados.

- Grado de saturación

$$S_r (\%) = \text{volumen fase líquida} / \text{volumen de vacíos}$$

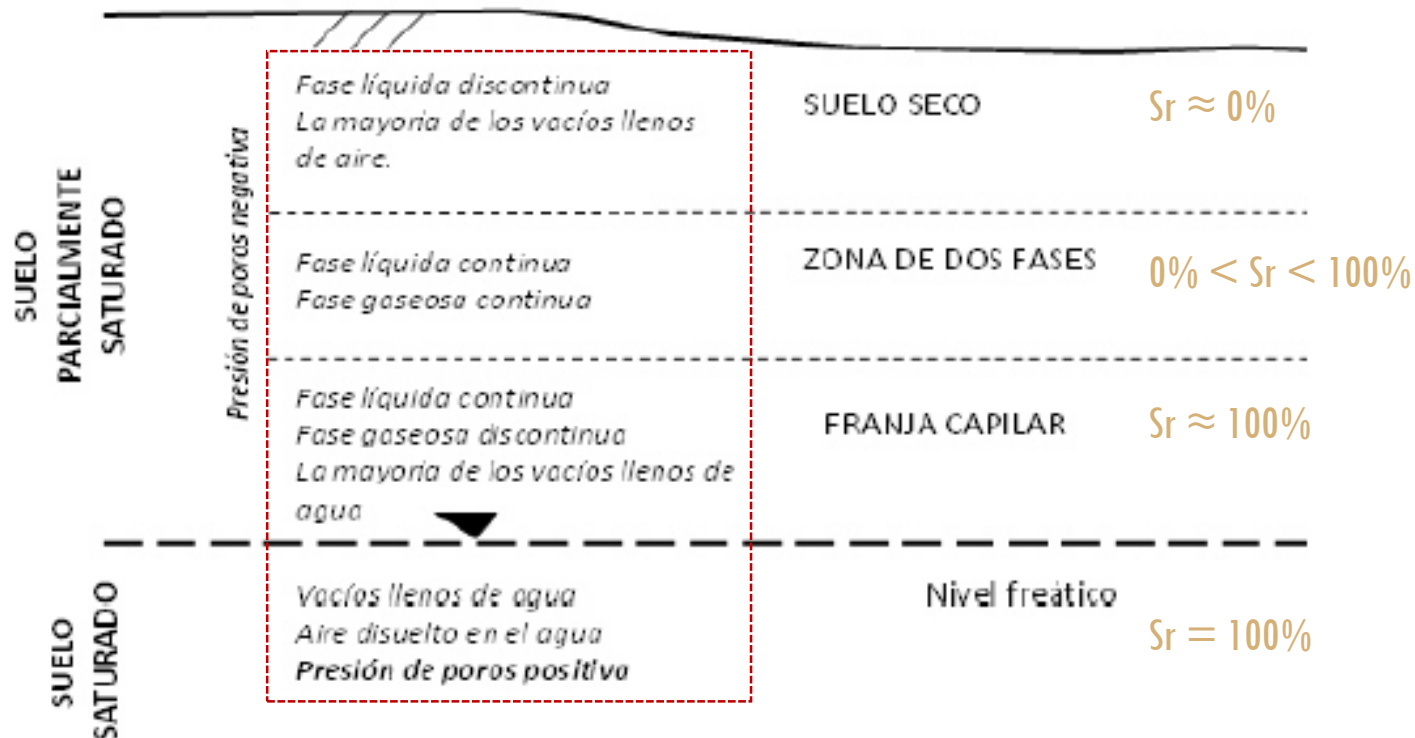


Figura 1. Zonas de suelo saturado y parcialmente saturado. Tomado de Fredlund, D.G, 2000.

**FASE SÓLIDA:**

- Las partículas se disponen formando arreglos geométricos.
- Esta estructura influye en el estado de tensiones en los contactos entre partículas, el aire y el agua.
- Controla la componente capilar de la succión.
- Se transmiten tensiones normales y tangentes y fuerzas eléctricas de atracción y repulsión.
- Los minerales aparecen como partículas sólidas o disueltos (en la fase líquida).

**FASE LÍQUIDA:**

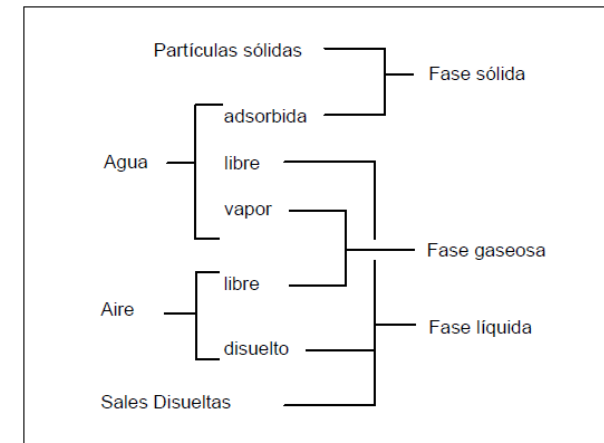
- Agua adsorbida en la partícula que no puede ser separada por acciones hidrodinámicas.
- Agua capilar, que puede moverse por la acción de las fuerzas capilares.
- Agua gravitacional, que puede drenar por gravedad.
- El agua capilar y el agua gravitacional forman una sola unidad que puede denominarse de *agua libre*.
- El agua libre tiene una presión ( $u_w$ ) en la fase.
- El agua aparece libre, como vapor (en la fase gaseosa) o “adsorbida” (en la fase sólida).

**FASE GASEOSA:**

- El aire tiene una presión ( $u_a$ ) en la fase.
- El aire aparece como libre, o disuelto (en la fase líquida).

**INTERACCIÓN ENTRE LAS FASES**

- Fenómenos de superficie.







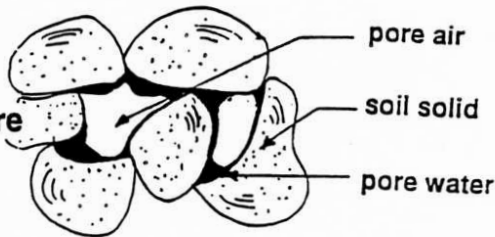
## Succión

- **Succión Capilar:** Es la presión negativa de agua intersticial del suelo por efectos de superficie (capilares).
- **Succión matricial:** Es la presión negativa de agua intersticial, debido a los fenómenos de superficie y gravitatorios.
- **Succión osmótica:** Es la presión negativa de agua pura a la que habría que someter a la masa de agua del suelo, para estar en equilibrio a través de una membrana semipermeable.
- **Succión Total:** Es la suma de la succión matricial y la osmótica.

**Pore Pressures :**

$u_w$  = pore water pressure

$u_a$  = pore air pressure



$$\text{Succión Matricial (s)} = U_a - U_w$$

- El **flujo** no saturado se controla por los gradientes del potencial de agua total.
  - POTENCIAL DE AGUA TOTAL = GRAVITACIONAL + MATRICIAL + OSMÓTICO
- El comportamiento **tensión – deformación** depende de la succión matricial.

## Medición de succión

- Por transferencia de vapor, asociada a la succión total ( $\Psi$ ).
- Por transferencia de agua líquida, ligada a la succión matricial ( $s$ ).

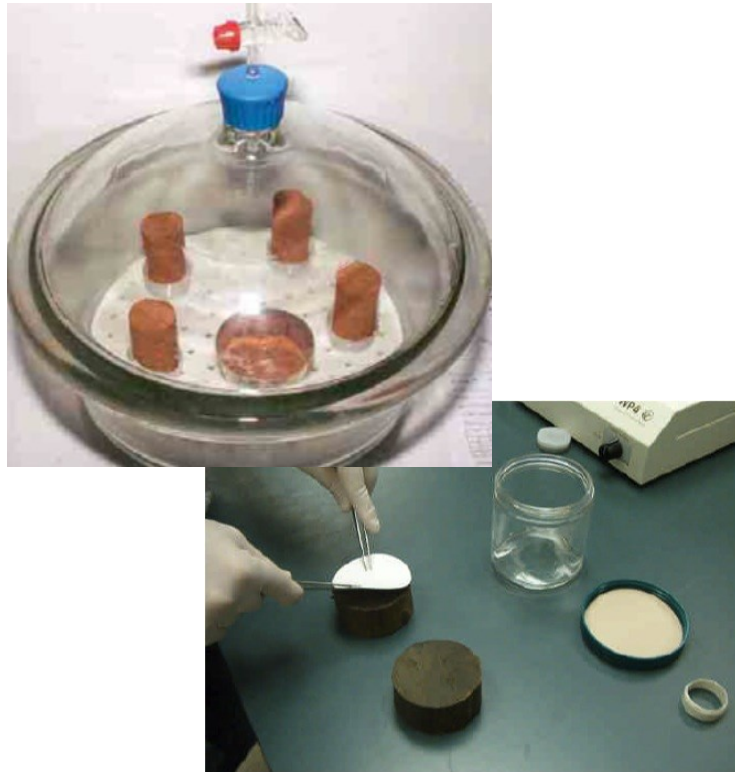
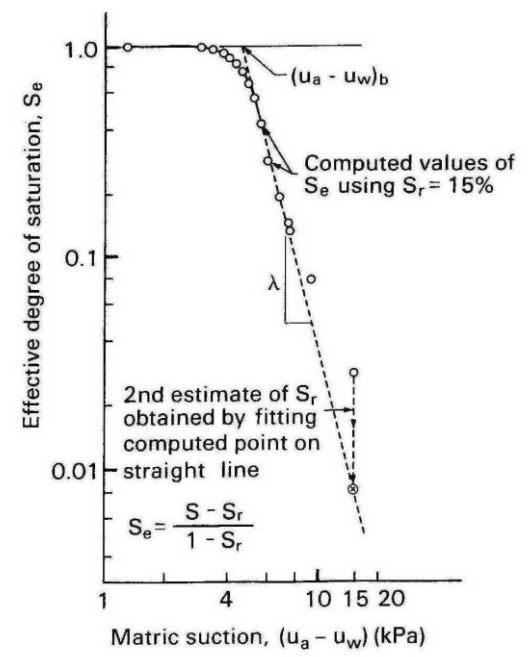
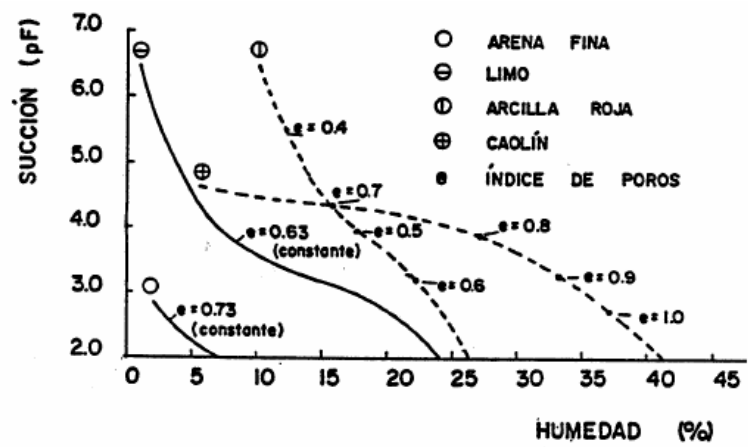
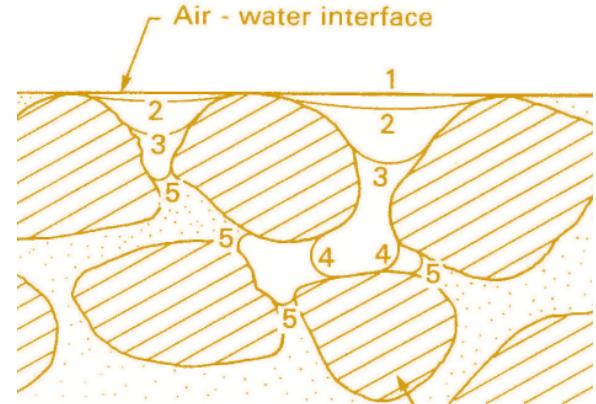


Tabla 2.2 Resumen de diferentes equipos y técnicas de medida de succión (Gens y Romero 2000).

Equipo	Succión	Fenómeno medido	Rango (MPa)	Tiempo Equilibrado
Psicrómetro de termopares WESCOR	Total Osmótica	Humedad relativa (diferencia Temp.)	0.3 – 7	Minutos
Higrómetro capacidad/resistivo	Total	Humedad relativa (capacida/resisten.)	10 – 400	Minutos
Higrómetro de espejo (punto rocío)	Total	Humedad relativa (diferencia Temp.)	3 – 400	Minutos
Placa de succión	Matricial	Tracción de agua	0 – 0.08	horas/días
Placa de presión con membrana acetato	Matricial	Traslación de ejes	0 – 7	días/semanas
Tensiómetro	Matricial	Tracción de agua	0 – 0.08	Minutos
Tensiómetro Imperial College	Matricial Total (sin contacto)	Tracción de agua	0 – 2.1	Minutos
Celulosa porosa (bloque de yeso, fibra de vidrio)	Matricial	Resistencia eléctrica	0 – 1.5	días/semanas
Conductividad Térmica	Matricial	Conductividad térmica	0 – 1.5	días/semanas
Sensor TDR con cerámica (también se usa s/cerámica)	Matricial	Constante dieléctrica	0 – 0.3 (60% porosidad de cerámica)	horas/días
Técnica de Squeezing	Osmótica	Conductividad eléctrica	0 – 3	horas/días

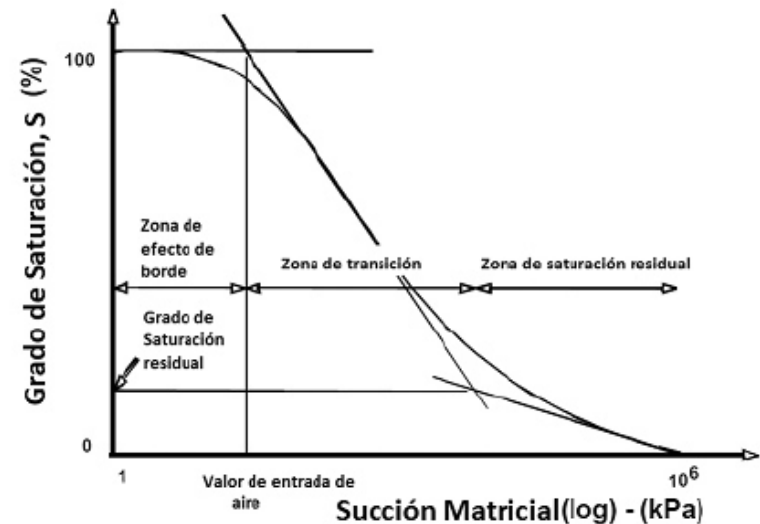
## Proceso de desaturación y entrada de aire

- La secuencia 1 a 5 muestra como es el proceso de desaturación y entrada de aire en el suelo.
- En 1 y 2 crece la succión pero sin caída en la saturación, por oposición de los meniscos.
- De 3 a 5 comienza la entrada de aire.
- La presión de entrada de aire implica un cambio drástico en la relación succión — saturación.
- Aumentando la succión se obtiene la curva completa.



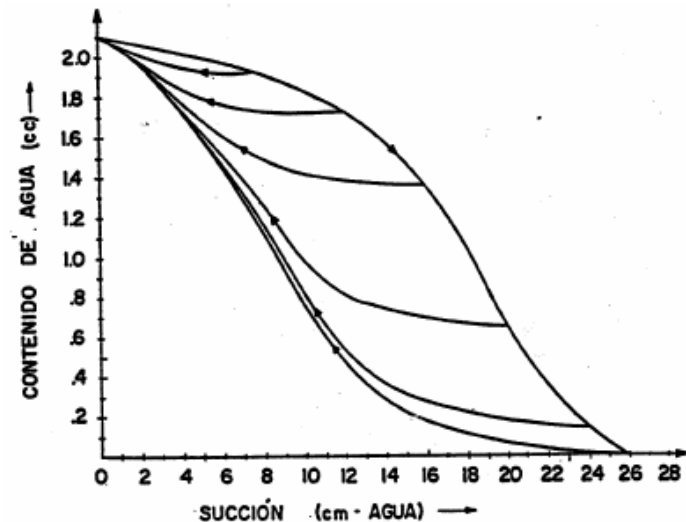
## Zonas de la Curva Característica

- **Zona de borde:** en estado saturado y par succiones menores al valor de entrada de aire. Sólo fase agua.
- **Zona de transición:** las fases agua y aire se dividen el volumen de vacíos.
- **Zona de saturación residual:** Para secar el suelo mas allá de la saturación residual es necesario un aumento dramático de la succión.



## Histéresis de la Curva Característica

- La relación unívoca se verifica sólo para trayectorias monótonas.
- Cuando hay ciclos de secado — humedecimiento se produce una **histéresis**, cuya magnitud dependerá del tipo de suelo.



## Permeabilidad relativa ( $k_r$ )

- $k_r = k_{nsat} / k_{sat}$
- En función del grado de saturación “efectivo”  $S_e$  (considerando sólo los vacíos interconectados).

- Modelo de Van Genuchten
- $$k_r = \sqrt{S_e} \left( 1 - \left( 1 - S_e^{1/\lambda} \right)^\lambda \right)^2$$

- Modelo Cúbico:  $k_r = (S_e)^3$

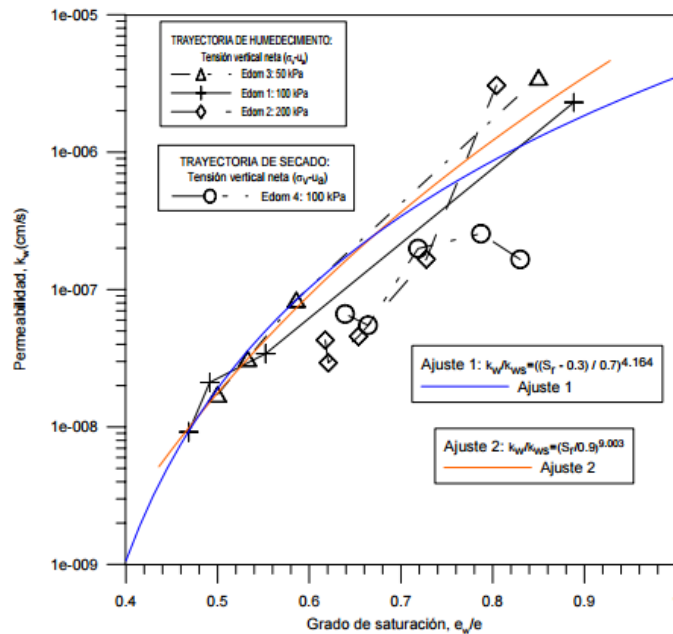


Figura 5.4: Permeabilidad en función del grado de saturación.

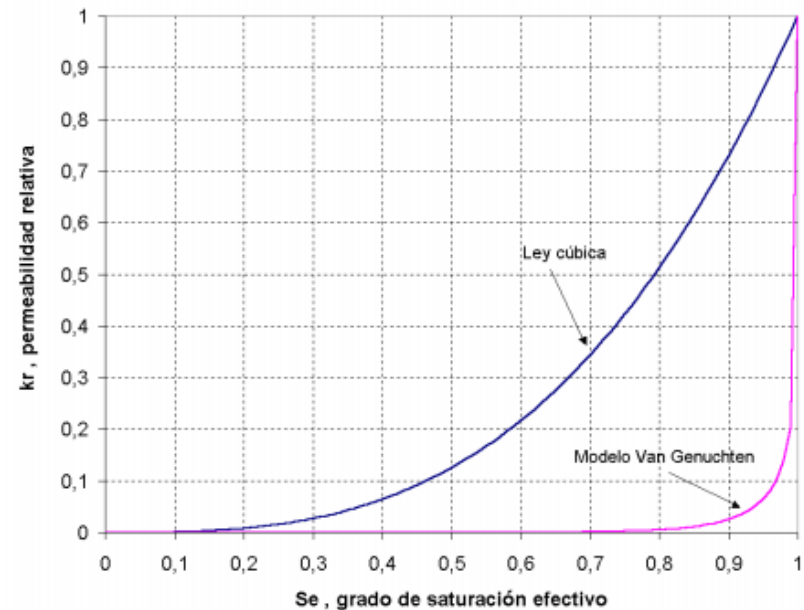


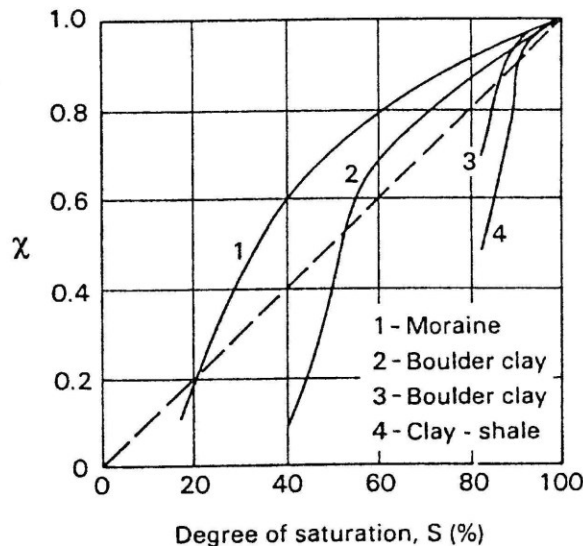
Figura 3.5 Permeabilidad relativa en función del grado de saturación. Modelo Van Genuchten ( $\lambda=0.2$ ) y ley cúbica

# Tensiones Efectivas en el dominio No Saturado

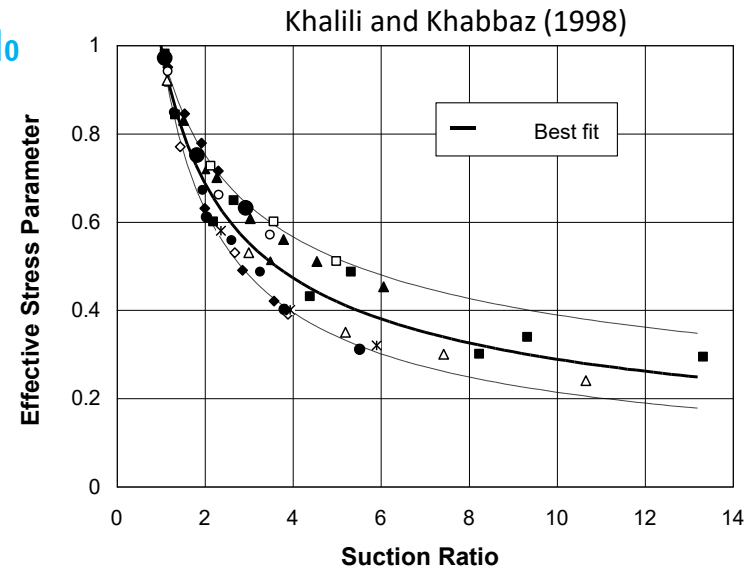
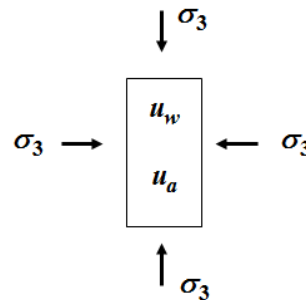
- El concepto permite aplicar los principios de la mecánica de sólidos a problemas geotécnicos mediante análisis teórico.
- Como extender el Principio?  $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$
- En suelos saturados (Terzaghi):  $\sigma' = \sigma - u_w$
- En Suelos No Saturados (Bishop):  $\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$

(b) representa el valor de la succión para el punto de entrada de aire

$$\chi = \left( \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right)^{-0.55}$$

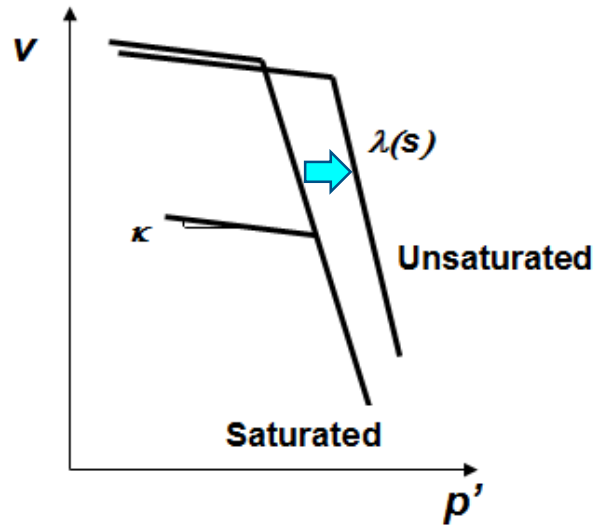


Depende del tipo de suelo



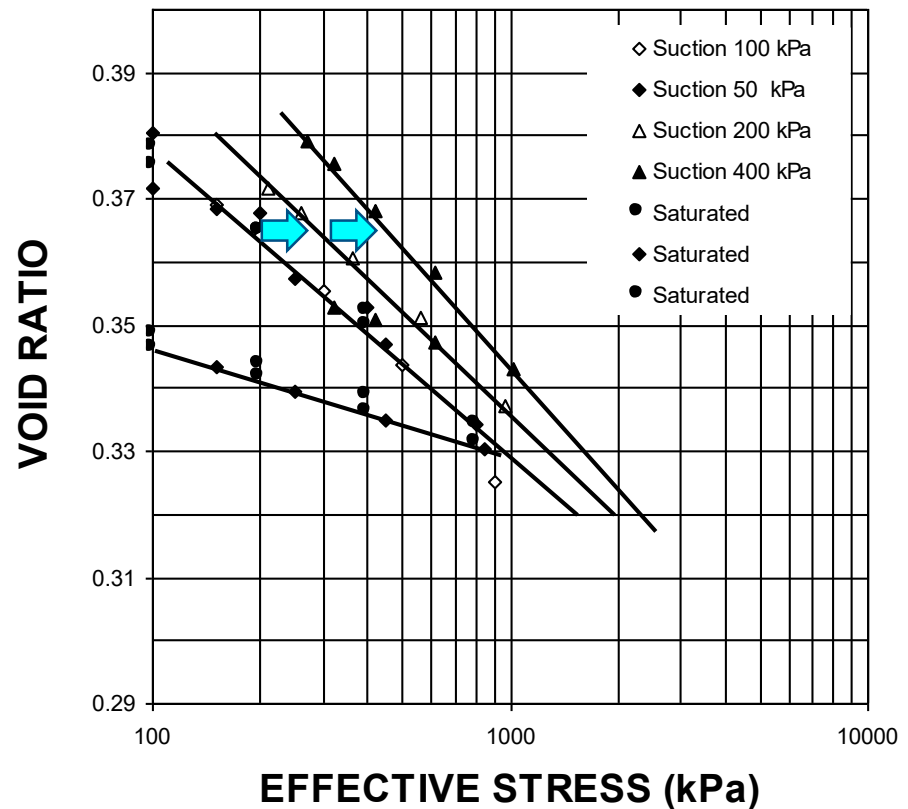
## Comportamiento volumétrico

- Las pendientes de la línea de consolidación en carga y descarga son afectadas por el nivel de succión.
- Se produce un **endurecimiento por efecto del nivel de succión**.
- Se acentúa el **colapso por humedecimiento**.



$$v = N(s) - \lambda(s) \ln p'$$

$$p' = (p - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$



Khalili and Khabbaz (1998)

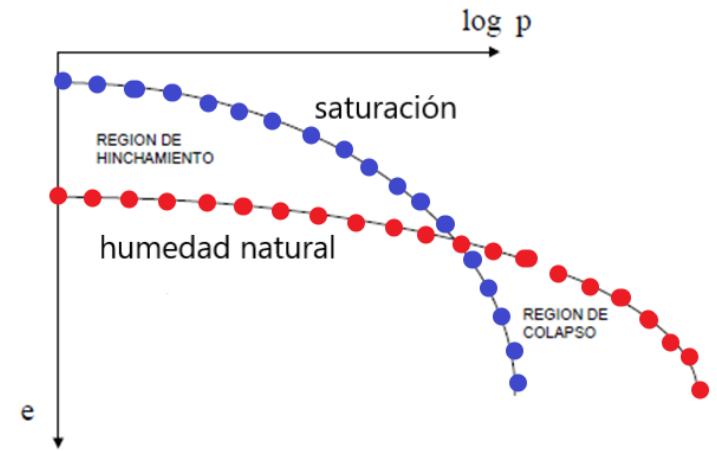


# Colapso

- Se produce por humedecimiento bajo carga en suelos con estructura abierta, porosa.

# Hinchamiento

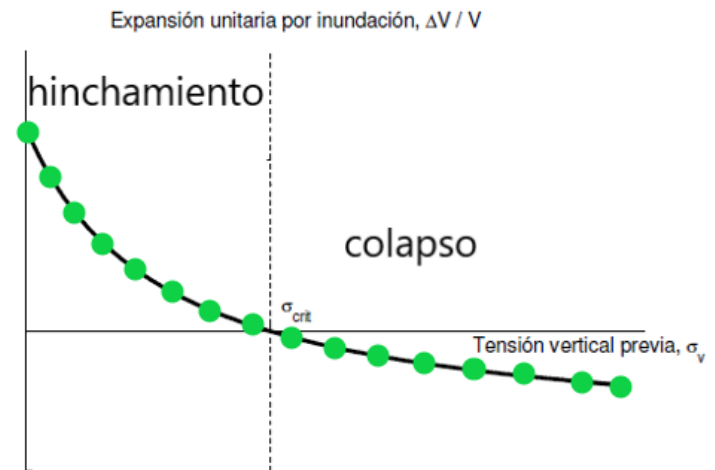
Se produce por humedecimiento bajo cargas bajas o nulas en suelos con minerales expansivos.



Expansión y colapso para un mismo suelo (Jennings y Kenight, 1975).

Tabla 2.4 Propiedades de los minerales arcillosos expansivos (Lambe, 1959).

Propiedades	MINERAL		
	Caolinita	Illita	Montmorilonita
Esquemas de la estructura			
G = lámina de Gibbsita S = lámina de Silicato K = ión de potasio			
Tamaño de las partículas	d= 0.3 a 3 μm e = 1/3 a 1/10 d	d= 0.1 a 2 μm e = 1/10 d	d= 0.1 a 1 μm e = 1/10 d
Superficie específica	5 – 30	65 – 100	600 – 800
Capacidad de intercambio catiónico por 100g de arcilla	3 – 15	10 – 40	80 – 150
Forma de la partícula	Aplanada	Aplanada	Aplanada
Expansión máximo para una presión de 0.1 t/p <sup>2</sup>	despreciable	350	1500
Expansión máxima para una presión de 0.2 t/p <sup>2</sup>	despreciable	150	350



Curva de hinchamiento bajo carga

## Variables de Estado de Tensión

- El comportamiento mecánico de los suelos es controlado por las mismas variables de tensión que controlan el equilibrio del suelo.
- La ecuación de tensión efectiva debe ser independiente de las propiedades del material.
- Fredlund and Morgenstern (1977) proponen dos variables:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$

- Otros autores rechazan las 2 *variables de estado*, y buscan continuar con el concepto de tensión efectiva tradicional.

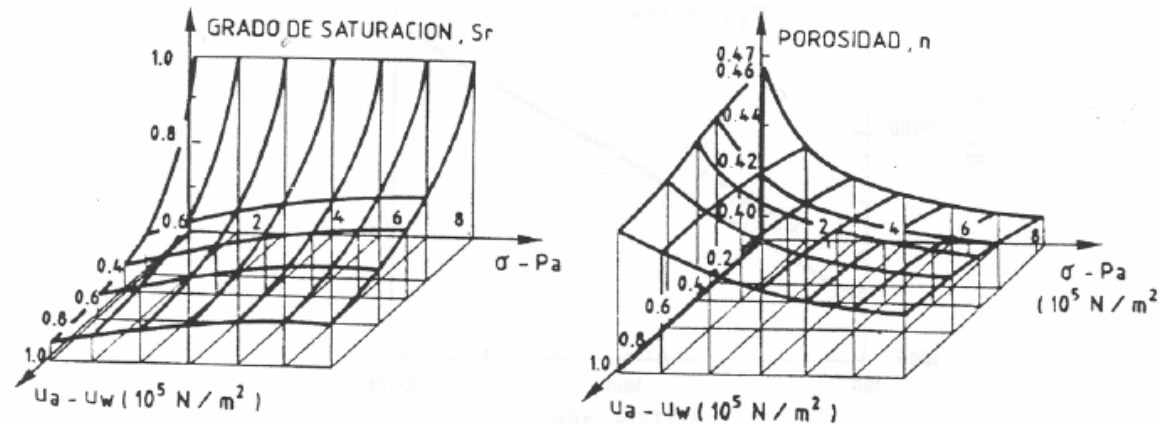
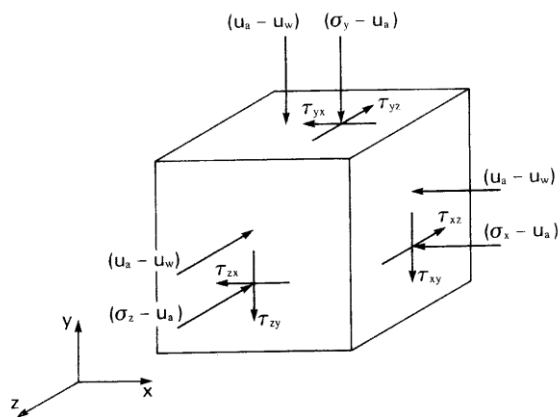


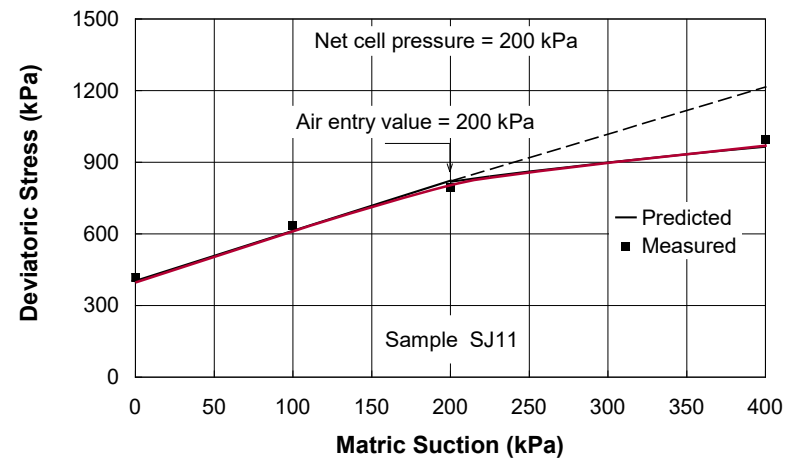
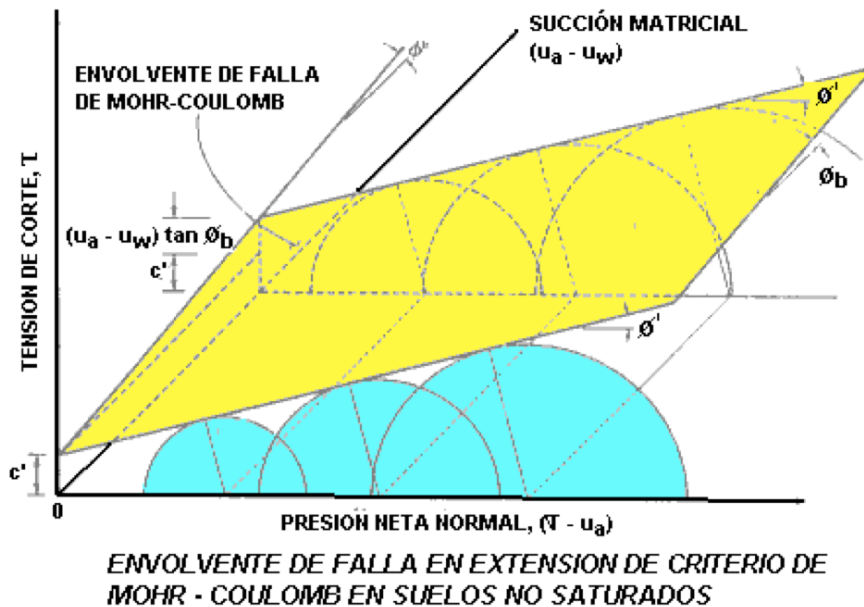
Figura 2.16 Superficies de estado para  $e$  y  $S_r$  (Matyas y Radakrishna, 1968).

## Variables de Estado de Tensión

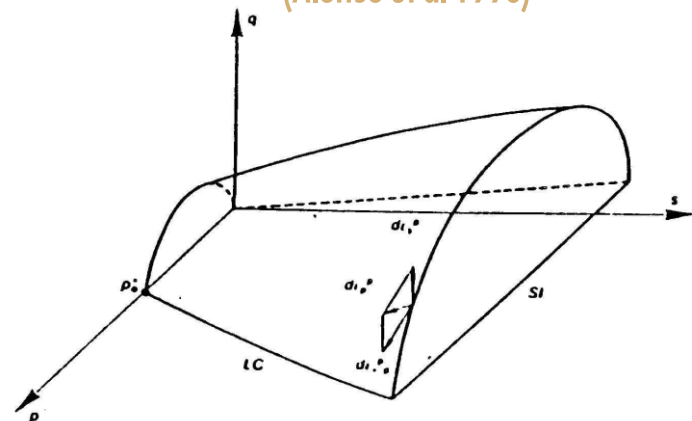
- Fredlund (1978) propuso la expresión clásica para la resistencia al corte de un suelo no saturado, como un extensión de la expresión de Terzaghi:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi_b$$

- El ángulo  $\phi_b$  propuesto no es constante, decayendo su valor con el aumento de la succión.



## MODEL ELASTOPLASTICO BARCELONA BBM (Alonso et al 1990)



## Equipos con Control de Succión

- Celda Edométrica.
- Caja de corte.
- Celda Triaxial.

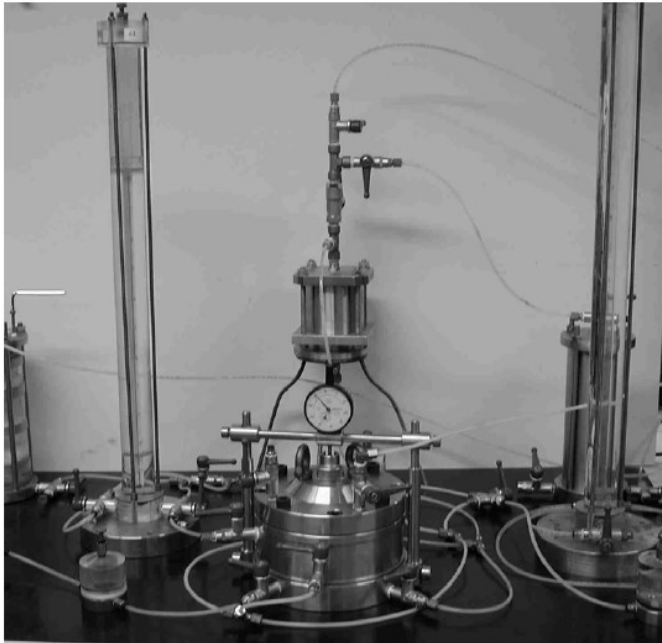
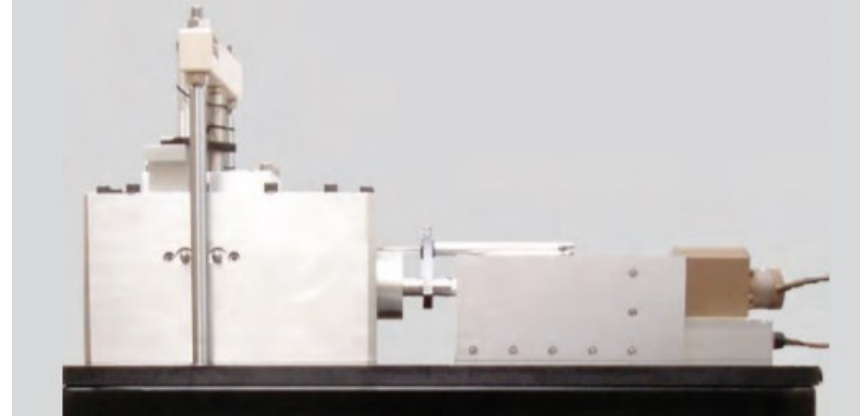


Figura 2.10b Célula edométrica con control de succión total ( $\Psi$ ) (humedad relativa) y succión matricial ( $u_a - u_w$ ) (traslación de ejes) (Barrera, 2002).

## Caja de Corte para Suelos Saturados y No Saturados (GDSBPS)



## Consideraciones finales

La Mecánica de los Suelos No Saturados:

- Constituye una **nueva y moderna rama** de la Mecánica de Suelos clásica (orientada a suelos secos o saturados).
- Busca basarse y **extender los conceptos** fundamentales de la Mecánica de Suelos clásica al dominio no saturado.
- También **incorpora nuevos paradigmas** y formas de abordar los problemas.
- En algunos temas como la resistencia al corte, **todavía no hay consenso** absoluto y diferentes propuestas son estudiadas.
- Actualmente se encuentra **en plena expansión**, y cuenta con foros propios.