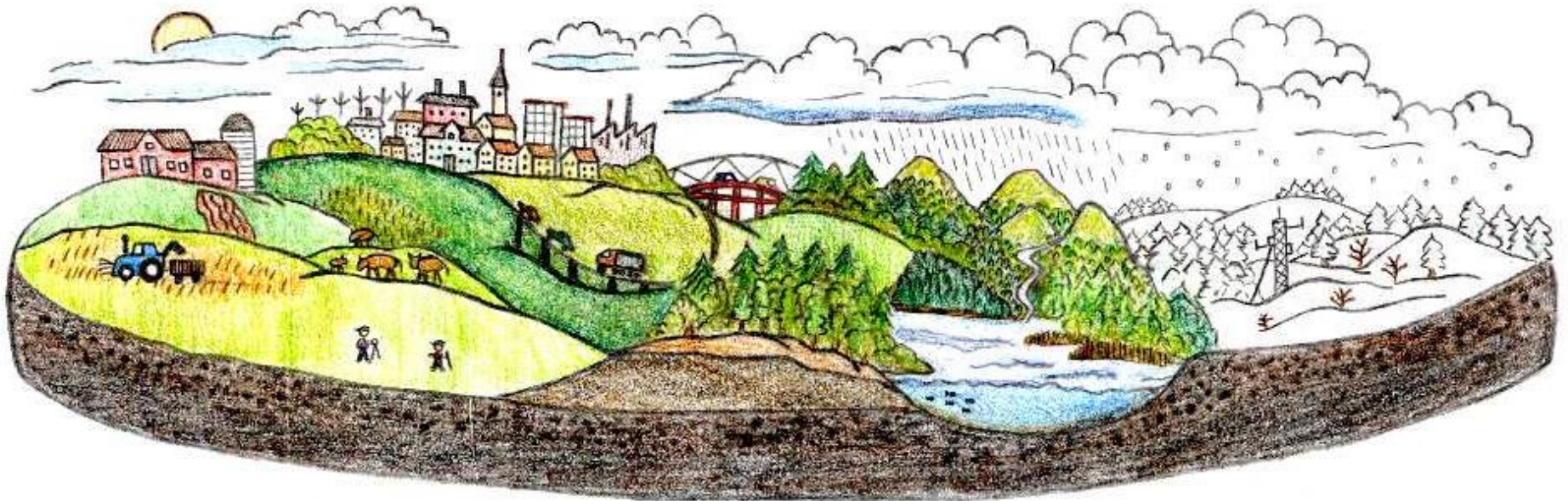


# Bases Físicas del Medio Ambiente

## Fenómenos de Superficie



# Programa

- **III. FENÓMENOS DE SUPERFICIE.( 2h)**
- Fuerzas intermoleculares. Cohesión. Tensión superficial. Energía superficial. Presión debida a la curvatura de la superficie interfacial. Contacto entre dos líquidos. Contacto sólido-vapor-líquido. Ángulo de contacto. Capilaridad. Ley de Jurin.



# Programa

- **III. FENÓMENOS DE SUPERFICIE.( 2h)**
- **Fuerzas intermoleculares. Cohesión. Tensión superficial. Energía superficial.** Presión debida a la curvatura de la superficie interfacial. Contacto entre dos líquidos. Contacto sólido-vapor-líquido. Ángulo de contacto. Capilaridad. Ley de Jurin.



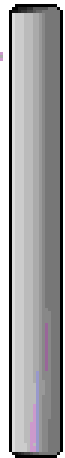
# Siguiendo con los fluidos

- En concreto, el comportamiento de los líquidos en contacto con otro medio
- Dos fenómenos de interés particular
  - Tensión Superficial
  - Capilaridad
- Para empezar, conviene recordar unas propiedades de los líquidos



## Capillary Action

Straw  
lowered into  
water

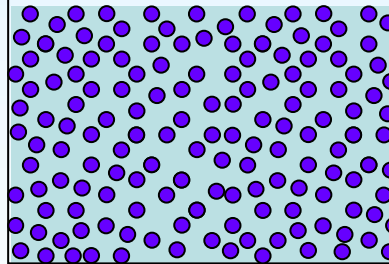


# Fuerzas intermoleculares en los líquidos

- Un líquido se adapta a la forma de su recipiente

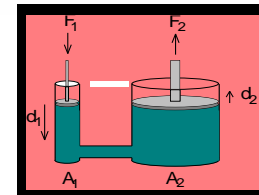
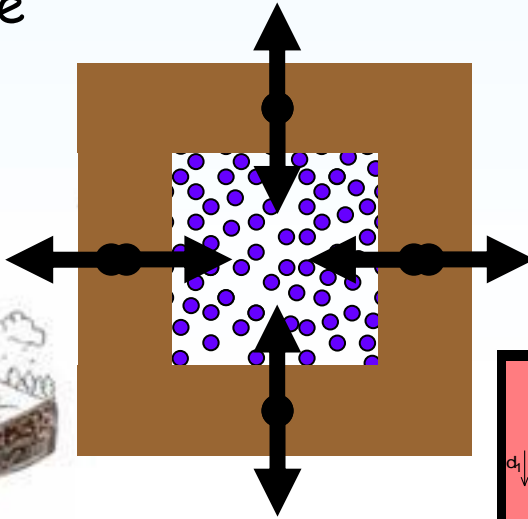


- Las moléculas pueden moverse en el seno del líquido



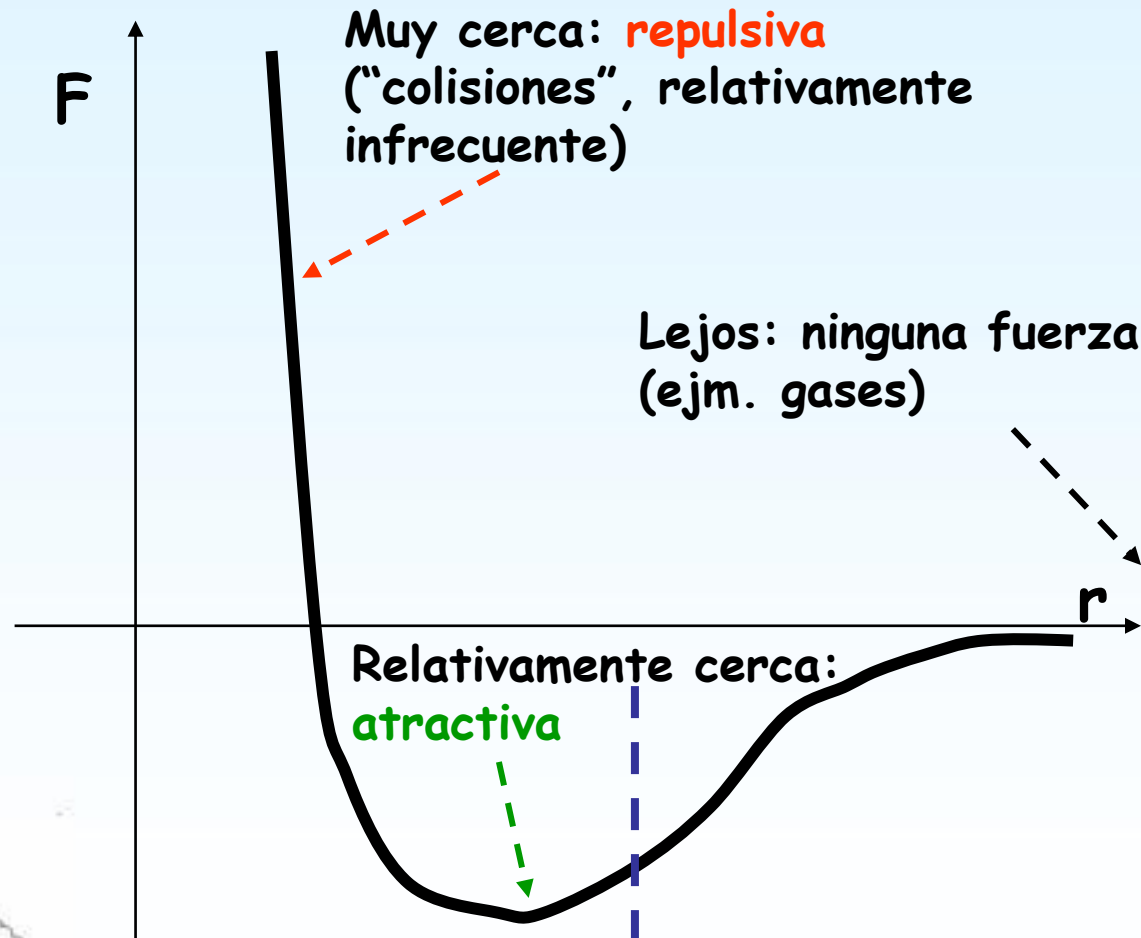
- Un líquido es prácticamente incompresible
- Las moléculas tienden a mantenerse unidas

- Fuerza repulsiva al acercarse las moléculas
- Fuerza atractiva al alejarse las moléculas



# Fuerzas intermoleculares

- Estas fuerzas ( $F$ ) son de naturaleza electromagnética
- Su magnitud depende de la distancia ( $r$ ) entre las moléculas

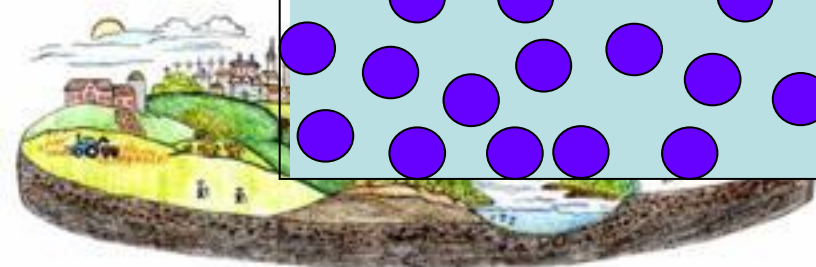
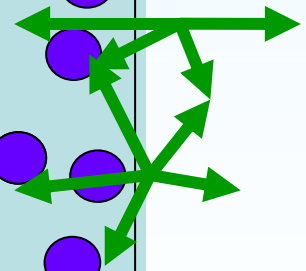
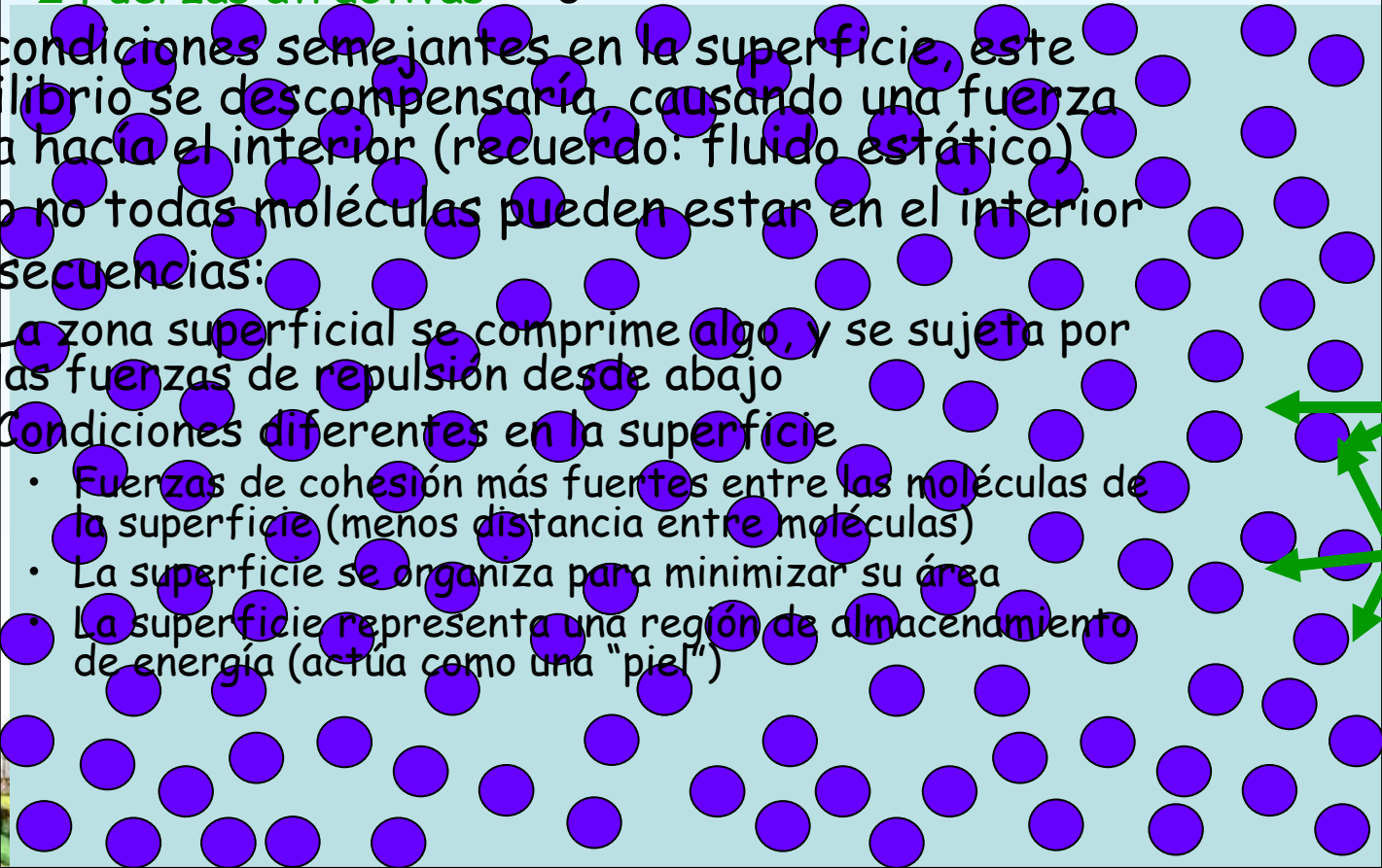


Para entender la tensión superficial y la capilaridad, conviene enfocarse en las fuerzas promedio (atractivas)



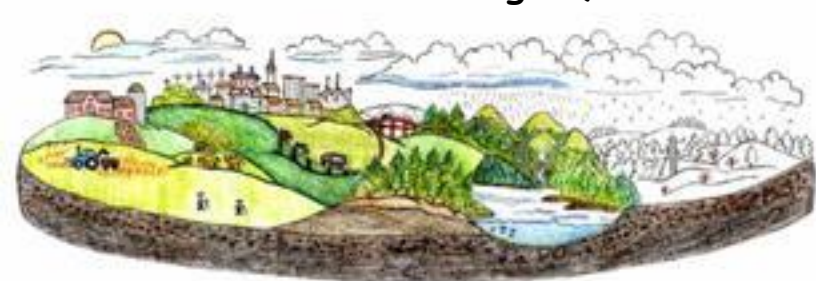
# Dos casos distintos

- En el seno del líquido, existe un estado de equilibrio en **<promedio temporal>**
  - **<  $\Sigma$  Fuerzas atractivas > = 0**
- En condiciones semejantes en la superficie, este equilibrio se descompensaría, causando una fuerza neta hacia el interior (recuerdo: fluido estático)
- Pero no todas moléculas pueden estar en el interior
- Consecuencias:
  - La zona superficial se comprime algo, y se sujeta por las fuerzas de repulsión desde abajo
  - Condiciones diferentes en la superficie
    - Fuerzas de cohesión más fuertes entre las moléculas de la superficie (menos distancia entre moléculas)
    - La superficie se organiza para minimizar su área
    - La superficie representa una región de almacenamiento de energía (actúa como una "piel")



# Dos casos distintos

- En el seno del líquido, existe un estado de equilibrio en **<promedio temporal>**
  - **<  $\Sigma$  Fuerzas atractivas > = 0**
- En condiciones semejantes en la superficie, este equilibrio se descompensaría, causando una fuerza neta hacía el interior (recuerdo: fluido estático)
- Pero no todas moléculas pueden estar en el interior
- Consecuencias:
  - La zona superficial se comprime algo, y se sujeta por las fuerzas de repulsión desde abajo
  - Condiciones diferentes en la superficie
    - Fuerzas de cohesión más fuertes entre las moléculas de la superficie (menos distancia entre moléculas)
    - La superficie se organiza para minimizar su área
    - La superficie representa una región de almacenamiento de energía (actúa como una "piel")





# Tensión Superficial

- Las moléculas de la superficie tienen mayor energía potencial que las situadas en el interior (energía superficial)
  - Para mover una molécula del interior de un líquido (menos energía) hasta la superficie (alta energía), hay que realizar trabajo
  - Mover una molécula de la superficie hasta el interior libera energía (por eso se va minimizando la superficie)
- Hay diferentes maneras de ver el concepto de tensión superficial (dimensionalmente)
  - Fuerza por unidad de longitud ( $\text{N m}^{-1}$ )
  - Energía por unidad de superficie ( $\text{J m}^{-2}$ )
  - En unidades fundamentales ( $\text{kg s}^{-2}$ )
- Todos son válidos; pueden convenir según el problema en cuestión



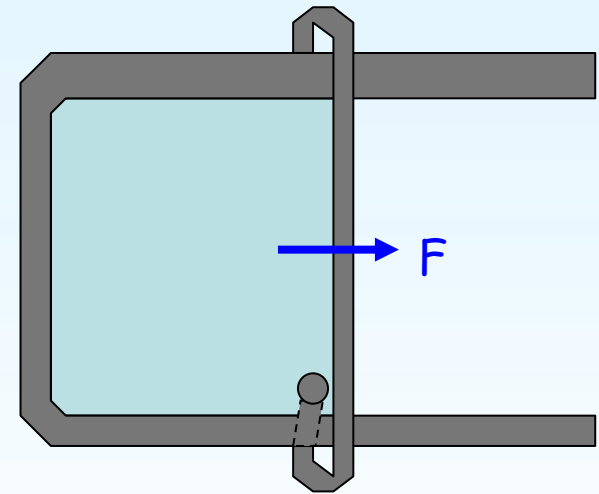
# Tensión Superficial

- Las moléculas de la superficie tienen mayor energía potencial que las situadas en el interior (energía superficial)
  - Para mover una molécula del interior de un líquido (menos energía) hasta la superficie (alta energía), hay que realizar trabajo
  - Mover una molécula de la superficie hasta el interior libera energía (por eso se va minimizando la superficie)
- Hay diferentes maneras de ver el concepto de tensión superficial (dimensionalmente)
  - Fuerza por unidad de longitud ( $\text{N m}^{-1}$ )
  - Energía por unidad de superficie ( $\text{J m}^{-2}$ )
  - En unidades fundamentales ( $\text{kg s}^{-2}$ )
- Todos son válidos; pueden convenir según el problema en cuestión



# Cómo medir la tensión superficial de un líquido

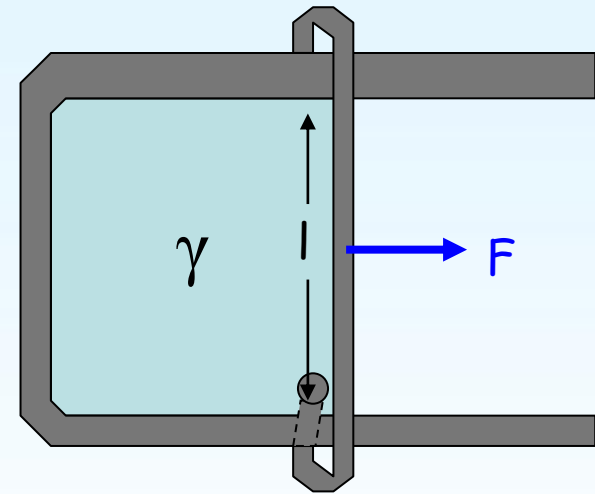
- Consideramos el dispositivo a la derecha; consiste en
  - Alambre en forma de U
  - Alambre deslizante
- Al introducir una película de disolución jabonosa
  - Se contrae inmediatamente
  - Para volver a la posición original, hay que aplicar una fuerza  $F$



# Una película tiene dos lados...

- La película es delgada, pero muy ancho comparado con el radio de una molécula
- La consideramos como un fluido compuesto de un interior y **dos superficies** (una por cada lado), ambas en contacto con el aire
- Al tirar la fuerza  $F$ , las superficies se amplían (requiere trabajo), incorporando moléculas del interior
- Empíricamente: si el alambre deslizante tiene longitud  $l$ , la tensión superficial actúa sobre una longitud  $2l$  ( $l$ , en ambos lados)
- La tensión superficial es

$$\gamma = \frac{F}{2l}$$



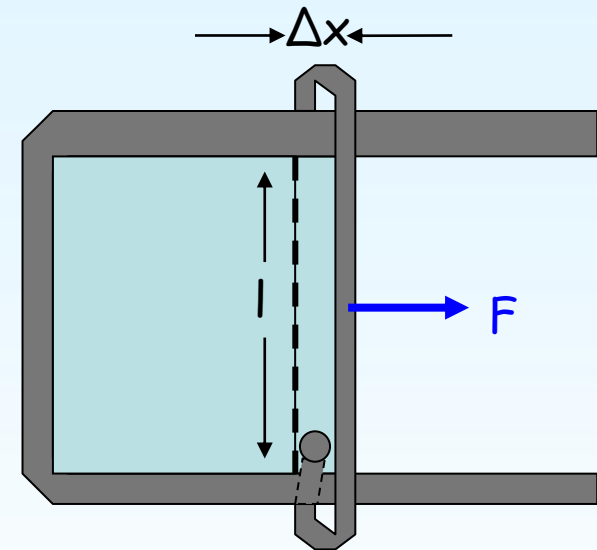
# La tensión superficial es una propiedad del líquido

- Se trata de incorporar  $n$  moléculas en las superficies, añadiendo  $(2 l \Delta x)$  de área
- Si  $n_a$  es el número de moléculas adicionales por unidad de superficie, entonces

$$n = (2l \Delta x) n_a$$

- Si cada molécula de la superficie tiene  $w'$  más energía potencial que una molécula en el seno, entonces el trabajo necesario para ampliar el área es

$$W = n w' \\ = 2n_a l \cancel{\Delta x} w' = F \cancel{\Delta x}$$



$$\gamma = \frac{F}{2l} = n_a w' \quad \gamma = \frac{n}{\Delta A} w' = \frac{W}{\Delta A}$$

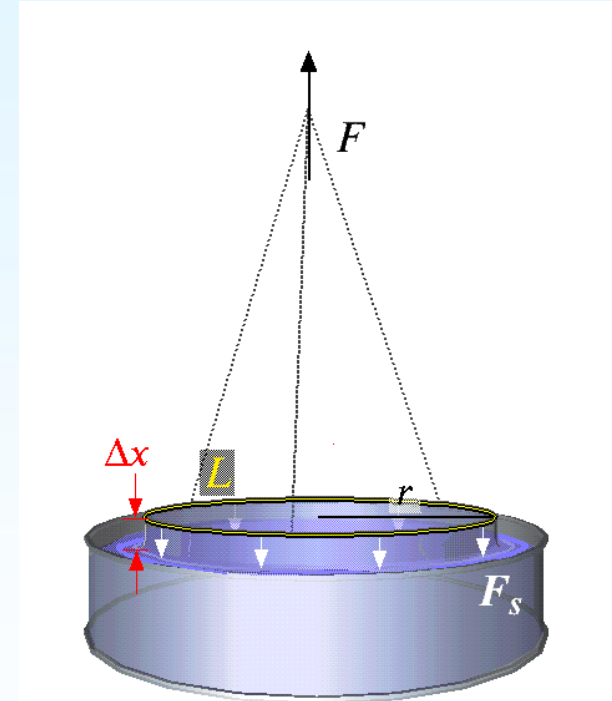


# Otro Método para medir la tensión superficial

- Un alambre circular de longitud  $l$  ( $2\pi r$ ) se extrae de una masa líquida
- La fuerza adicional  $F$  necesaria para equilibrar las fuerzas superficiales ( $\gamma l$ ), una a cada lado, se mide por la tensión que aparece en un resorte o por la torsión de un hilo

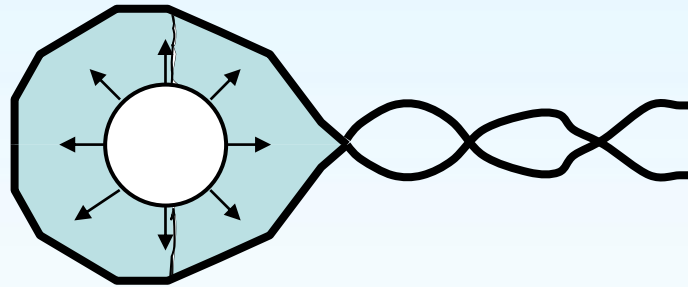
$$\gamma = \frac{F}{2l}$$

- Porqué 2: El hilo tiene un interior y exterior



# La fuerza es tangencial a la superficie

- Consideramos el anillo de alambre con un hilo en su interior, dentro de una película de disolución jabonosa



- Si rompemos la burbuja en el interior del hilo
  - La película restante intentará minimizar su área
  - La tensión superficial actúa en la plana de la película
  - Termina en la forma óptima



# Programa

- **III. FENÓMENOS DE SUPERFICIE.( 2h)**
- Fuerzas intermoleculares. Cohesión. Tensión superficial. Energía superficial. **Presión debida a la curvatura de la superficie interfacial. Contacto entre dos líquidos.** Contacto sólido-vapor-líquido. Ángulo de contacto. Capilaridad. Ley de Jurin.

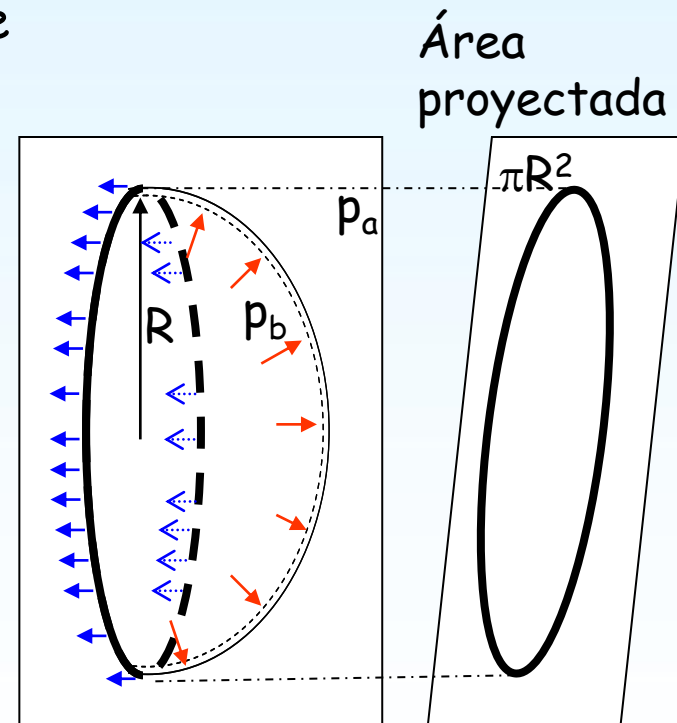




# Diferencia de presión entre las dos caras de un burbuja

- Burbuja de jabón - dos superficies esféricas muy próximas con un líquido entre ellas; consideramos el hemisferio de la derecha (y aprovechamos la simetría)
- La  $\gamma$  tiende a reducirlas  $\rightarrow$  compresión del aire en el interior (diferencia de presión)
- Balance de fuerzas
  - **Hacia la derecha:**  $(p_b - p_a)\pi R^2$
  - **Hacia la izquierda:**  $2\gamma(2\pi R)$

$$p_b - p_a = 4\gamma / R \quad (\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2})$$



# Diferencia de presión entre las dos caras de una gota líquida

- La misma derivación, pero sólo con una lámina superficial
- Balance de fuerzas
  - **Hacia la derecha:**  $(p_b - p_a)\pi R^2$
  - **Hacia la izquierda:**  $\gamma (2\pi R)$

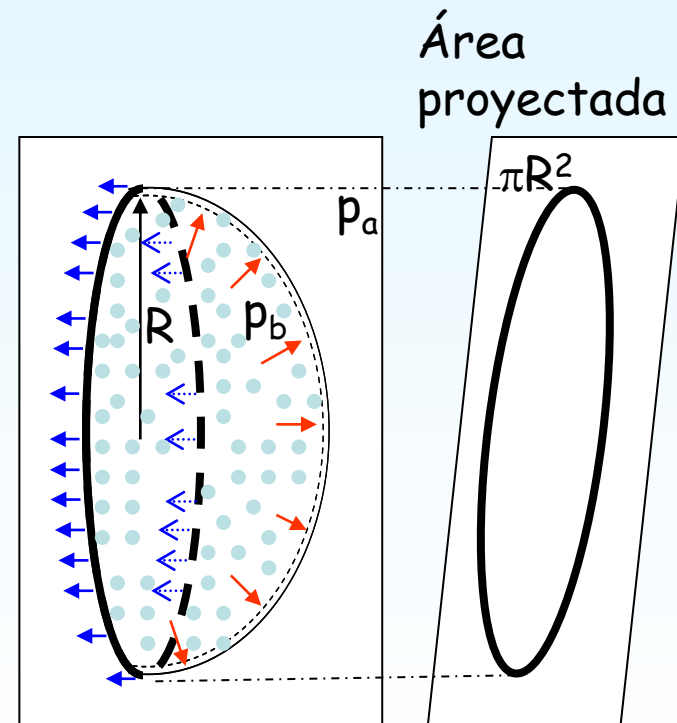
$$p_b - p_a = 2\gamma / R$$

Ecuación Young-Laplace

Ejemplos:

Gota, agua de nube

Gota de aceite en vinagre



Válido para el contacto entre dos líquidos



# Superficies cilíndricas

- En particular, capilares (plantas, venas, etc.)

- Fuerza debida a la **sobrepresión**

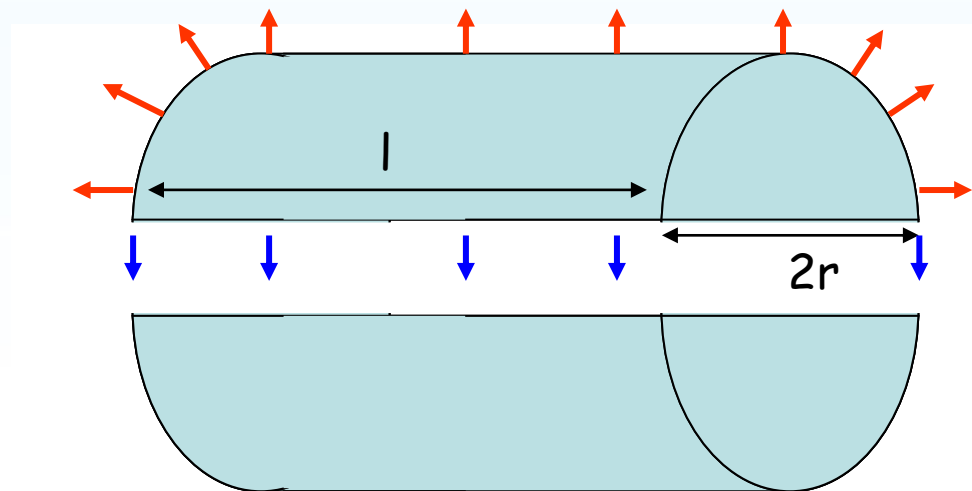
$$F_p = (p_i - p_0) 2r l$$

- Fuerza debida a la **tensión superficial**

$$F_\gamma = 2l \gamma$$

- En equilibrio

$$p_i - p_0 = \frac{\gamma}{r}$$



# Programa

- **III. FENÓMENOS DE SUPERFICIE.( 2h)**
- Fuerzas intermoleculares. Cohesión. Tensión superficial. Energía superficial. Presión debida a la curvatura de la superficie interfacial. Contacto entre dos líquidos. **Contacto sólido-vapor-líquido. Ángulo de contacto. Capilaridad. Ley de Jurin.**



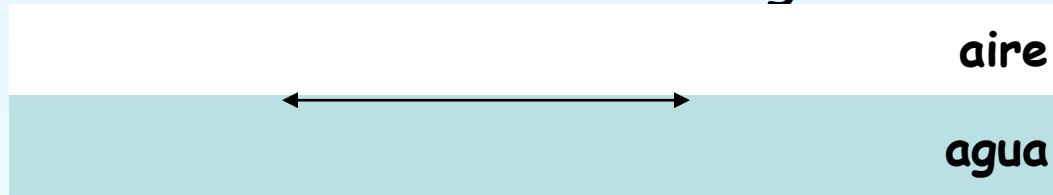
# La tensión superficial no es una propiedad del líquido

- ¿El profesor se contradice?
- Ningún líquido puede existir en un vacío
- Entonces, la superficie representa un límite entre dos medios
- Cuando se habla de  $\gamma$  como propiedad de algún líquido, se supone que el otro medio es el aire (que tiene poca influencia)



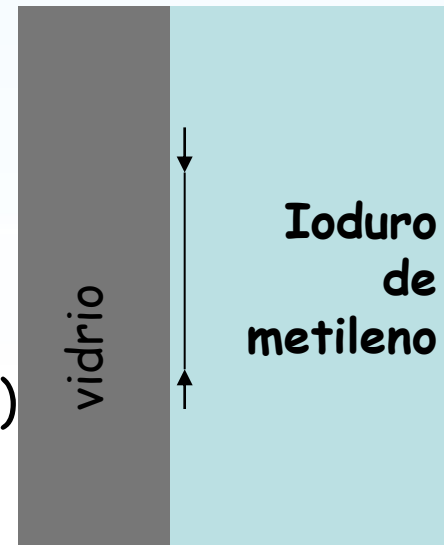
# La tensión superficial ¿Puede ser negativo?

- Superficie agua-aire: la  $\gamma$  se debe a la *cohesión* entre las moléculas de agua



- Para una superficie entre vidrio y Ioduro de Metileno, resulta más importante la *adhesión* del líquido al vidrio que la *cohesión* entre moléculas de líquido

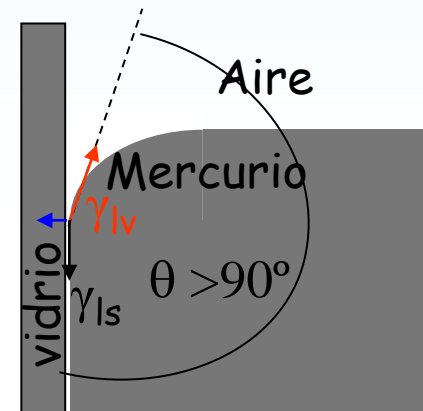
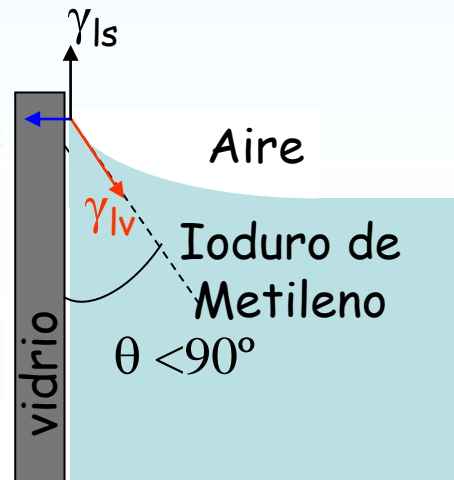
Consecuencias:  
El líquido se adhiere ("moja") al vidrio  
La superficie (del líquido) está en compresión



# Contacto sólido-líquido-vapor

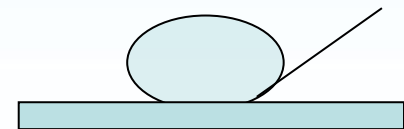
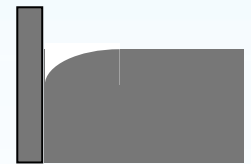
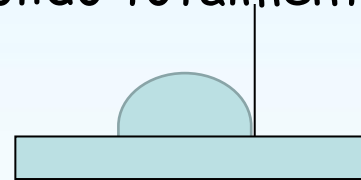
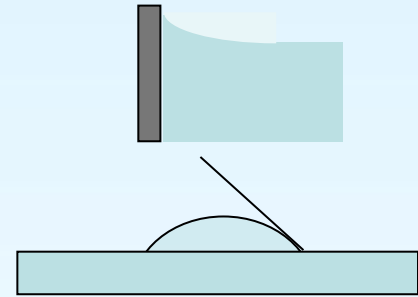
## Ángulo de contacto

- Curvatura de una superficie líquida cerca de una pared
- Forma de la curvatura depende de las fuerzas de atracción entre las distintas fases (análisis de vectores en el "punto de contacto"):
  - **Fuerzas de cohesión** entre las moléculas del líquido en superficie/contacto con la fase vapor
    - Debidas a  $\gamma_{lv}$ , dependen sólo de la naturaleza del líquido (con aire).
  - **Fuerzas de adhesión**: atractivas entre líquido y sólido
  - Fuerzas de repulsión/atracción entre las moléculas del líquido en superficie/contacto con la fase sólido (tensión/compresión superficial)
    - Fuerzas de repulsión (compresión), debidas a  $\gamma_{ls}$  ( $<0$ ); pared "mojada"
    - Fuerzas de atracción (tensión), debidas a  $\gamma_{ls}$  ( $>0$ ); pared "seca"
    - Dependen de la naturaleza de ambos



# Resumen - Ángulo de Contacto

- El líquido moja al sólido
  - Adhesión (pared) > Cohesión (líquido)
    - El límite tiende a aumentar (concavidad)
    - El líquido se extiende por la pared
  - Reduce el ángulo de contacto ( $0 < \theta < 90^\circ$ )
  - Nota:  $\theta = 0^\circ \rightarrow$  el líquido moja el sólido totalmente
    - $\cos(\theta=0) = 100\%$
- Indiferencia ( $\theta = 90^\circ$ )
  - Cohesión (líquido) = Adhesión (pared)
- El líquido no moja al sólido
  - Cohesión (líquido) > Adhesión (pared)
  - Reducción de la superficie (convexidad)
  - Aumenta el ángulo de contacto ( $\theta > 90^\circ$ )





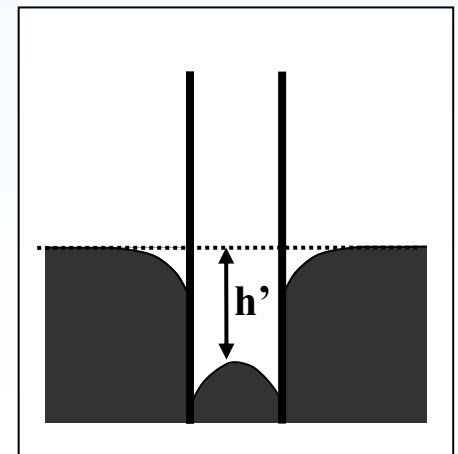
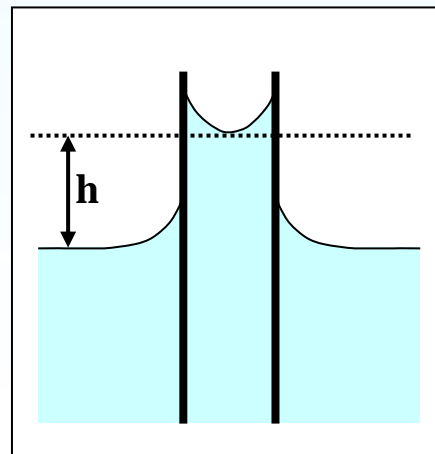
# Capilaridad

## Ley de Jurin

- En tubos estrechos (capilares), se nota un comportamiento particular de los líquidos
- Depende si el líquido moja la pared

líquido que moja

líquido que no moja



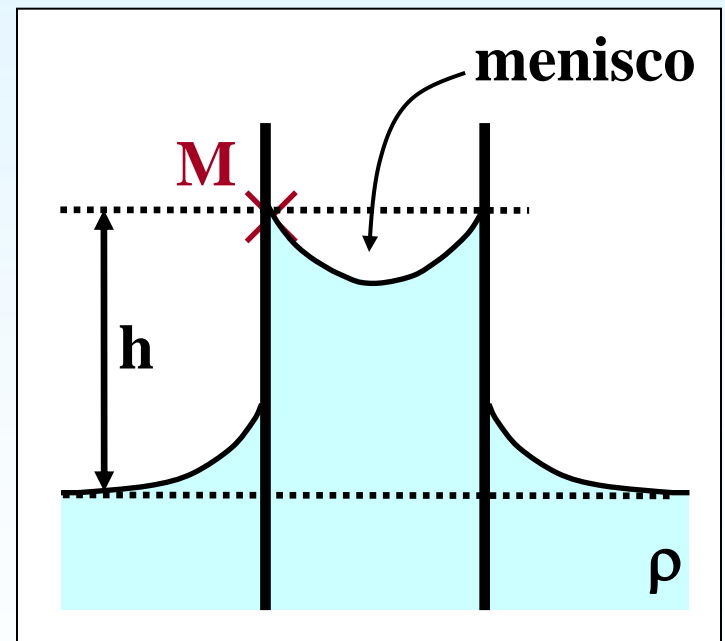
Ascenso por  $h$

Descenso por  $h'$



# Analizamos el menisco

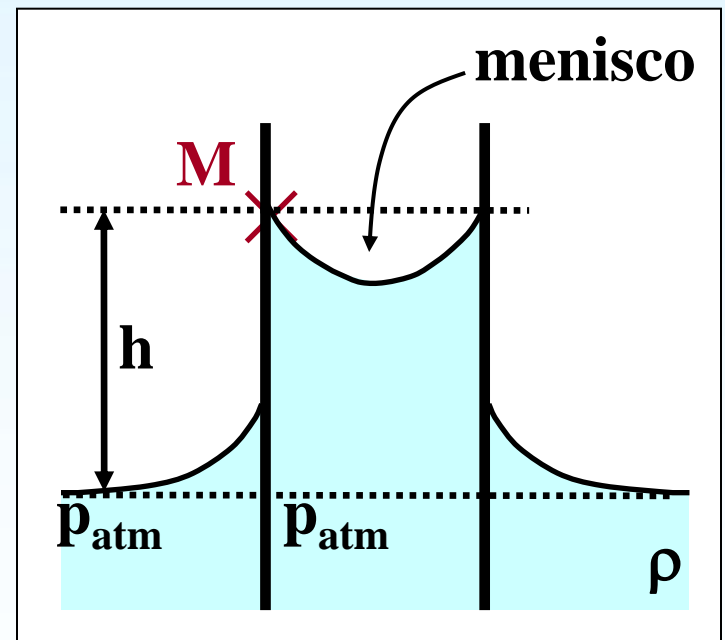
- Lo entendemos aplicando principios ya presentados
- ¿Qué presión hay en el punto  $M$  en el líquido justamente por debajo del punto de contacto?
- Examinamos el menisco por dos puntos de vista:
  - Por la ecuación hidrostática
  - Por la ecuación de Laplace



# Analizamos el menisco

- ¿Qué presión hay en el punto  $M$  en el líquido justamente por debajo del punto de contacto?
  - En la superficie libre hay  $p_{atm}$
  - Pascal: a la misma altura, hay  $p_{atm}$
  - Por la ecuación hidrostática:

$$p_M = p_{atm} - \rho g h$$



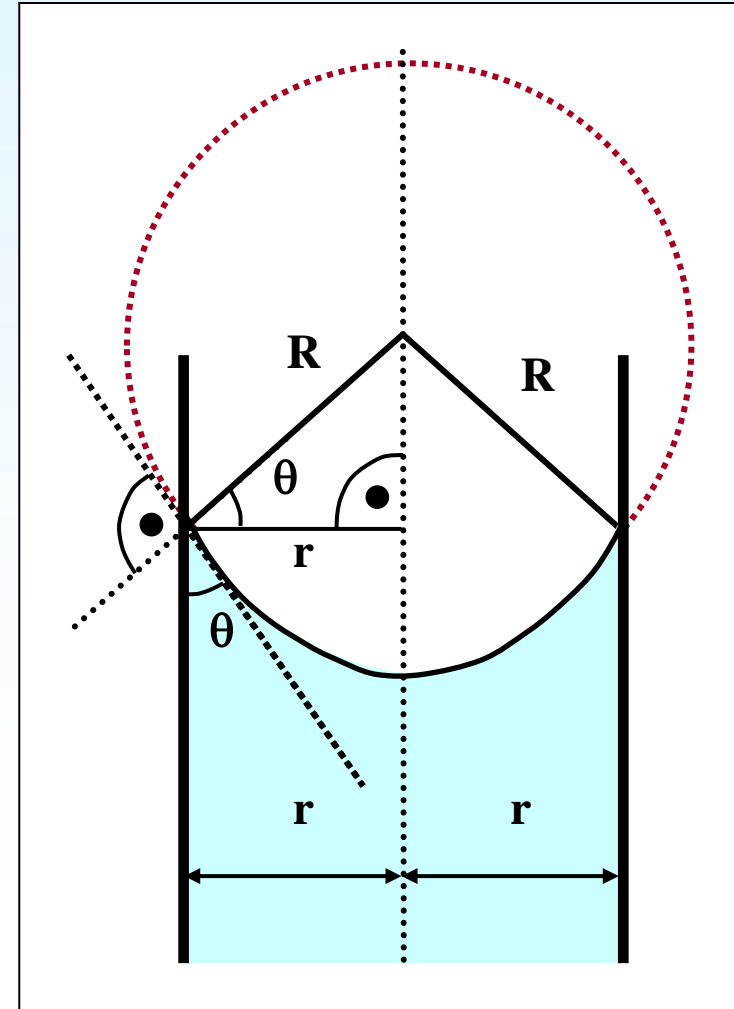
# Analizamos el menisco

- Truco: consideramos el menisco como parte de una burbuja de radio  $R$ 
  - Si  $\theta > 0^\circ$ , entonces  $R > r$
- Entonces por la Ley de Laplace

$$p_M = p_{atm} - \frac{2\gamma}{R}$$

- Antes de comparar las dos estimaciones de  $p_M$ , nos fijamos en la trigonometría

$$r = R \cos \theta$$



# La Ley de Jurin

- Igualando las dos estimaciones de  $p_M$

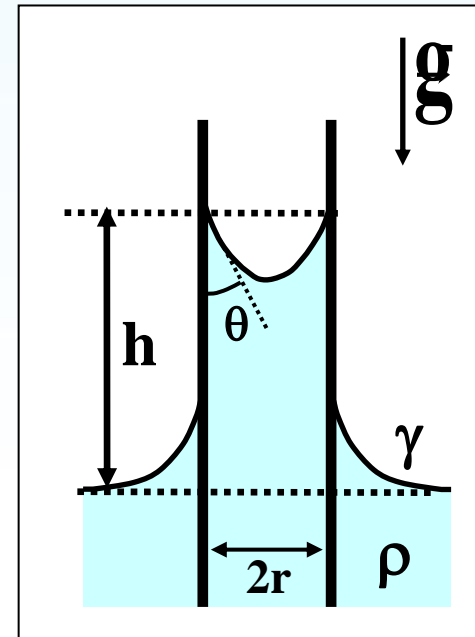
- Hidrostática  $p_M = p_{atm} - \rho g h$
- Laplace  $p_M = p_{atm} - \frac{2\gamma}{R}$

$$\rho g h = \frac{2\gamma}{R}$$

$$r = R \cos \theta$$

$$\rho g h = \frac{2\gamma \cos \theta}{r}$$

- Resultado: la altura crece con la inversa del radio del tubo



# Anécdota biológica

- Cuestión: ¿La capilaridad explica el ascenso de la savia a los árboles?
- Datos típicos:
  - Conductos de xilema,  $r \sim 20 \mu\text{m}$
  - $\gamma_{\text{savia}} \sim 0.07 \text{ N/m}$
  - $\rho_{\text{savia}} \sim 1000 \text{ kg/m}^3$
  - savia moja por completo ( $\theta \sim 0^\circ$ )
- Altura máxima alcanzable por capilaridad:

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho g r} = \frac{2(0.07 \text{ N/m})}{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 0.7 \text{ m}$$

Contestación: insuficiente



Xilema de un roble



# Conceptos/Ecuaciones a Dominar

- Tensión Superficial

$$\gamma = \frac{F}{2l} = n_a w' \quad \gamma = \frac{n}{\Delta A} w' = \frac{W}{\Delta A}$$

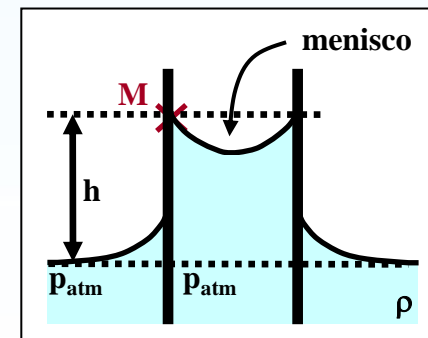
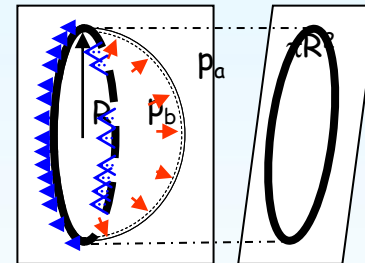
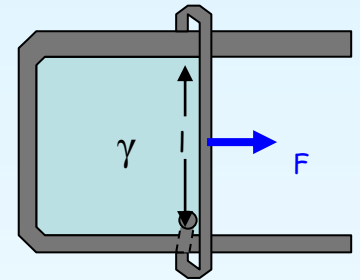
- Junta con presión

Burbujas:  $p_b - p_a = 4\gamma / R$

Gotas:  $p_b - p_a = 2\gamma / R$

- Angulo de Contacto

- Capilaridad:  $\rho g h = \frac{2\gamma \cos\theta}{r}$



**Fin**

