

Capítulo 5

FENÓMENOS DE SUPERFICIE: TENSIÓN SUPERFICIAL Y CAPILARIDAD

5.1 Tensión superficial y ley de Laplace

5.2 Ejemplos biológicos

5.3 Ángulo de contacto y capilaridad

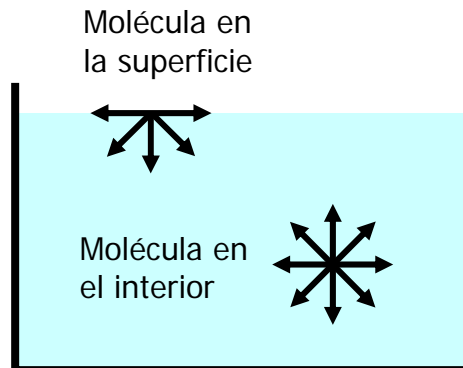
5.4 Ejemplos biológicos

Introducción

Los líquidos tienen un **volumen fijo**. Sin embargo, **su forma varía** (cambia el área de la superficie que los envuelve): **se adaptan al recipiente** (ocupando la zona más baja por gravedad) **dejando una *superficie libre*** (no totalmente plana) o **adoptan formas especiales: gotas, pompas y burbujas.**

Las **fuerzas superficiales** (***cohesión***: líquido-líquido, ***adhesión***: líquido-sólido) son responsables de **muchos fenómenos con interés biológico**, basadas en los conceptos de **tensión superficial** y **capilaridad**.

5.1 Tensión superficial y ley de Laplace



Cada molécula de un líquido está rodeada por otras: la atracción en todas direcciones se compensa en cada punto, ***excepto en la superficie***, donde la resultante es una atracción neta hacia el interior.

El líquido tiende a cohesionarse (no dispersarse) y a **minimizar su superficie** (formar gotas).

La **superficie** se comporta **como una película** que ofrece resistencia a su deformación y por tanto a romperse.

5.1.1 Tensión superficial

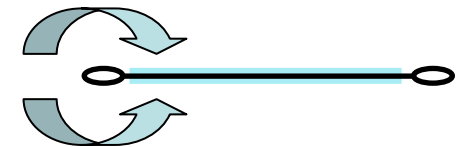
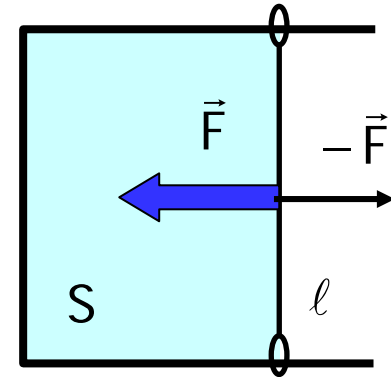
Para cuantificar esta *fuerza de cohesión* consideremos una estructura de alambre con un lado deslizante, en la que se coloca una capa de líquido.

El líquido tratará de minimizar la superficie S ejerciendo una fuerza F sobre el lado deslizante, que podemos medir. Se observa que:

$$F = 2\gamma \ell$$
 donde γ es la tensión superficial.

- γ es una **propiedad del líquido**.
- F **depende de ℓ** (longitud del cable deslizante) pero **no de la superficie S** (a diferencia de una membrana elástica).
- Se introduce **un factor 2** porque hay dos superficies (por ejemplo un líquido en un plato tiene sólo una).

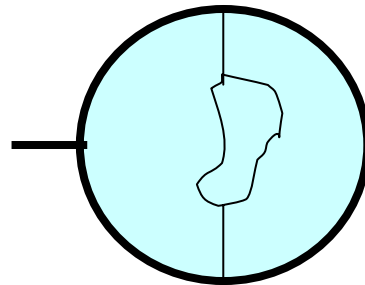
La **tensión superficial γ** es la **fuerza por unidad de longitud** que ejerce **una superficie** de un líquido sobre una línea cualquiera situada sobre ella (borde de sujeción).



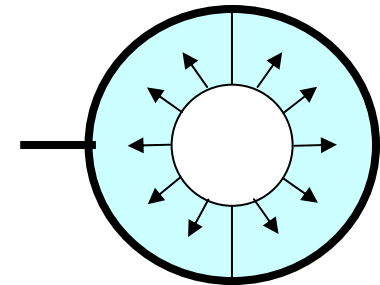
La fuerza debida a la tensión superficial es **perpendicular a la línea y tangente a la superficie**.

Esto **puede verse** cuando se introducen un anillo de alambre y un hilo en forma de bucle en una disolución jabonosa y a continuación se sacan:

Se forma una película sobre la que flota el hilo:

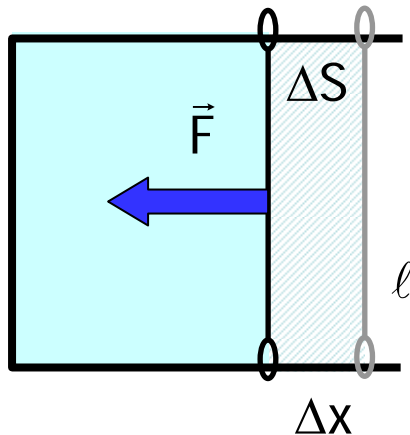


Al pinchar el interior del bucle el hilo forma un círculo perfecto:



efecto_de_materiales_tensoactivos.mov

La **tensión superficial** γ también es la **energía por unidad de área** que se necesita **para aumentar una superficie**:



$$W = F \Delta x = 2\gamma l \Delta x = 2\gamma \Delta S$$

Como la formación de una superficie requiere energía, los líquidos minimizan su área expuesta respecto al entorno que les rodea. De ahí que las superficies de los lagos, el mar, etc. en calma sean planas y los líquidos al caer tiendan a formar volúmenes esféricos (gotas).

Tabla de coeficientes γ
(unidades SI: N/m ó J/m²)

- para una sustancia **disminuyen al aumentar la temperatura.**
- **el del agua es mayor que en la mayoría de los líquidos** (permite que los insectos se posen encima)

Líquido	T (°C)	γ (N/m)
Helio	-270	0.0002
Hidrógeno	-255	0.002
Neón	-247	0.005
Oxígeno	-193	0.016
Etanol	20	0.022
Agua jabonosa	20	0.025
Agua	100	0.059
	60	0.062
	20	0.073
	0	0.076
Mercurio	20	0.465
Plata	970	0.800

A veces interesa disminuir la tensión superficial de un líquido. Se logra disolviendo en él **sustancias *surfactantes* (tensioactivos)** que **forman una película superficial cuyas moléculas apenas son atraídas por las moléculas del líquido del interior**. Se logra penetrar en irregularidades de piel y tejidos. **También facilita que el líquido *moje***, como veremos.

Ejemplos: los **jabones** son surfactantes del agua,
ciertas **lipoproteínas en alveolos pulmonares**.

5.1.2 Formación de burbujas, gotas y pompas: ley de Laplace

Burbuja: separa la fase líquida (fuera) de la fase gaseosa (dentro): agua hirviendo.

Gota: líquido dentro y gas fuera.

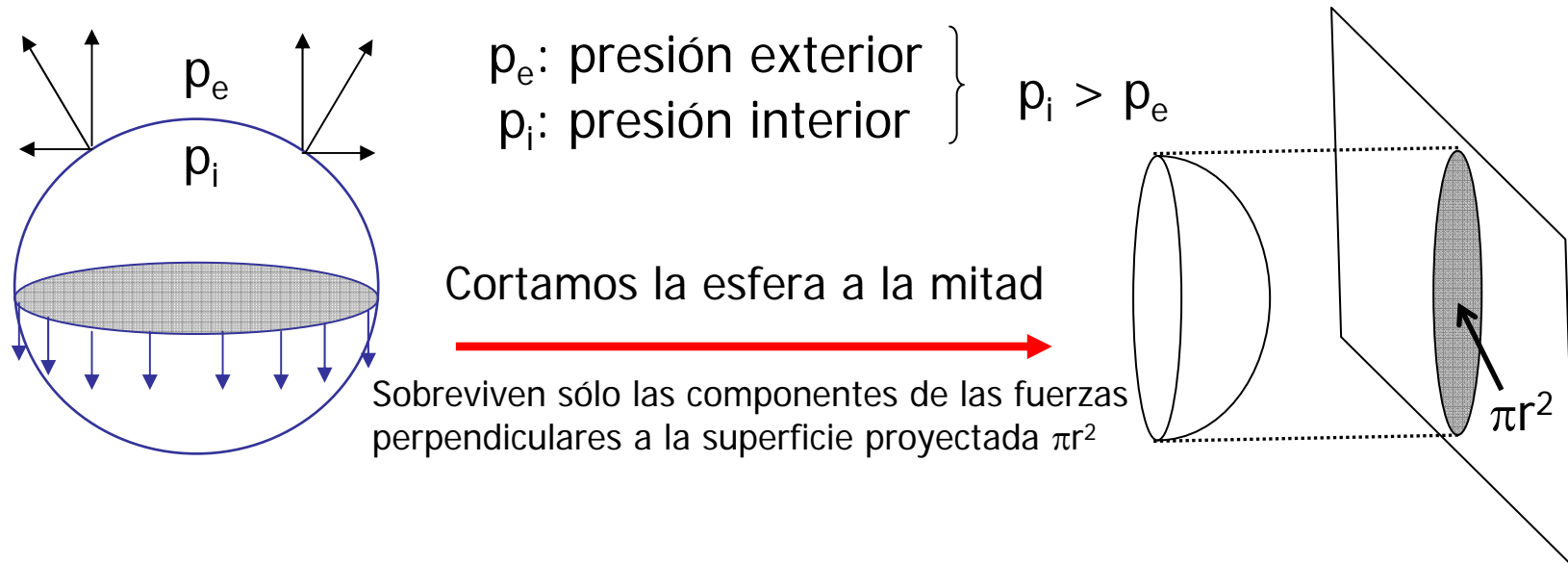
Pompa: película de líquido que separa el gas de dentro del de fuera (pompas de jabón).



pompa de jabón

Hallemos el **equilibrio mecánico de una pompa** de radio r formada por una película de líquido de tensión superficial γ :

- La fuerza debida a la **diferencia de presiones** interior y exterior **tiende a aumentar el tamaño** de la pompa.
- La fuerza debida a la **tensión superficial** que **tiende a minimizar el área** de la pompa.



Tensión superficial: $F = 2\gamma \times 2\pi r = 4\pi r\gamma$ (2 superficies para una pompa)

Diferencia de presiones: $F = \pi r^2 (p_i - p_e) = \pi r^2 \Delta p$ (véase la figura)

En equilibrio se igualan: $\Delta p = \frac{4\gamma}{r}$ Ley de Laplace para una pompa

Para una gota o una burbuja queda: $\Delta p = \frac{2\gamma}{r}$

- Cuanto mayor es γ mayor es la Δp para lograr equilibrio (agua jabonosa).
- Es más difícil formar pompas muy pequeñas.

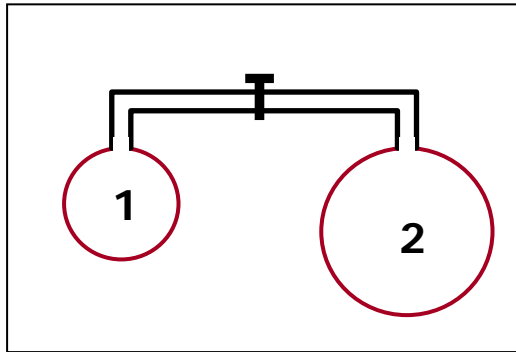
¿Qué pasa si se conectan dos bombas de distinto tamaño?



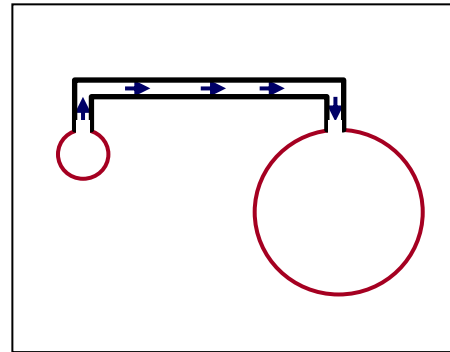
¿Qué pasa si se conectan dos pompas de distinto tamaño?

Solución:

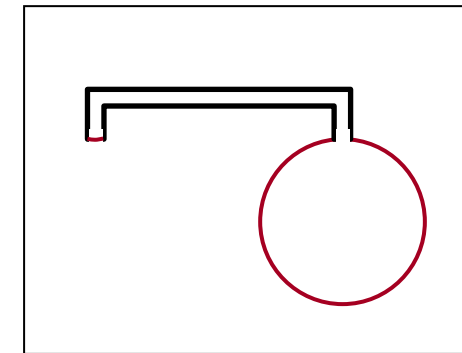
$$\text{Inicialmente, } P_1 - P_e = \frac{4\gamma}{r_1}; \quad P_2 - P_e = \frac{4\gamma}{r_2} \Rightarrow P_1 - P_2 = \frac{4\gamma}{r_1 r_2} (r_2 - r_1)$$



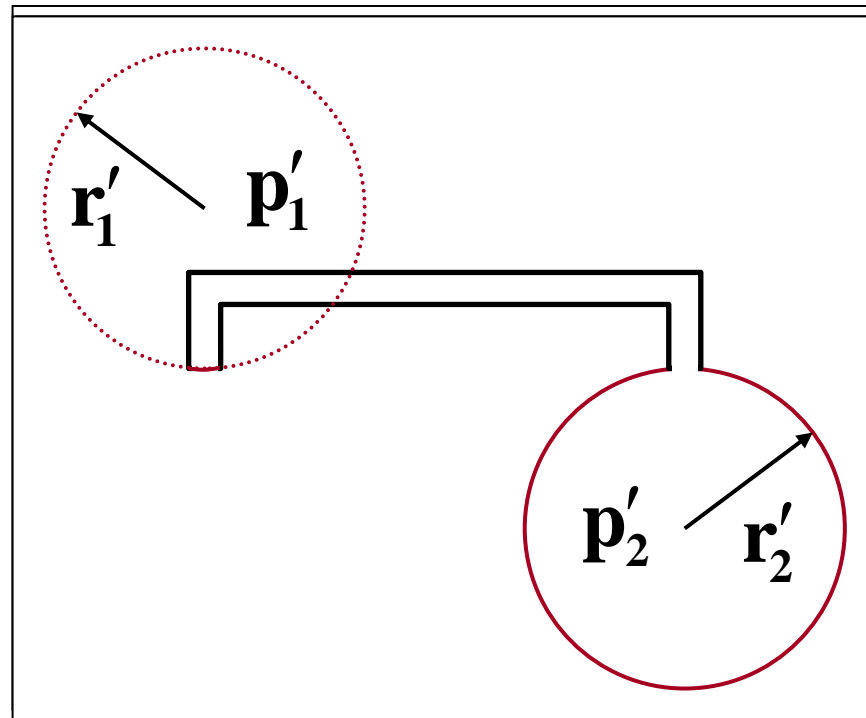
$$r_1 < r_2 \Rightarrow P_1 > P_2$$



Se abre la llave de paso
 \Rightarrow **el aire va de 1 a 2**



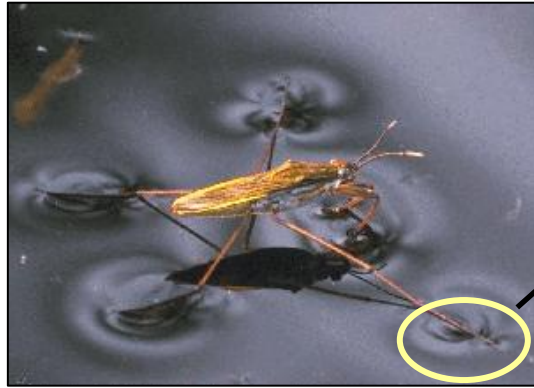
**la pequeña infla
a la grande**



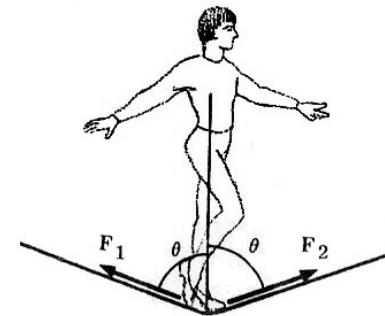
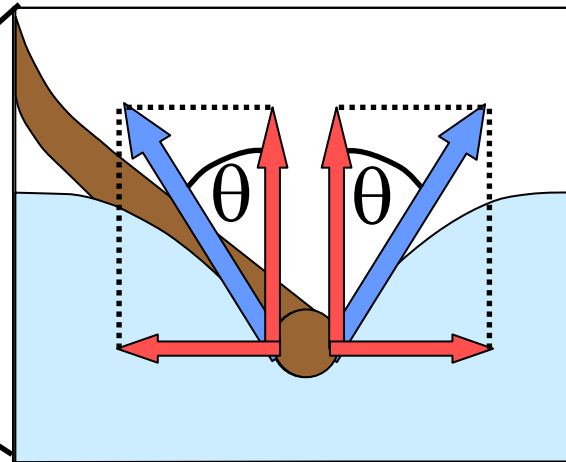
Al final : $\mathbf{p}'_1 = \mathbf{p}'_2 \Rightarrow \mathbf{r}'_1 = \mathbf{r}'_2$

5.2 Ejemplos biológicos

5.2.1 Tensión superficial: andando sobre el agua



Zapatero *Rhagovelia*



equilibrista

El peso del insecto queda compensado por la resistencia de la superficie del agua a ser deformada, igual que le ocurre al equilibrista. Esta fuerza sólo tiene componente vertical, pues la horizontal se anula:

componente vertical: $F_y = 2\pi r\gamma \cos \theta$ (× número de patas)

donde r es el radio de la depresión circular que forma la pata sobre la superficie (bastante grande pues las patas están muy extendidas).

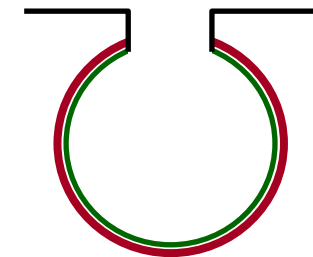
Hojas y flores también pueden flotar aunque sean más densas que el agua.

5.2.2 Tensión superficial: funcionamiento de los alveolos pulmonares de los mamíferos

Los **alveolos** son unos saquitos que se encuentran al final de los conductos respiratorios donde se produce el intercambio del O_2 y el CO_2 con la sangre.

Podemos imaginar un alveolo como una **pequeña vesícula** (aprox. $50\ \mu m$) que se **hincha** (factor 2) y se **deshincha** unas 12 veces/min al respirar.

Consta de una **membrana elástica exterior** recubierta por una **membrana líquida interior** (mucosa).



alveolo

La **relación entre la presión y el radio** de la **membrana líquida** está controlada por la **ley de Laplace** y depende de la **tensión superficial**. En cambio esta **relación para la membrana elástica** es distinta, controlada por las **leyes de la elasticidad**.

Problema: No hay suficiente presión para inflar los alveolos si γ constante

La presión manométrica en el interior de los alveolos es $p_i = -3 \text{ mm Hg}$.

Si la tensión superficial γ del alveolo desinflado ($r = 50 \text{ }\mu\text{m}$) tuviera el mismo valor que cuando está inflado, $\gamma_{\text{inflado}} = 0.05 \text{ N/m}$, entonces la sobrepresión sería:

$$p_i - p_e = \frac{2\gamma}{r} = \frac{2 \times 0.05 \text{ N/m}}{5 \times 10^{-5} \text{ m}} = 2 \times 10^3 \text{ Pa} = 15 \text{ mm Hg}$$

lo que exigiría que la presión manométrica en la cavidad pleural fuera $p_e = -18 \text{ mm Hg}$. Sin embargo ésta es $p_e = -4 \text{ mm Hg}$ (suficiente para mantener a los pulmones junto a la pared de la cavidad).

Es decir, en realidad $p_i - p_e = 1 \text{ mm Hg}$ (15 veces menor de lo esperado).

Solución: γ varía gracias a un tensioactivo (fosfolípido) de concentración variable

- Al inspirar, el alveolo está desinflado y la concentración de tensioactivo es elevada de forma que γ es muy baja y el alveolo se dilata sin dificultad.
- Al dilatarse, la concentración de tensioactivo disminuye y γ aumenta hasta el máximo de dilatación. Al espirar, el incremento de tensión superficial ayuda a desinflar el alveolo y a expeler el aire.

5.3 Ángulo de contacto y capilaridad

Fuerzas de cohesión y adhesión

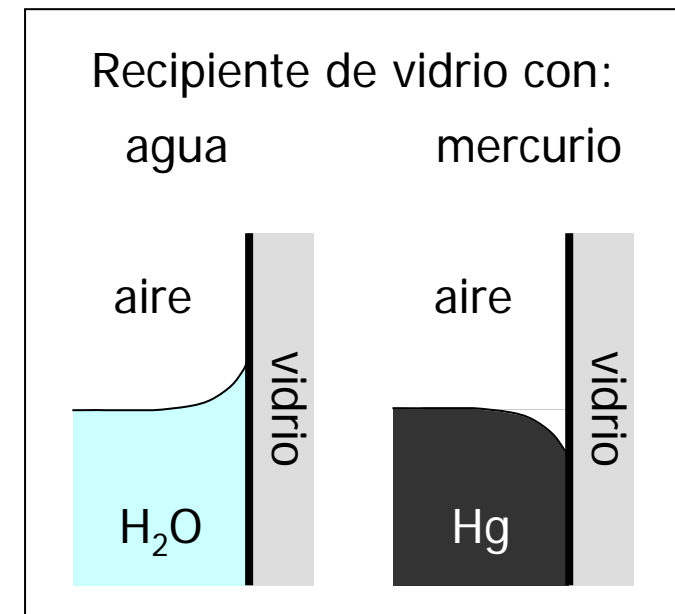
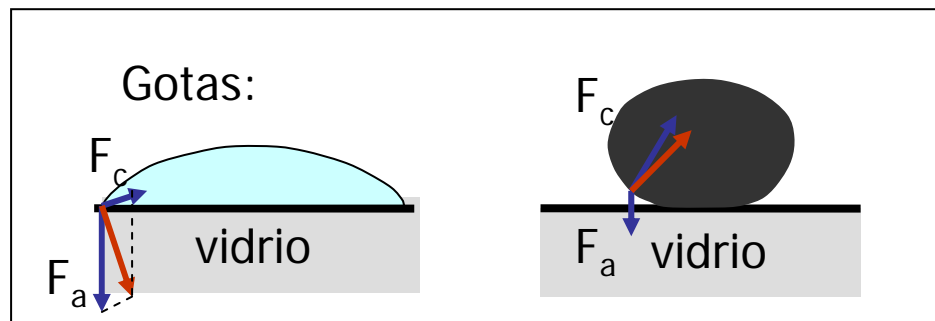
Las fuerzas atractivas **entre las moléculas del líquido**, causantes de la tensión superficial, se llaman **fuerzas de cohesión**. Dependen sólo de la **naturaleza del líquido**.

Con ellas compiten las **fuerzas de adhesión**, **entre el líquido y el sólido** con el que está en contacto, dependiendo de la **naturaleza de ambos**.

Su relación determina la forma de la superficie libre del líquido en las proximidades de una pared sólida.

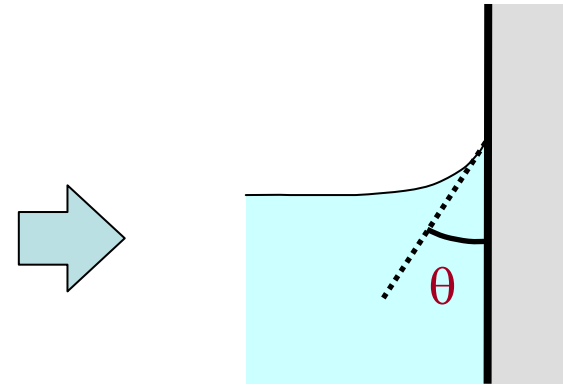
Unas veces las **fuerzas adhesivas predominan** (ejemplo: **agua-vidrio**).

Otras veces las **fuerzas cohesivas predominan** (ejemplo: **mercurio-vidrio**).

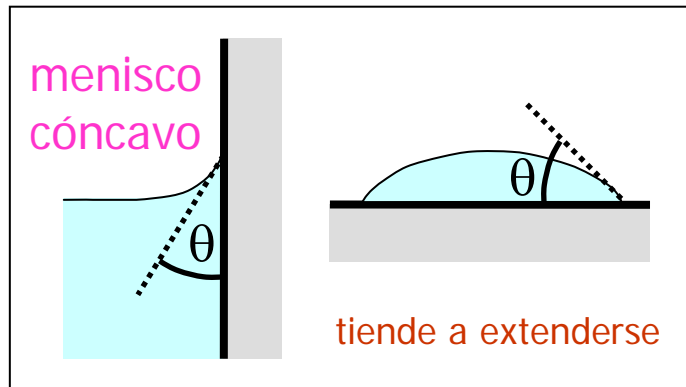


Ángulo de contacto

ángulo θ que forma la superficie sólida con la tangente al superficie líquida en el punto de contacto (pasando por el líquido).



Si la adhesión predomina



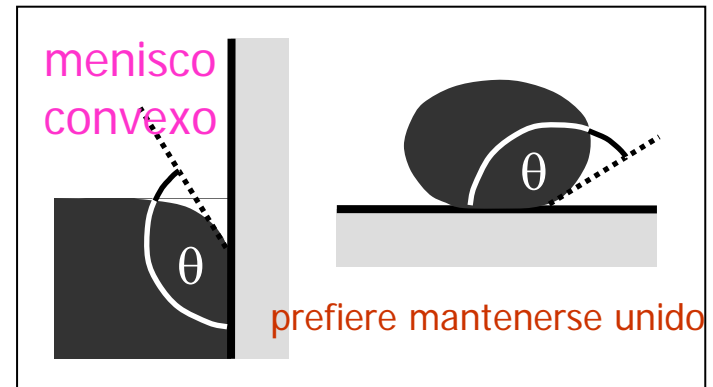
ángulo de contacto $< 90^\circ$

líquido que *moja*

Ej.: Agua-vidrio limpio: $\theta = 0^\circ$

Agua-plata: $\theta = 90^\circ$

Si la cohesión predomina



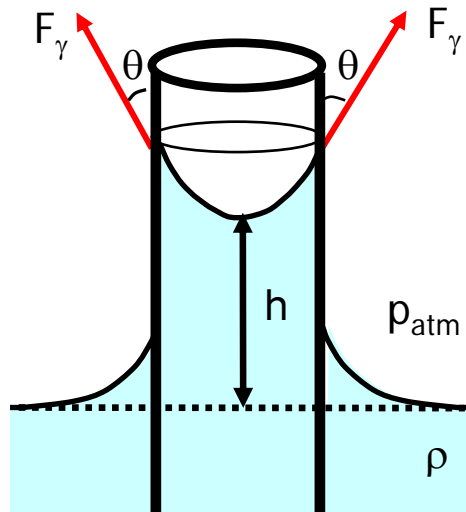
ángulo de contacto $> 90^\circ$

líquido que *no moja*

Mercurio-vidrio: $\theta = 140^\circ$

Acción capilar o capilaridad

Dependiendo del ángulo de contacto, puede ocurrir que el líquido ascienda ($\theta < 90^\circ$) o descienda ($\theta > 90^\circ$) por un tubo estrecho (capilar) una cierta altura h , lo que se denomina **capilaridad** o **acción capilar**.



En efecto: en el equilibrio, el peso de la columna de líquido se compensará con la componente vertical de las fuerzas de cohesión $F_\gamma \cos\theta$ (debida a la tensión superficial γ). Las fuerzas de adhesión no intervienen (son perpendiculares a la superficie del tubo).

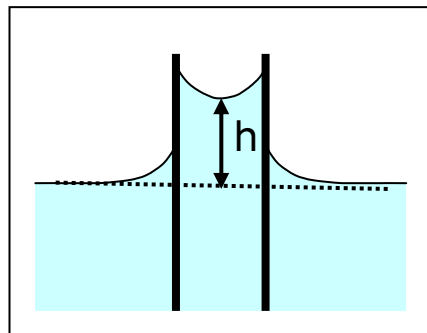
$$2\pi r \gamma \cos \theta = \rho g \pi r^2 h \Rightarrow$$

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

$h \uparrow$ si $\gamma \uparrow$ $h \uparrow$ si $r \downarrow$
 Si $\theta = 90^\circ$, $h = 0$
 Si $\theta < 90^\circ$, $h > 0$
 Si $\theta > 90^\circ$, $h < 0$

líquido que moja ($\theta < 90^\circ$)

Por tanto:

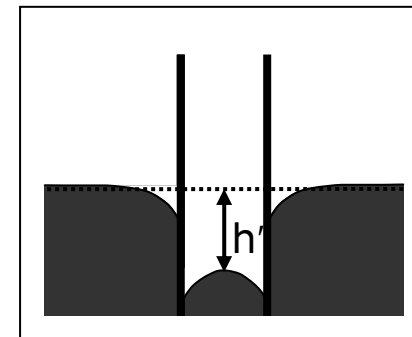


asciende una altura h

$$\theta = 90^\circ$$

El líquido ni sube
ni baja en el capilar

líquido que no moja ($\theta > 90^\circ$)



desciende una altura h' Cap. 5/16

5.3 Ejemplos biológicos

Ascenso de la savia en los árboles: capilaridad y otros mecanismos

- **Hipótesis:** la savia asciende por capilaridad

Comprobación:

estimación de la altura máxima alcanzable por capilaridad

→ xilema \approx conductos con $r \approx 20 \mu\text{m}$

→ savia \approx agua con sales

$$\gamma_{\text{savia}} \approx \gamma_{\text{agua}} \approx 0.073 \text{ N/m (20}^\circ\text{C)}$$

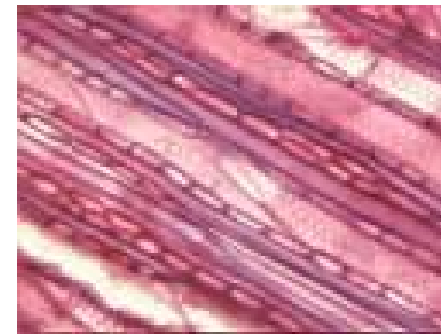
$$\rho_{\text{savia}} \approx \rho_{\text{agua}} \approx 1000 \text{ kg/m}^3$$

→ la savia moja por completo ($\theta \approx 0^\circ$)

Altura máxima:

$$h_{\text{max}} = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} = \frac{2 \times 0.073 \text{ N/m}^2 \times 1}{10^3 \text{ kg/m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 20 \times 10^{-6} \text{ m}} = 0.74 \text{ m} = 74 \text{ cm}$$

Conclusión: es insuficiente



xilema del chopo

- La **presión osmótica** (siguiente tema) también es insuficiente.
- Veamos **el mecanismo que más contribuye** a la elevación de la savia:

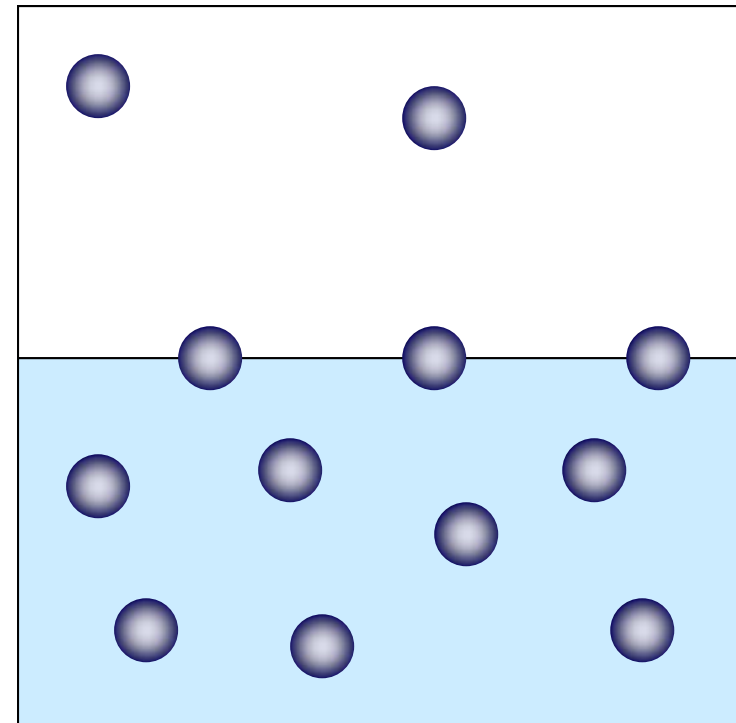
Al contrario que un gas, un líquido tiende a permanecer unido por las **fuerzas de cohesión**. Este fenómeno se llama **presión negativa** (agua pura → hasta 280 atm)

experimento:
separar dos placas de vidrio con y sin agua en el medio

Así, la **columna de savia se comporta como una barra sólida**, que asciende por el xilema salvando diferencias de altura enormes. ¿Pero cómo se eleva?

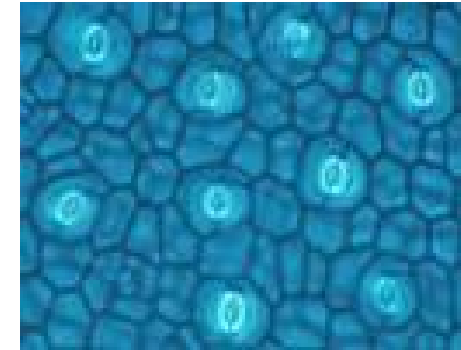
El ascenso se produce gracias a la **evaporación del agua en las hojas** (→ ver animación)

Las moléculas que se evaporan arrastran otras a las que están unidas por cohesión.



... y a la **capilaridad en los finos conductos de los estomas**, de unos 5 nm de radio.

Gracias a que la savia se comporta como una barra rígida, el ascenso capilar en los estomas podría soportar **una columna de hasta 3 km de altura** (compruébese).



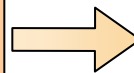
estomas de hinojo

Conclusión:

El ascenso se debe a la acción combinada de la capilaridad junto con la evaporación en las hojas y la presión negativa en los conductos del xilema

• **Pregunta final:**

¿por qué no usa el árbol conductos más finos para transportar la savia?



la viscosidad impediría el transporte de suficiente cantidad de savia (→ Ley de Poiseuille)

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

$$Q = \frac{\pi r^4}{8\eta L} \Delta p$$