

POTENCIAL HÍDRICO

El desarrollo del concepto de potencial hídrico y los métodos de su medida han sido muy útiles en la cuantificación del estado hídrico de las plantas. Es un concepto dinámico y unificador en el continuo Suelo-Planta-Atmósfera.

La idea nace de los potenciales químicos de las sustancias: un potencial químico (μ) está relacionado con la energía libre de un sistema y se refiere a su capacidad para hacer un trabajo. El potencial químico de una sustancia es una propiedad intensiva del sistema, como lo es la temperatura, es decir, no aumenta cuando el sistema se hace más grande.

Los potenciales son cantidades relativas (no se puede obtener un valor absoluto, hasta que no se compara con un sistema de referencia). En el caso del potencial químico del agua, la referencia es el agua pura, a la misma temperatura y presión (μ_a^0); de manera que la diferencia ($\mu_a - \mu_a^0$) tiene unidades de energía y se puede medir.

En las relaciones hídricas, el potencial químico del agua se convierte en potencial hídrico (ψ_a) dividiendo el potencial químico por el volumen molar parcial del agua (1 mol de agua pesa 18 g y su volumen es $18 \text{ cm}^3 = 18 \text{ mL} = 0,018 \text{ L}$). De esta manera se obtienen unidades de presión, que son muy fáciles de medir:

$$\psi_a = \frac{(\mu_a - \mu_a^0)}{\bar{V}_a} = \frac{\text{energía}}{\text{volumen}} = \text{presión}$$

Se define **Potencial Hídrico** de un sistema como: la cantidad de energía que se hace disponible (se puede transformar en trabajo), por unidad de volumen molar del agua, cuando un mol de agua se transfiere de manera isotérmica y reversible desde el agua pura a un punto del sistema.

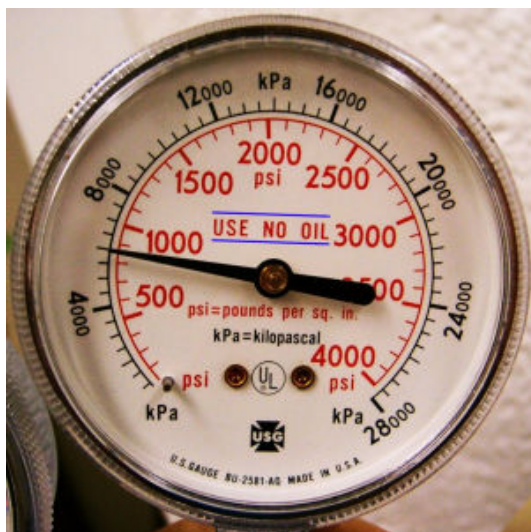
Este trabajo es equivalente a la **diferencia en energía libre de Gibbs** (o **entalpía libre**), por unidad de volumen molar del agua, entre el agua del sistema y el agua pura, a la misma presión y temperatura.

Al dividir energía (trabajo) entre volumen (en la forma de unidades básicas: masa [M], longitud [L] y tiempo [T]), nos queda:

$$\psi_a = \left[\frac{ML^2T^{-2}(\text{energía o trabajo})}{L^3(\text{volumen})} \right] = \left[\frac{MLT^{-2}}{L^2} \right] = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área}} = \text{presión} (N \cdot m^{-2}) = Pa$$

Equivalencias útiles entre unidades de presión:

- 1 atm = 1,013 bar = 1013 mbar = 1013 hPa = 101,3 kPa = 10,33 m H₂O = 760 mm Hg.
- 1 bar = 0,987 atm = 10⁵ Pa = 0,1 MPa = 100 kPa = 14,7 psi.
- 1 MPa = 10 bar.
- Debe conocerse la unidad anglosajona **psi** ("pounds per square inch": libras por pulgada cuadrada), porque todavía se utiliza mucho en ingeniería (manómetros, neumáticos,...)
- En el S.I. de Unidades se debe utilizar el **pascal (Pa)** como unidad de presión. Un pascal = newton · m⁻² (1Pa = Nm⁻²).



La aguja del manómetro en esta imagen indica 6.000 kPa ≈ 880 psi. Presión que equivale a unas 59 atm.

(Conviene fijarse en la advertencia >>USE NO OIL<<: al rosar un manómetro a una botella de gas no se debe, nunca, engrasar, por muy dura que esté la rosca (se suele utilizar cinta de teflón). La reacción de un gas a alta presión (sobre todo si es oxidante como el oxígeno) con un lubricante puede ocasionar la explosión de la botella y sería la última vez [†] que engrasamos algo).

Expresiones del potencial hídrico:

$$\mu_a - \mu_a^0 = RT \ln \frac{e}{e_0} = RT \ln \left(\frac{n_a}{n_a + n_s} \right) = RT \ln \chi_a = RT \ln a_a$$

donde e y e₀ son las presiones de vapor de la disolución y del agua pura. Según la ley de Raoult: (François-Marie Raoult, 1830-1901)

$$e = e_0 \cdot \left(\frac{n_a}{n_a + n_s} \right); \quad \text{luego} \quad \frac{e}{e_0} = \left(\frac{n_a}{n_a + n_s} \right)$$

Pasamos de diferencias de potencial químico al valor de potencial hídrico dividiendo por el volumen molar parcial del agua (V_a, es una constante = 0,018 litros).

$$\psi_a = \frac{\mu_a - \mu_a^0}{\bar{V}_a} = \frac{RT}{\bar{V}_a} \ln \frac{e}{e_0} = \frac{RT}{\bar{V}_a} \ln \left(\frac{n_a}{n_a + n_s} \right) = \frac{RT}{\bar{V}_a} \ln \chi_a = \frac{RT}{\bar{V}_a} \ln a_a$$

$\pi \cong MRT \cong -\psi_a$; la presión osmótica cambiada de signo es aproximadamente el potencial hídrico (y osmótico) de una disolución.

El **potencial hídrico de la atmósfera** se calcula como:

$$\psi_a = \frac{RT}{\bar{V}_a} \ln \frac{HR\%}{100}; \quad \text{ya que} \quad HR\% = \frac{e}{e_0} \times 100$$

COMPONENTES del POTENCIAL HÍDRICO

El potencial hídrico (ψ_a) de un tejido u organismo vegetal se expresa como resultante de una suma algebraica (cada sumando con su signo positivo o negativo) de los distintos componentes:

$$\psi_a = \psi_s + \psi_p + \psi_m + \psi_g \quad (\text{en algunas notaciones } \psi_s = \psi_\pi = -\pi)$$

- Los **solutos** generan un efecto osmótico (ψ_s) reduciendo la energía libre del agua; por ello, su signo (su efecto termodinámico) será, **siempre, negativo**.

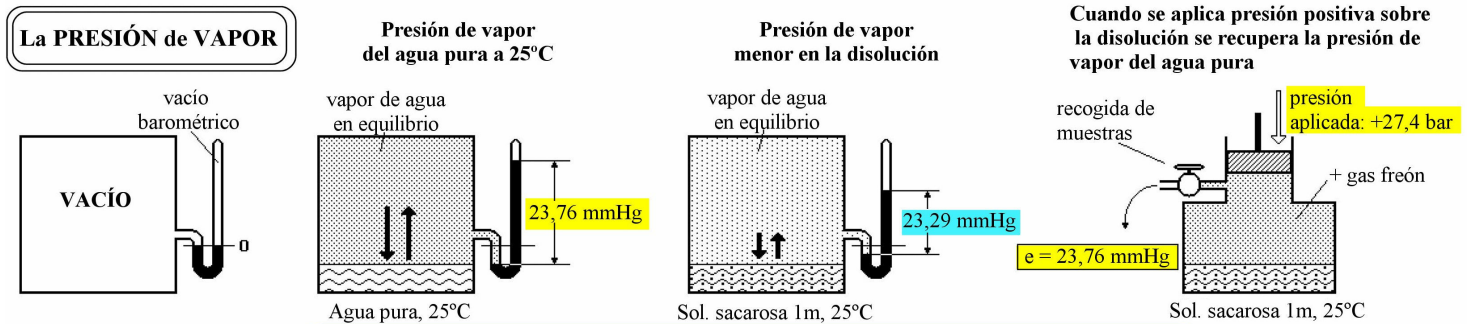
- El componente de **presión** (ψ_p) aumenta la energía libre del agua de la célula cuando se trata de **presión hidrostática positiva** (como veremos enseguida al analizar el concepto de presión de vapor). Pero en el caso particular de los **vasos del xilema**, ψ_p **será negativo**, porque aparece tensión o presión negativa en la savia del xilema durante la transpiración o cuando la planta sufre sequía.

- Los “intersticios” celulares (por ejemplo, las microfibrillas de celulosa) tienen un **efecto capilar** (retienen agua y disminuyen su energía libre). Las estructuras moleculares o supramoleculares grandes (pectinas, mucílagos, proteínas globulares, membranas, superficies de contacto cargadas, etc...) retienen agua -“**agua ligada**”- y disminuyen mucho su energía libre. Los efectos capilares y los de “agua ligada” se engloban en el término, algo difuso, de **fuerzas matriciales** (ψ_m): ambos efectos disminuyen la energía libre del agua (su signo será, **siempre, negativo**), pero, generalmente, los efectos capilares son pequeños o moderados. Sin embargo, el “agua ligada” está tan firmemente unida a muchas estructuras celulares y es tan esencial para su función (p.e., mantiene la estructura terciaria o cuaternaria de las proteínas globulares y enzimas, permite la estabilidad de las membranas de la célula y los orgánulos celulares,...) que cuando se llega a esos extremos de deshidratación el tejido está prácticamente muerto.

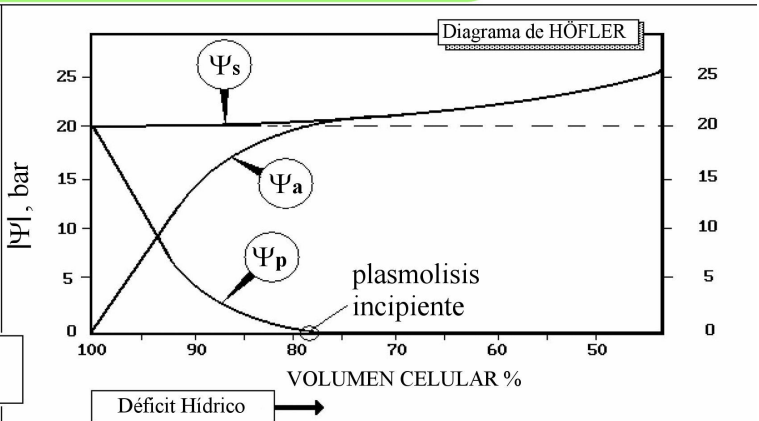
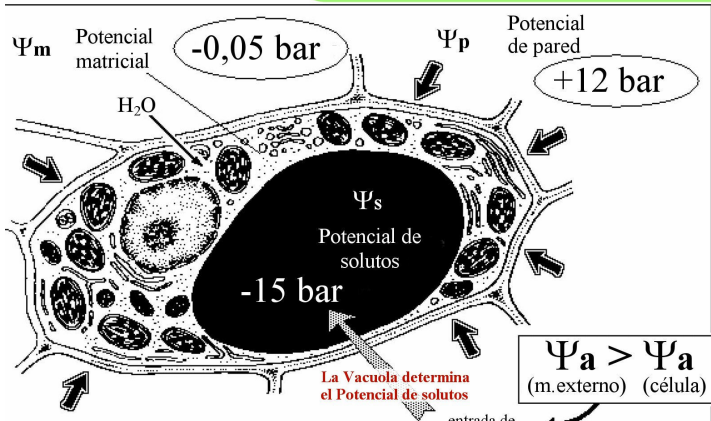
Por ello, el potencial matricial sólo llega a ser significativo en situaciones poco fisiológicas para un tejido vegetal en crecimiento activo. Sin embargo, puede ser un componente muy importante en casos particulares: por ejemplo, en las semillas secas o en los primeros momentos de la hidratación y germinación de éstas. Además, sirve para entender el papel de los **mucílagos** y su papel protector frente a la deshidratación, por su gran capacidad de retención de agua. Como veremos en el tema siguiente, el potencial matricial sí adquiere un protagonismo determinante en el suelo (normalmente es el componente más importante de las relaciones hídricas de un suelo), debido a que el agua se

encuentra retenida en el suelo por efectos matriciales (capilaridad entre las partículas del suelo e imbibición de las micelas de arcilla).

• El componente gravitacional (ψ_g) es muy pequeño y sólo se aplicará en casos de grandes diferencias de altura (en árboles muy altos): la fuerza de la gravedad se opone al movimiento del agua hacia arriba, desde las raíces a las hojas (**signo negativo**).



La presión de vapor es un indicativo de la energía cinética de las moléculas de agua. Los solutos restan movilidad a las moléculas de agua, reducen su energía cinética y, por ello, la presión de vapor.



$$\Psi_a = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_m$$

$$\Psi_w = -\Pi + P - \tau$$

(otra notación)

$$\Psi_a = -15 + 12 - 0,05 ;$$

$$\Psi_a = -3,05 \text{ bar}$$

ESTADO HÍDRICO	Ψ_a	Ψ_s	Ψ_p	Ψ_m
Célula en turgencia máxima	0	-20	+20	≈ 0
Parcialmente turgente	-10	-21	+11	≈ 0
Plasmolisis incipiente	-23	-23	0	≈ 0
Célula deshidratada	-50	-25	≤ 0	-25

MOVIMIENTO del AGUA

Varias son las ventajas que han hecho que el concepto de potencial hídrico haya adquirido un uso generalizado entre los fisiólogos vegetales.

El aspecto más importante es el hecho de que el agua se mueve (libremente o de forma pasiva) a lo largo de gradientes de energía libre en descenso: que se pueden expresar como diferencias de los potenciales hídricos entre los dos puntos.

El agua siempre se moverá (de forma pasiva, *down hill*) de un punto de potencial hídrico alto a otro bajo.

Si el suelo tiene un potencial hídrico de -3 bar y la planta tiene uno de -9 bar, la planta podrá absorber agua del suelo. Si un tejido tiene un potencial hídrico de -4 bar y lo ponemos en una disolución con potencial hídrico de -8 bar, el tejido perderá agua hacia la disolución, hasta igualar su potencial hídrico con el de la disolución. Mientras existan diferencias de potencial hídrico, el agua se moverá hacia niveles descendentes (más negativos).

Hay que recordar que el potencial hídrico más alto es el del agua pura (0 bar). **Un tejido sumergido en agua pura** (que tenga por ejemplo un $\Psi_a = -12$ bar) **tomará agua hasta equilibrarse y llegar hasta $\Psi_a = 0$ bar.** Si en la situación inicial, antes de sumergirlo en agua pura, ese $\Psi_a = -12$ bar, es el resultado de un potencial de solutos de -15 bar ($\Psi_s = -15$ bar) y una presión de turgencia de +3 bar ($\Psi_p = +3$ bar), al poner el tejido en agua entrará agua y las células aumentarán de volumen hasta el máximo de flexibilidad de la pared celular. Al final, el potencial hídrico del tejido será de 0 bar ($\Psi_a = 0$ bar), resultado de una presión de turgencia muy aumentada, por ejemplo, $\Psi_p = +13$ bar (ha subido de +3 a +13 bar) y un potencial de solutos que ha aumentado (se ha hecho menos negativo) a $\Psi_s = -13$ bar. **¿Por qué sube Ψ_s de -15 a -13 bar?** Pues porque al entrar agua, el volumen de líquido aumenta y la cantidad de solutos dentro de la célula no varía (apreciablemente) y, por tanto, la concentración interna de la célula **se diluye**.

Los cambios que afectan a Ψ_s al variar el volumen se pueden calcular con la fórmula de Boyle-Mariotte para los gases perfectos:

$$\text{Volumen Inicial (o CHR\% inicial)} \times \Psi_s \text{ inicial} = \text{Volumen Final (o CHR\% final)} \times \Psi_s \text{ final.}$$

En nuestro ejemplo numérico, dándole al volumen inicial el valor V, podemos calcular que el Volumen Final será:

$$V_{\text{inicial}} \times (-15 \text{ bar}) = V_{\text{final}} \times (-13 \text{ bar}); \quad V_{\text{final}} = V_{\text{inicial}} \cdot \frac{(-15)}{(-13)} = 1,15 V_{\text{inicial}}$$

Es decir, el volumen final se ha incrementado, aproximadamente, en un **15 %**.

Los componentes como Ψ_π y Ψ_p también tienen un significado fisiológico inherente: indican el nivel de solutos y la presión de turgencia.

Si la diferencia en potencial hídrico es causada por un agente externo, como la presión o la gravedad, el movimiento se denomina **FLUJO en MASA** o **FLUJO a PRESIÓN** → Ascenso de la SAVIA.

Si el movimiento es al azar, causado por la energía cinética propia de las moléculas, como en la evaporación, el proceso se denomina **DIFUSIÓN**. La **OSMOSIS** es un ejemplo de difusión, inducido por una diferencia entre los potenciales hídricos a ambos lados de la membrana, originado normalmente por diferencias en la concentración de solutos.

Los transportes difusivos son suficientes para explicar el transporte a escala de una célula (distancias de decenas de μm). Sin embargo, resultan **muy ineficaces** para el transporte a larga distancia, donde es necesario que exista el flujo en masa (gradientes de

presión). Por ejemplo, se ha calculado (Nobel, 1991) que moléculas pequeñas disueltas en agua requerirían unos 8 años para difundir una distancia de 1 metro (si no hay agitación, es decir, sin diferencias de presión o flujo en masa). Sin embargo, los transportes difusivos en **gases**, debido a la interacción muy pequeña entre sus moléculas, son **bastante rápidos**.

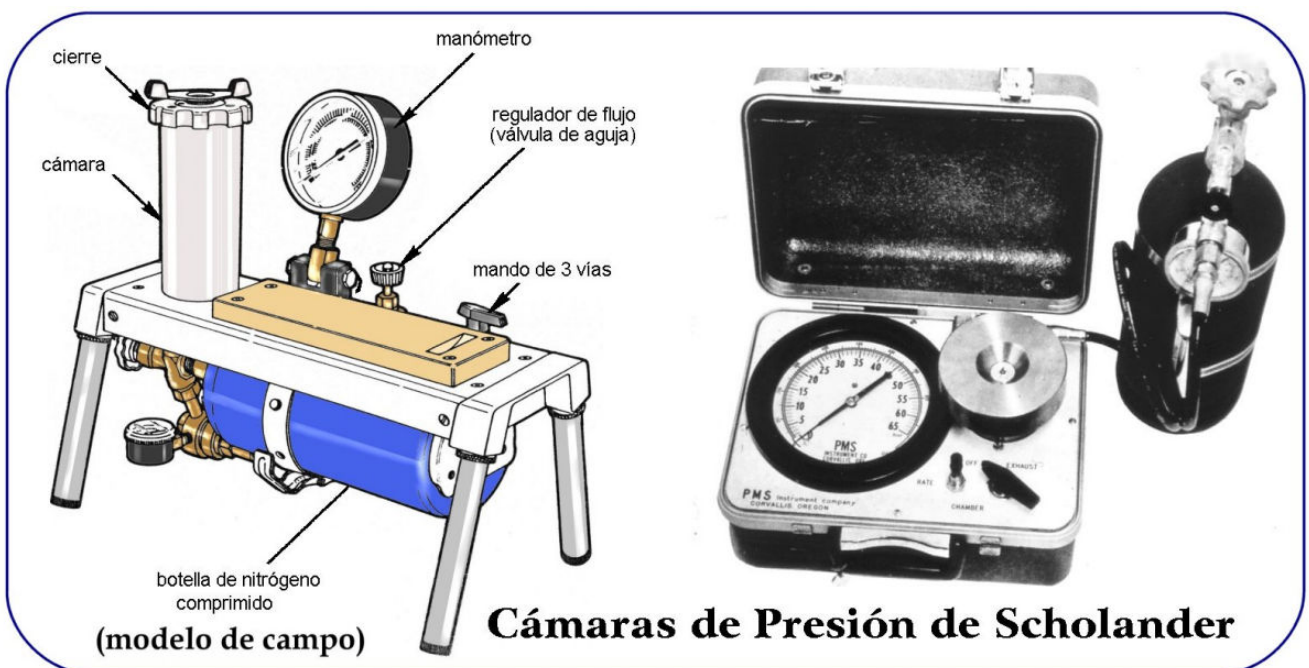
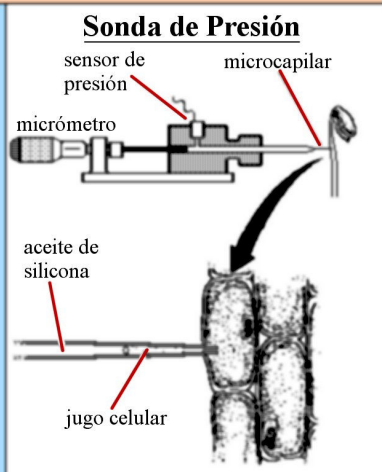
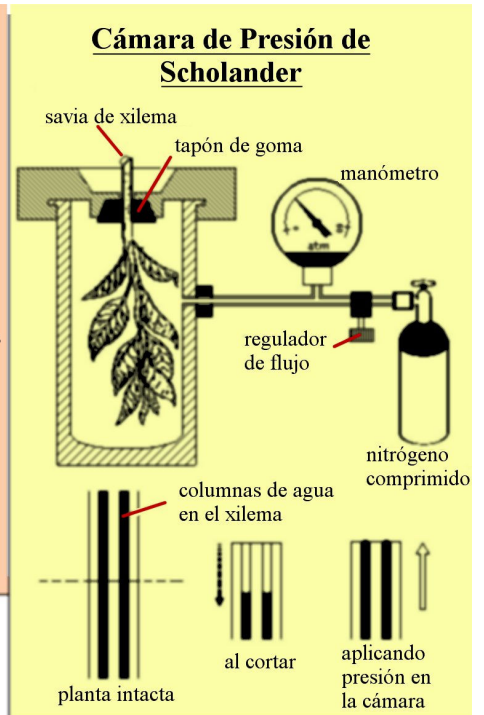
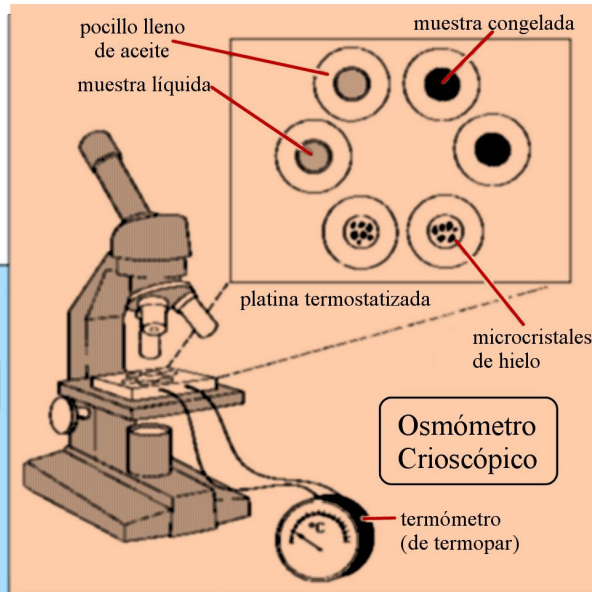
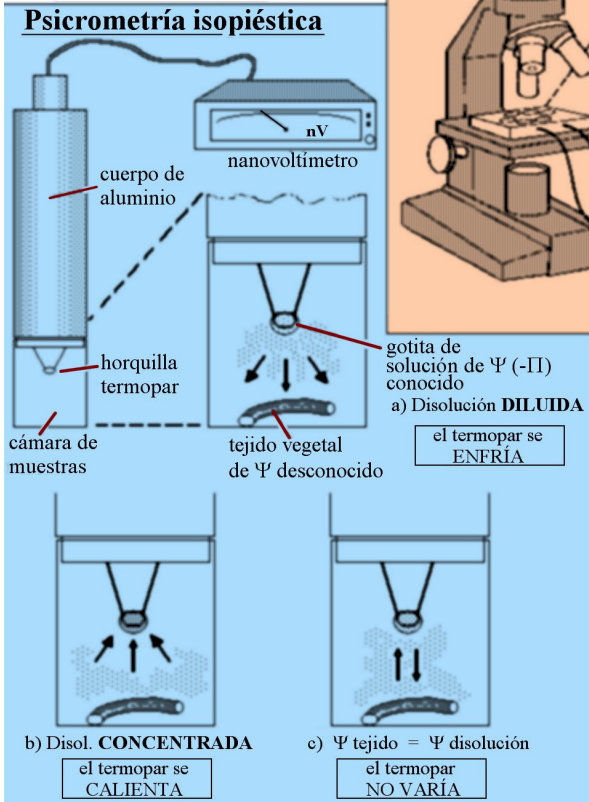
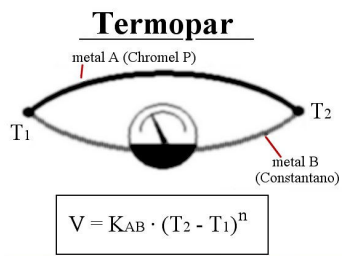
El concepto de utilización global del potencial hídrico en las relaciones hídricas del Continuo Suelo-Planta-Atmósfera ha recibido varias críticas: por ejemplo, en la interacción Suelo-Planta el flujo está gobernado por la componente matricial, fundamentalmente, que oscila muy rápido de cero a valores muy negativos cuando el suelo -arcilloso- se deshidrata.

- A veces, cuando la sequía es bastante severa, el potencial hídrico varía poco en un tejido, pero una variación pequeña puede producir unos efectos muy adversos: afecta a procesos metabólicos a nivel de membrana y de proteínas (las estructuras terciaria y cuaternaria se alteran con la deshidratación).
- Los estomas, en estados incipientes de sequía, pueden cerrarse sin que haya variación apreciable del potencial hídrico o sus componentes. Los estomas responden algunas veces de manera muy rápida e impredecible.

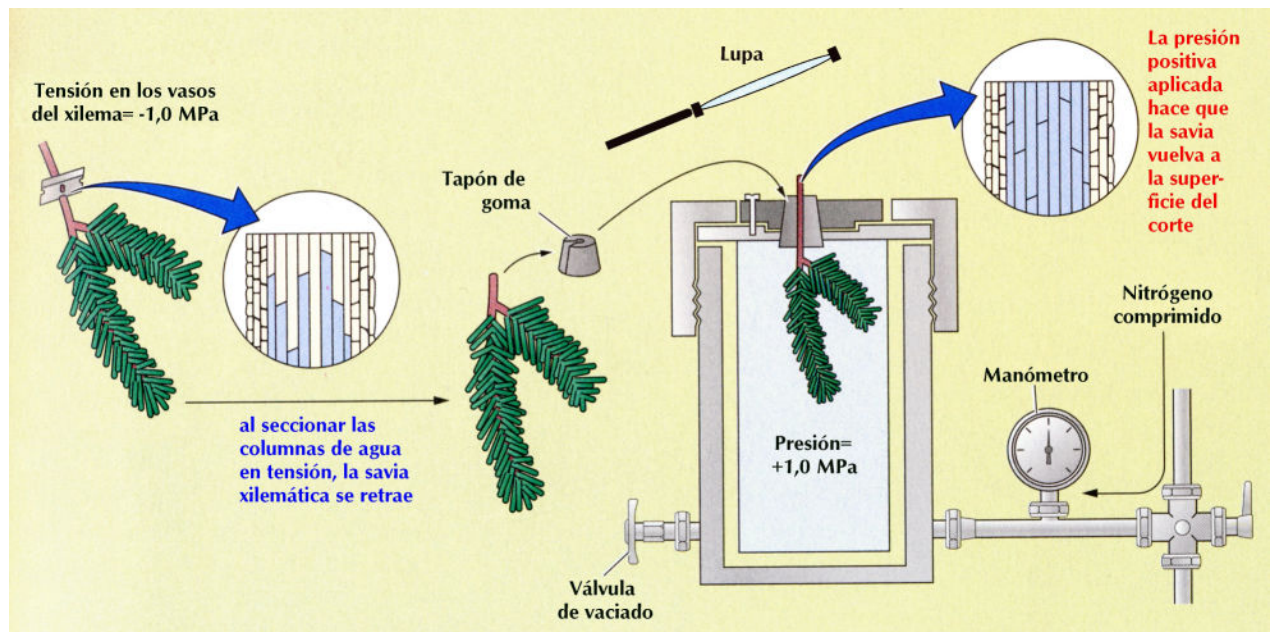
A pesar de las críticas, el concepto de potencial hídrico es valioso para la mayoría de las circunstancias y su uso se ha generalizado cada vez más.

Las técnicas más usuales en las MEDIDAS del POTENCIAL HÍDRICO y de sus COMPONENTES en plantas.

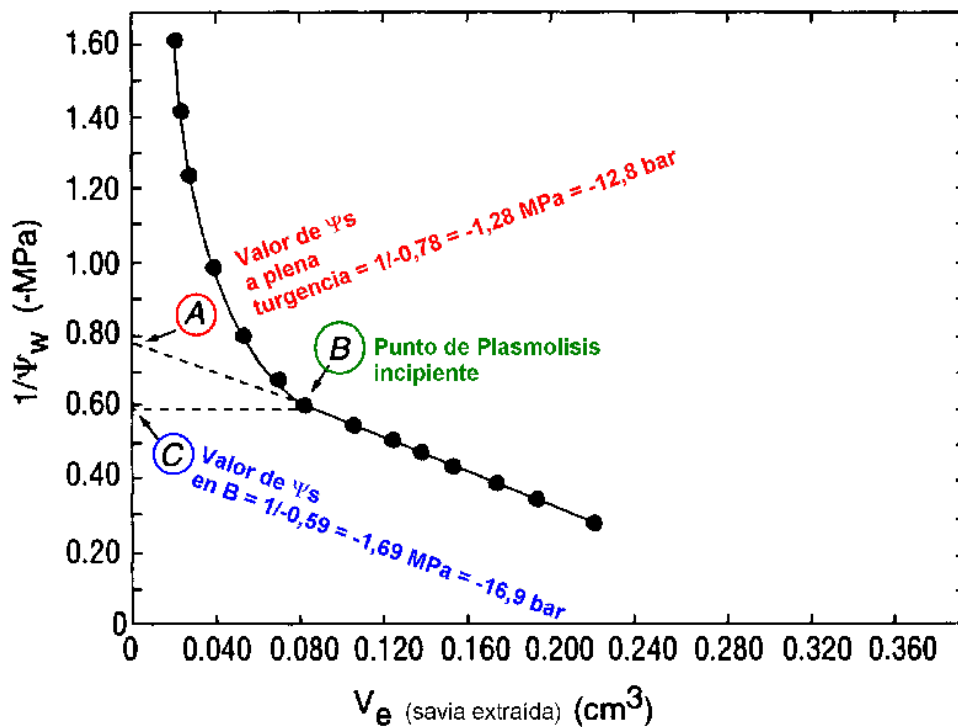
- Cámara de presión de Scholander.
- Psicrometría isopiética.
- Método crioscópico para determinar el potencial de solutos.
- Sonda de presión (potencial de pared o presión).



Esquema del funcionamiento de la cámara de presión de Scholander:



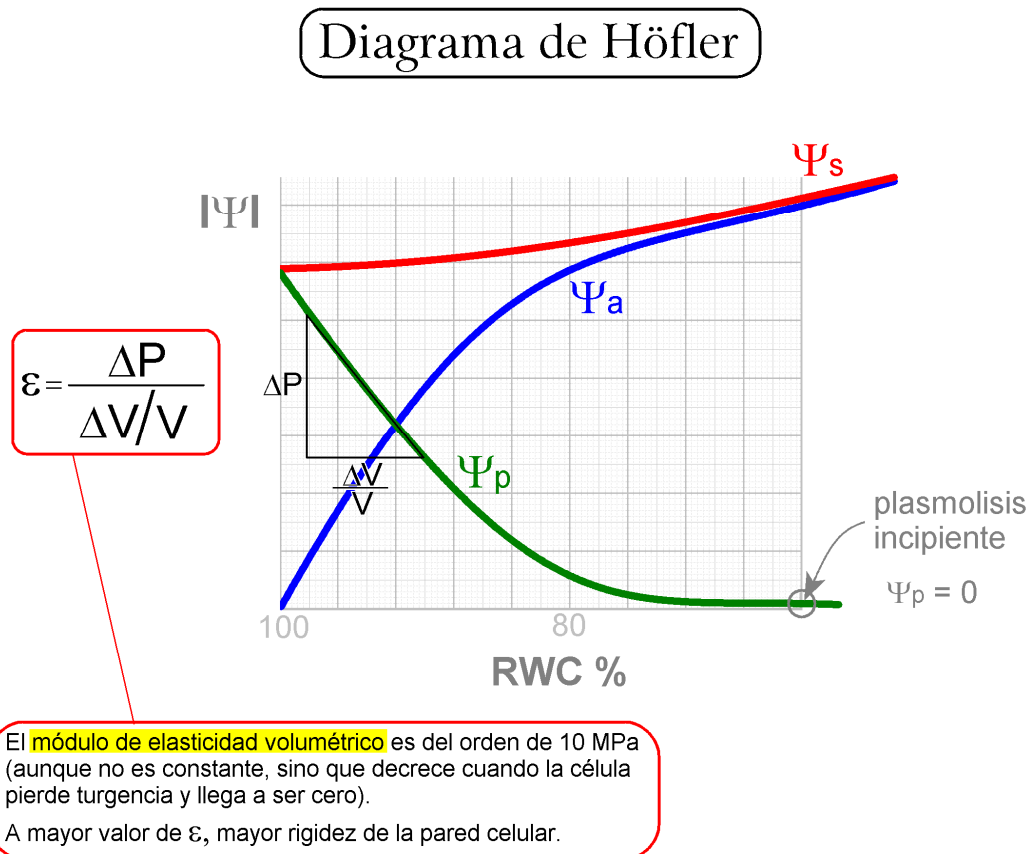
Variaciones de Ψ_s : correcciones Presión-Volumen, según la ley de Boyle-Mariotte ($p \cdot v = k$, constante). Robert Boyle, anglo-irlandés (1627-1691) y Edmé Mariotte, francés, (1620-1684). Este último hizo experimentos de Fisiología Vegetal; midió la presión de la savia en plantas por analogía a la de animales, algo parecido a lo que hizo Stephen Hales.



Curva de Presión-Volumen

$$pV = k; \quad \frac{1}{p} = k \cdot V \quad (\text{en la gráfica } 1/p \text{ vs. } V \text{ se obtiene una recta de pendiente } k)$$

El potencial hídrico y sus componentes se pueden representar conjuntamente en una gráfica que se denomina Diagrama de Höfler:

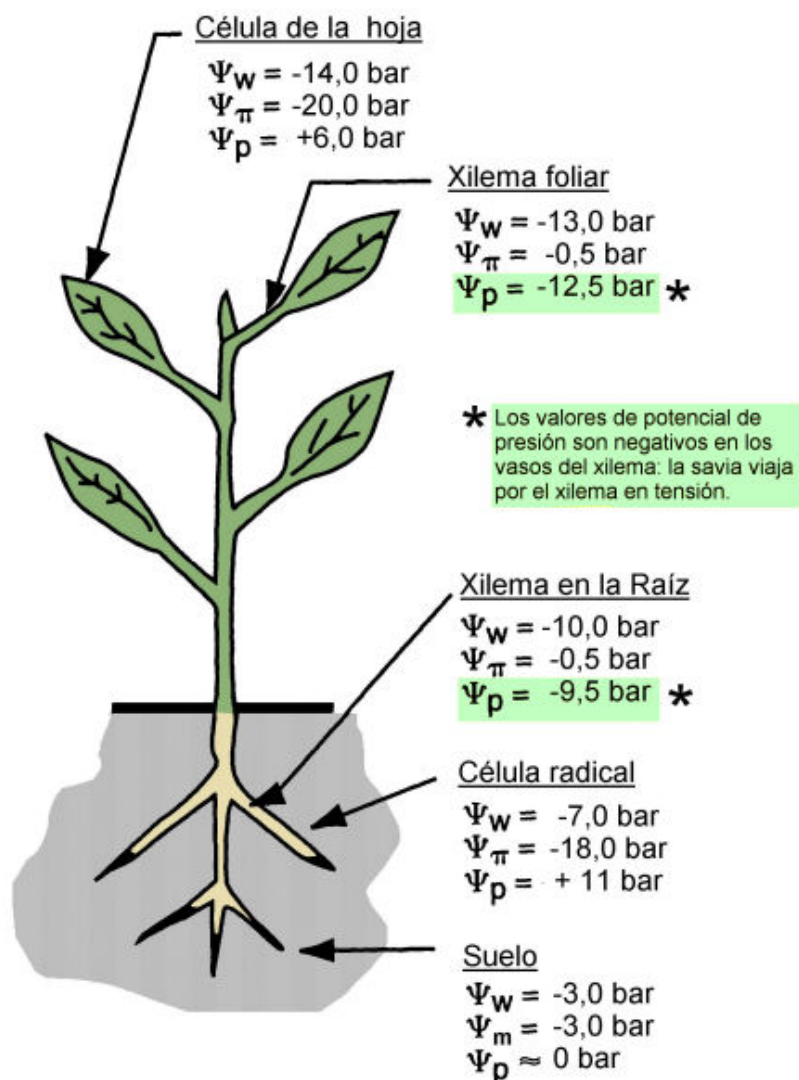


EL CONTINUO SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

Un aspecto importante de las relaciones hídricas es la descripción del movimiento del agua a través del suelo, entrada del agua a las raíces, movimiento del agua a través de la planta y salida de ésta a la atmósfera. Es decir, el movimiento del agua por los distintos compartimentos que componen lo que se conoce como el Continuo Suelo-Planta-Atmósfera (o en inglés S.P.A.C. "Soil Plant Atmosphere Continuum"). Se asemeja a la conducción de electricidad en un circuito, con potenciales y resistencias distintos en tramos diferentes del circuito, y por ello, resulta análogo y se puede calcular según la ley de Ohm.

$$\text{Flujo} = \frac{\text{diferencia de Potencial Hídrico}}{\sum \text{resistencias}}; \quad \text{Intensidad} = \frac{\text{diferencia de Potencial Eléctrico}}{\text{Resistencia Total}}$$

$$Flujo = \frac{\psi_{suelo} - \psi_{superficie\ de\ la\ raíz}}{R_{suelo-raíz}} = \frac{\psi_{superficie\ de\ la\ raíz} - \psi_{xilema}}{R_{raíz}} = \dots = Transpiración$$



Valores de potencial hídrico y sus componentes, en distintos puntos del Continuo Suelo-Planta-Atmósfera, que se podrían observar durante la transpiración.

El Continuo supone una teoría unificadora en la que el movimiento del agua a través del suelo, raíces, tallos y hojas y su evaporación a la atmósfera pueden estudiarse en términos de fuerzas impulsoras y resistencias que operan en cada segmento. El concepto también es útil para analizar la manera en que varios factores ambientales o vegetales afectan al movimiento del agua, bien porque tienen un efecto sobre las fuerzas impulsoras, bien sobre las resistencias, o bien sobre ambas.

- Por ejemplo, un suelo que se deseca causa a la vez reducciones en la fuerza impulsora y aumentos en la resistencia.

- La aireación deficiente o una temperatura baja en el suelo aumenta la resistencia al flujo de agua a través de las raíces.
- Un aumento en la temperatura de la hoja y el aire aumenta la transpiración debido a que aumenta el gradiente de concentraciones de vapor, o fuerza impulsora entre la hoja y la atmósfera → (ver estas tablas de VPD, *Vapour Pressure Deficit*, el gradiente de concentraciones de vapor que tira de la transpiración):

Effect of Increasing Temperature on Vapor Concentration of Water in Leaves and Vapor Concentration Gradient from Leaf to Air at an Assumed Constant Relative Humidity of 60%^a			
Parameter	Temperature (°C)		
	10	20	30
Vapor concentration of tissue (g m ⁻³)	9.41	17.31	30.40
Vapor concentration of air at 60% relative humidity (g cm ⁻³)	5.65	10.39	18.24
Vapor concentration gradient (g cm ⁻³)	3.76	6.92	12.16

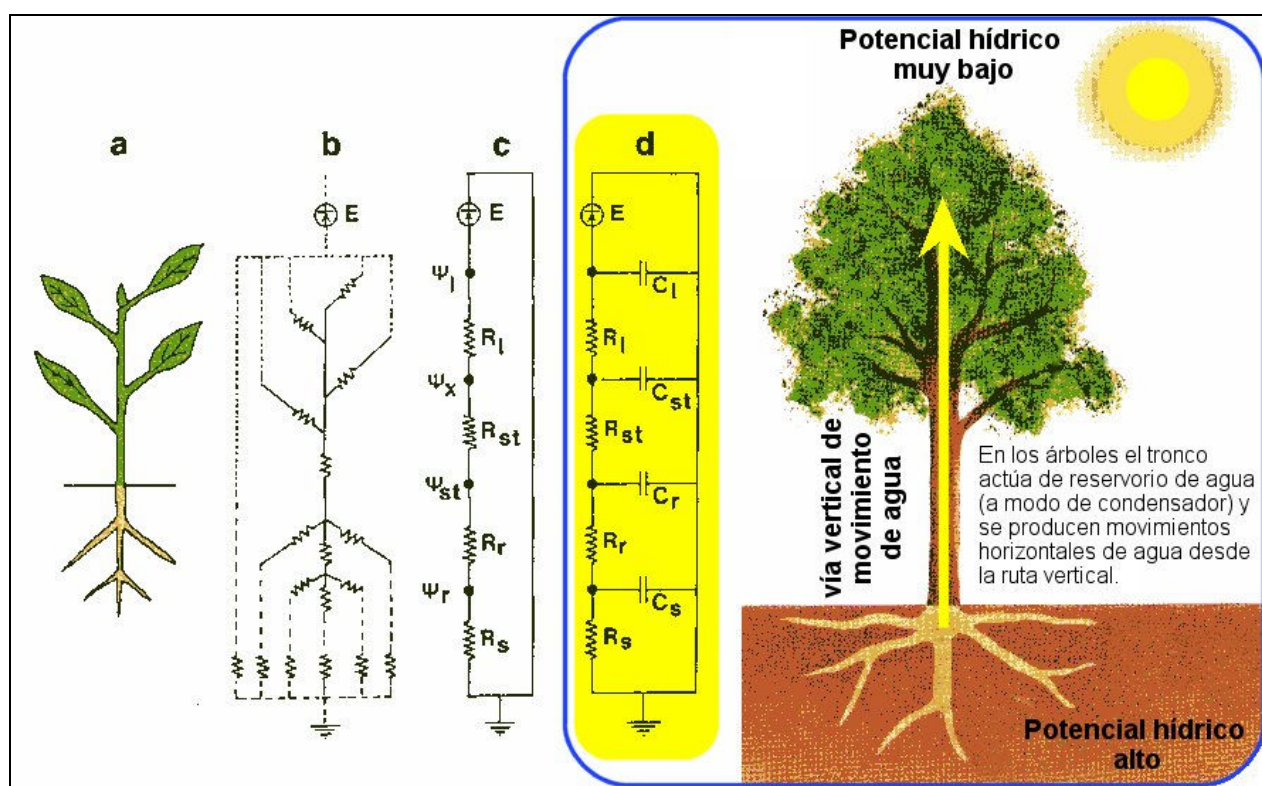
^aThe vapor concentration of the leaf tissue is assumed to be the saturation vapor concentration of water, because the lowering caused by cell solutes is only about 3%.

Effect of Increasing Temperature of Leaf and Air with No Change in Absolute Humidity on Vapor Concentration Gradient from Leaf to Air			
Parameter	Leaf and air temperature (°C)		
	10	20	30
Relative humidity of air assuming no change in absolute humidity (%)	80	44	25
Vapor concentration at evaporating surface of leaf (g m ⁻³)	9.41	17.31	30.40
Vapor concentration in air at indicated temperatures (g m ⁻³)	7.53	7.62	7.60
Vapor concentration gradient from leaf to air (g m ⁻³)	1.88	9.69	22.80

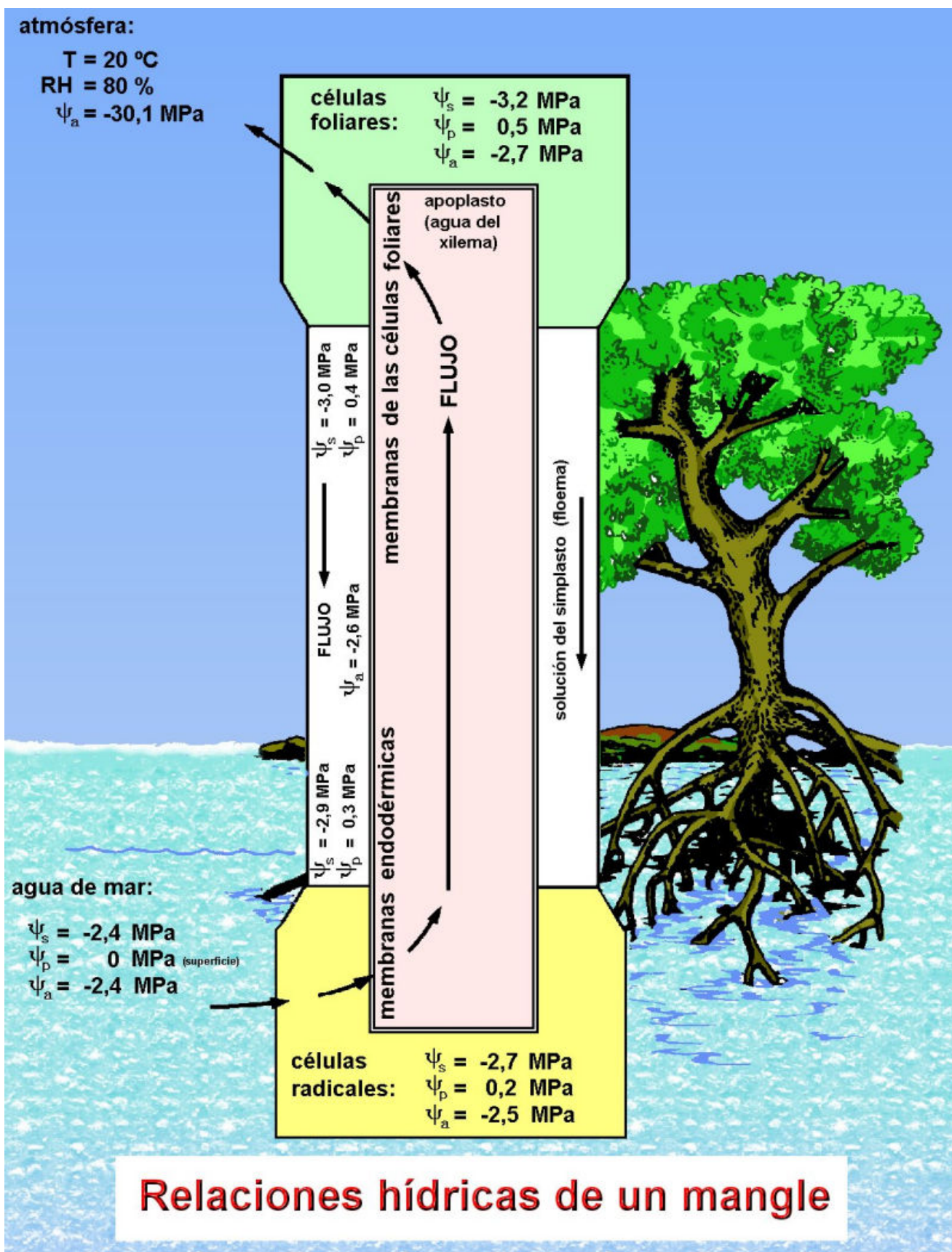
El concepto del SPAC también facilita la realización de modelos que, refinados, suponen para el investigador la capacidad de predecir la respuesta de la planta en un margen amplio de condiciones ambientales.

Sin embargo, hay que tener **precaución** para ponderar los resultados predichos con estos modelos tan simples:

- ☞ Primero suponer que hay “estado estacionario” (que las pérdidas por transpiración equivalen a la toma de agua por las raíces) es bastante poco realista: siempre hay retrasos de la toma de agua respecto a la transpiración (sobre todo cuando la planta transpira rápidamente). En las plantas leñosas hay mucho transporte horizontal desde el agua almacenada en el tronco a la ruta principal del xilema.
- ☞ También hay divergencias, porque el movimiento de agua en la fase líquida es proporcional a la diferencia en potenciales hídricos y en cambio **en la fase de vapor es proporcional al gradiente en concentración de vapor de agua entre la hoja y la atmósfera, VPD (Vapour Pressure Deficit, en la interfase hoja-atmósfera)**; hay un cambio de estado, que necesita mucha energía. Factores como la radiación solar que llega a la hoja (energía para el cambio de estado líquido-gas) o la velocidad del viento (aumenta el gradiente) puede que no afecten mucho al potencial hídrico de la atmósfera, pero sí a la transpiración.
- ☞ La planta leñosa supone un sistema complejo de reservorios que se llenan y vacían en paralelo respecto al curso vertical del agua (→ se simulan como condensadores en los modelos eléctricos).



- ☞ Hay relaciones hídricas extremas en árboles mangles que tienen que extraer agua de medios muy salinos y evitar la toxicidad del cloruro sódico.



Medidas de Seguridad para el manejo de Gases Comprimidos

Al medir el potencial hídrico con la cámara de presión tipo Scholander utilizamos una botella de nitrógeno comprimido. Es importante hacer notar, aquí, que el manejo de gases comprimidos **es una fuente potencial de accidentes muy graves en el laboratorio** y que un usuario novato deberá **asesorarse**, por alguien experto en el manejo de botellas de gases, antes de utilizar cualquier aparato que las emplee o atreverse a manipular directamente las botellas.

Las botellas comunes de 50 litros de gas comprimido son **de acero, altas, estrechas y pesadas** (una botella llena suele pesar alrededor de 100 kilos). **Son difíciles de manejar, su centro de gravedad está muy alto** y si no se sujetan con cuidado y habilidad pueden caérsenos encima y provocarnos una lesión. Las botellas de gas deberán moverse con **una carretilla especial para botellas de gases**.

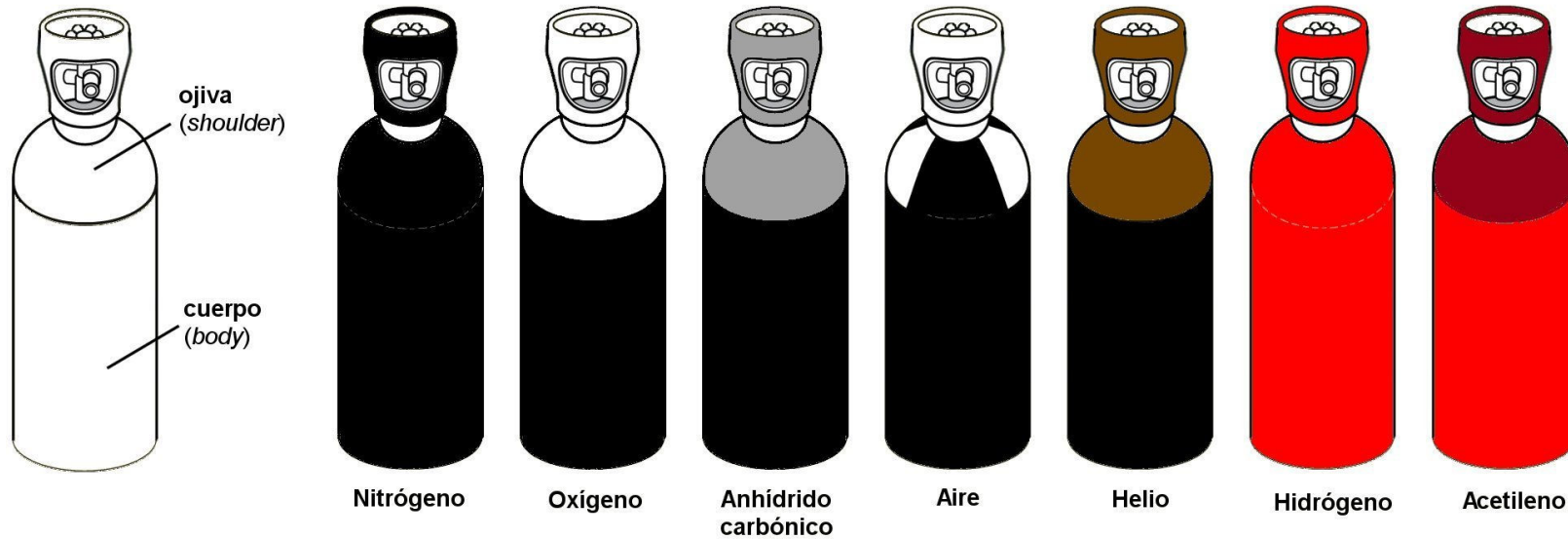
Las botellas deben colocarse en **posición segura**, alejadas de cualquier zona de temperatura alta y nunca al lado de una puerta u otra vía de escape. Se debe mantener únicamente el **número mínimo** de botellas de gases comprimidos en uso real dentro de cada laboratorio y todas las botellas deben estar **firmemente sujetas** por una cadena de fijación, una sujeción al bancal o dispositivo similar. Todas las demás botellas **deben guardarse en un almacén** adecuadamente construido y bien ventilado, donde las botellas llenas y vacías estarán separadas y donde se prohíba fumar y usar cualquier aparato que origine llamas expuestas al aire. **Las botellas de gases oxidantes deben estar separadas de las botellas de gases combustibles y los gases corrosivos y/o tóxicos deben, siempre, almacenarse separadamente.**

Una botella de gas presurizado (la presión interna en la botella es enorme, puede llegar a los 200-300 bar) **nunca debe usarse sin el regulador correcto y/o las válvulas y manorreductores**, que han de ser colocados por una persona competente. **Las conexiones de salida y entrada deben estar libres de aceite, grasa, suciedad y fragmentos de plástico.** El aceite y la grasa pueden hacer ignición en presencia de oxígeno puro y si este último está bajo presión, puede generarse **una explosión desastrosa.**

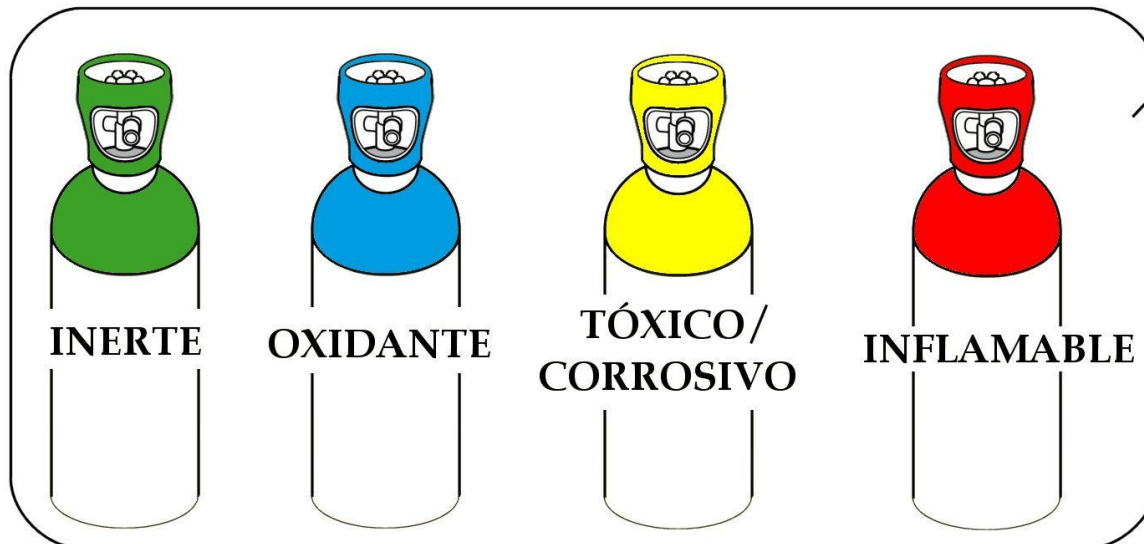
La válvula, el regulador y cualquier otra conexión a alta presión deberían siempre verificarse contra fugas, usando una solución acuosa de jabón, detergente o lavavajillas.

Cuando cualquier gas haya de ser pasado a través de una vasija de reacción, debería usarse un dispositivo de alivio de presión y una válvula-trampa para impedir la succión de retorno.

En la imagen siguiente se presentan los códigos de color de las botellas de gas comprimido. No obstante, **la identificación más precisa de una botella de gas aparece en una etiqueta adhesiva** (llamada etiqueta "banana") en la ojiva de la botella. **Deberá leerse con atención. Es vital conocer las propiedades químicas y físicas del gas que estamos usando, para evitar todos los riesgos (directos o secundarios) que puedan producirse.**



Botellas de los gases más usados









En agosto de 2009 ha entrado en vigor una normativa de la Unión Europea donde los gases se identificarán en 4 familias según el color de las **ojivas**. Hasta 2014 coexistirán ambas normas y los colores de las botellas de los gases más usados no cambian.

Conviene conocer la normativa antigua, al menos mientras ambas coexistan:

Normativa antigua a extinguir en 2014







Inflamables y Combustibles

cuerpo rojo

					
Acetileno	Hidrógeno	Metano	Etileno	Propileno	Etano













Oxidantes o Inertes

cuerpo negro

					
Dióxido de carbono	Argón	Helio	Nitrógeno	Oxígeno	Protóxido de Nitrógeno


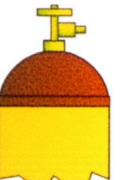




Tóxicos y Venenosos

cuerpo verde





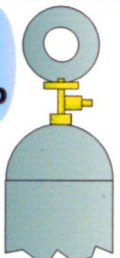
					
Amoníaco	Dióxido de Azufre	Monóxido de Carbono	Trifluoruro de Boro	Sulfuro de Hidrógeno	Monóxido de Nitrógeno
					
Dióxido de Nitrógeno	Arsina	Fosfina	Silano	Diclorosilano	Diborano

Corrosivos

cuerpo amarillo

					
Cloro	Cloruro de Hidrógeno	Tetrafluoruro de Silicio	Hexafluoruro de Tungsteno	Bromuro de Hidrógeno	Fluor

Mezclas

				
Aire	Argón Lamp.	Argón Q.	Gas P.R.	Mezclas de Calibrado

Algunos problemas de Potencial Hídrico resueltos

1) Determinad el potencial hídrico de una disolución de 200 g de glicerina ($\rho=92$) en 1 litro de agua a 25 °C.

$$\Psi_a = \frac{RT}{V_a} \cdot \ln \chi_a; \quad \chi_a = \frac{1000/18}{(1000/18) + (200/92)} = 0,9623$$

$$\Psi_a = \frac{0,082 \cdot 298}{0,018} \cdot \ln 0,9623 = -52,1087 \text{ atm} = -52,8 \text{ bar} = -5,28 \text{ MPa}$$

2) Determinad el potencial hídrico del aire a 25 °C y 48 %HR.

$$\Psi_{\text{aire}} = \frac{RT}{V_a} \cdot \ln \frac{\%HR}{100}; \quad \Psi_{\text{aire}} = \frac{0,082 \cdot (273 + 25)}{0,018} \cdot \ln \frac{48}{100} =$$

$$-996,404 \text{ atm} = -1009,4 \text{ bar} = -100,94 \text{ MPa}$$

3) La vacuola de cierta célula vegetal tiene una fracción molar de disolvente de 0,98 y su presión de turgencia es de +8 bar. Calculad el potencial hídrico de la célula si no existiese componente matricial y cuando $\Psi_m = -2,5$ bar.

$$\chi_a = 0,98, \text{ luego } \Psi_a = \frac{RT}{V_a} \ln 0,98 = -27,32 \text{ bar}$$

$\Psi_a = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_m$ (suma algebraica, cada componente con su signo)

Potencial hídrico sin componente matricial = $-27,32 + 8 = -19,32$ bar = $-1,93$ MPa.

“ “ cuando $\Psi_m = -2,5$ bar: $-27,32 + 8 - 2,5 = -21,82$ bar = $-2,18$ MPa.

4) Se mide el volumen inicial de una célula y luego se coloca en agua pura a 25 °C, observándose que se hincha. A continuación, se pone en concentraciones de manitol (soluteo no permeable ni disociable) progresivamente crecientes, viéndose que se colapsa cada vez más. Cuando se coloca en manitol 0,2 m se observa que alcanza el tamaño inicial. En soluciones cada vez más concentradas sigue perdiendo volumen, hasta que presenta plasmolisis incipiente en manitol 0,5 m, mientras que en manitol 0,6 m se plasmoliza intensamente. En manitol 0,5 m el volumen de la célula era un 5% menor que el inicial. Calculad en bar y MPa:

- a) El Ψ_s a turgencia cero.
- b) El Ψ_s en su estado inicial.
- c) El Ψ_p en su estado inicial.
- d) El Ψ_a en su estado inicial.

Primero calcularemos los potenciales hídricos de las soluciones 0,2 y 0,5 m. Se supone que la célula o el tejido se ha equilibrado con ellas y tendrán el mismo potencial hídrico (Ψ_a):

Para 0,2 m:

$$\Psi_a = \frac{RT}{V_a} \cdot \ln \chi_a = \frac{0,082 \times (273 + 25)}{0,018} \ln \frac{(1000/18)}{(1000/18) + 0,2} = -4,8784 \text{ atm} = -4,94 \text{ bar}$$

Para 0,5 m:

$$\Psi_a = \frac{RT}{V_a} \cdot \ln \chi_a = \frac{0,082 \times (273 + 25)}{0,018} \ln \frac{(1000/18)}{(1000/18) + 0,5} = -12,1633 \text{ atm} = -12,32 \text{ bar}$$

En solución 0,5 m presenta plasmolisis incipiente. Esto quiere decir que en esta solución (0,5 m) la presión de turgencia o pared se ha hecho cero ($\Psi_p=0$) y puesto que la fórmula de las relaciones hídricas de una célula vegetal es la suma algebraica:

$\Psi_a = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_m$ (y considerando insignificante el potencial matricial Ψ_m), se igualan los potenciales hídrico y de solutos: $\Psi_a = \Psi_s$.

Por tanto, en esta solución $\Psi_s = -12,32 \text{ bar}$.

En estado inicial (en manitol 0,2 m) tiene un volumen (llamémosle X) y en manitol 0,5 m el volumen se ha reducido a (0,95 X). Esto es lógico: la célula se ha deshidratado un 5%. Y también hay que pensar que, al perder agua, los solutos estarán más concentrados: el potencial de solutos (Ψ_s) en la disolución de manitol 0,5 m será más

negativo. Para calcular el potencial de solutos en la solución 0,2 m tenemos que recurrir a una "corrección presión-volumen" del tipo $P_1 \cdot V_1 = cte = P_2 \cdot V_2$, o aplicado a potenciales:

$$X \cdot \Psi_{S(0,2\text{ m})} = (0,95X) \cdot (-12,32); \quad \Psi_{S(0,2\text{ m})} = -11,70 \text{ bar}$$

El potencial de pared en su estado inicial (0,2 m) será:

$$\Psi_a = \Psi_s + \Psi_p + (\Psi_m \cong 0); \quad \Psi_p = \Psi_a - \Psi_s$$

y sustituyendo con sus signos: $\Psi_p = -4,94 - (-11,70) = +6,76 \text{ bar}$

Ahora podemos dar todas las respuestas:

- El Ψ_s a turgencia cero (plasmolisis incipiente) : -12,32 bar ò -1,23 MPa.
 - El Ψ_s en su estado inicial: -11,70 bar ò -1,17 MPa.
 - El Ψ_p en su estado inicial: +6,76 bar ò +0,68 MPa.
 - El Ψ_a en su estado inicial: -4,94 bar ò -0,49 MPa.
-

5) Un tejido vegetal se sumerge, dejando que se equilibre, en distintos medios: primero en **agua pura** (turgencia plena, volumen celular = 100 %) y después en dos disoluciones, de un soluto no ionizable ni difusible, de concentraciones **0,45** y **0,65 m**, observándose que el volumen de las células disminuye al 85 y 70 % respectivamente.

- En el medio más concentrado se produjo **plasmolisis incipiente**.
- La temperatura fue siempre de 25 °C y los potenciales matriciales se pueden considerar inapreciables en todos los casos.

Se pide calcular los distintos parámetros, completando la tabla adjunta, expresando los resultados finales en bar ò MPa. $R = 0,082 \text{ atm} \cdot \text{L} \cdot ^\circ\text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

[sol],m	Vol%	Ψ_a	Ψ_s	Ψ_p
0,00	100			
0,45	85			
0,65	70			

bar

Solución:

Podemos empezar completando la casilla de potencial hídrico en agua pura (molalidad de la disolución 0,00): el potencial hídrico del agua pura es cero (*1).

La otra casilla que viene resuelta es la del potencial de presión en la disolución más concentrada (0,65 m): si hay plasmolisis incipiente Ψ_p será, también cero (*2).

Calcularemos ahora los potenciales hídricos de las dos disoluciones de 0,45 y 0,65 m, según la fórmula habitual:

$$\Psi_a = \frac{RT}{V_a} \cdot \ln \chi_a = \frac{0,082 \times (273 + 25)}{0,018} \cdot \ln \left(\frac{1000/18}{(1000/18) + 0,45} \right) = -10,9519 \text{ atm} = -11,09 \text{ bar}$$

$$\Psi_a = \frac{RT}{V_a} \cdot \ln \chi_a = \frac{0,082 \times (273 + 25)}{0,018} \cdot \ln \left(\frac{1000/18}{(1000/18) + 0,65} \right) = -15,7912 \text{ atm} = -16,00 \text{ bar}$$

Conociendo el valor de la casilla *3, sabemos inmediatamente el del potencial de solutos a la concentración 0,65 m: tiene que ser el mismo valor -16,00 bar.

Ahora, como hay cambios presión (osmótica, potencial de solutos)-volumen, tenemos que hacer las correcciones con la ley de Boyle-Mariotte: $P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$

Utilizamos como referencia el valor donde ocurre la plasmolisis incipiente:

$$-16,00 \times 70 = P_2 \cdot 85 ; \quad \mathbf{P_2 = -13,17 \text{ bar}} \quad \text{y} \quad -16,00 \times 70 = P_3 \cdot 100 ; \quad \mathbf{P_3 = -11,20 \text{ bar}}$$

Los valores del potencial de pared (Ψ_p) se calculan por diferencia.

$$\Psi_a = \Psi_s + \Psi_p ; \quad \mathbf{\Psi_p = \Psi_a - \Psi_s} ; \quad \Psi_{p,0,45} = -11,09 - (-13,17) = 13,17 - 11,09 = +2,08 \text{ bar}$$

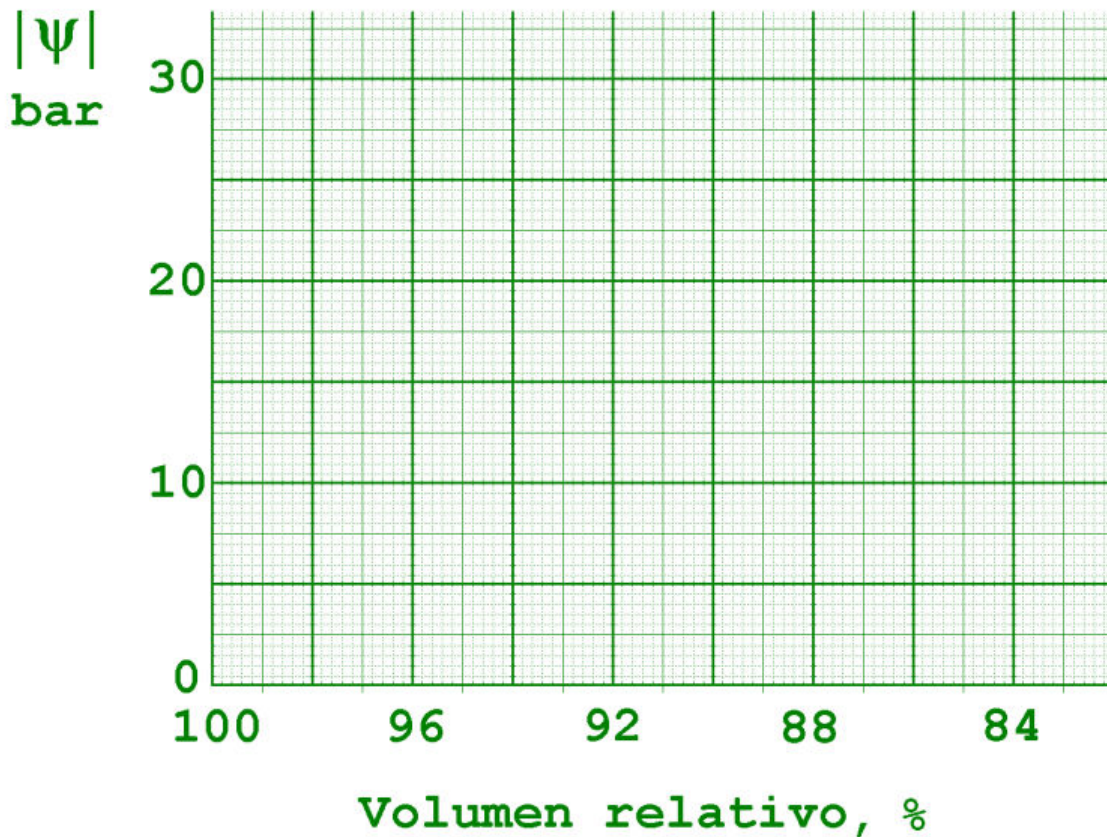
solución:

[sol],m	Vol%	Ψ_a	Ψ_s	Ψ_p	
0,00	100	*1 0,00	-11,20	+11,20	
0,45	85	-11,09	-13,17	+2,08	
0,65	70	*3 -16,00	-16,00	*2 0,00	bar

6) Un tejido vegetal sumergido en agua pura a 25 °C presenta un volumen celular medio de $40 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$. Al dejarlo equilibrar en distintas soluciones de manitol (soluteo no permeante, ni dissociable) apareció plasmolisis incipiente en manitol 1,2 m. Las medidas fueron las siguientes:

[manitol] m	Vol.cel. $\cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$	Vol. %	Ψ_a bar	Ψ_s bar	Ψ_p bar
0,000	40,00	100			
0,473	39,25				
0,721	38,52				
0,887	37,82				
1,033	37,14				
1,137	36,49				
1,200	35,86				0,00
1,220	35,25				0,00
1,241	34,67				0,00

- Calcular el potencial hídrico y sus componentes (de solutos y de pared) en cada una de las situaciones, suponiendo nulo el componente matricial.
- Realizar un diagrama de Höfler con los valores calculados.

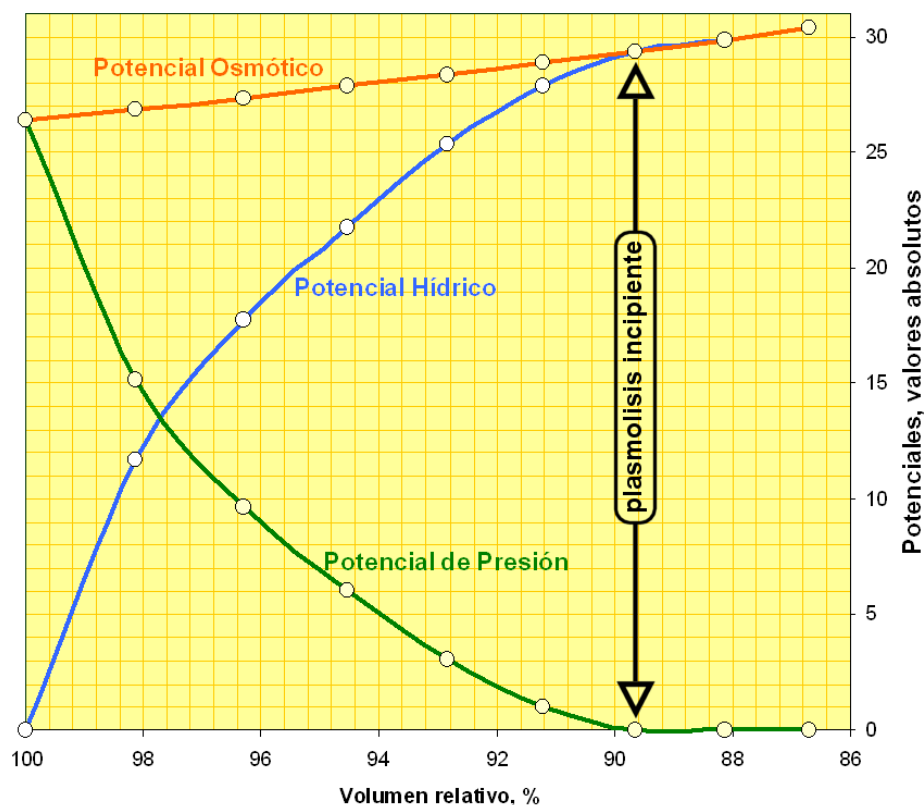


Solución: Este problema es más laborioso que el anterior pero de la misma hechura: iniciamos calculando el volumen relativo %, después, calculamos los potenciales hídricos de las disoluciones en las que se ha equilibrado el tejido y luego nos apoyamos en la plasmolisis incipiente para recalculamos los potenciales osmóticos, según el cambio presión-volumen.

[manitol] m	Vol.cel. ·10 ⁻³ mm ³	Vol. %	Ψ _a bar	Ψ _s bar	Ψ _p bar
0,000	40,00	100	0,0000	-26,35	+26,35
0,473	39,25	98,13	-11,66	-26,85	+15,19
0,721	38,52	96,30	-17,73	-27,36	+9,63
0,887	37,82	94,55	-21,78	-27,87	+6,08
1,033	37,14	92,85	-25,34	-28,38	+3,04
1,137	36,49	91,23	-27,86	-28,88	+1,02
1,200	35,86	89,65	-29,39	-29,39	0,00
1,220	35,25	88,13	-29,87	-29,87	0,00
1,241	34,67	86,68	-30,38	-30,38	0,00

La solución numérica se representa en la gráfica de Höfler (potenciales en valores absolutos).

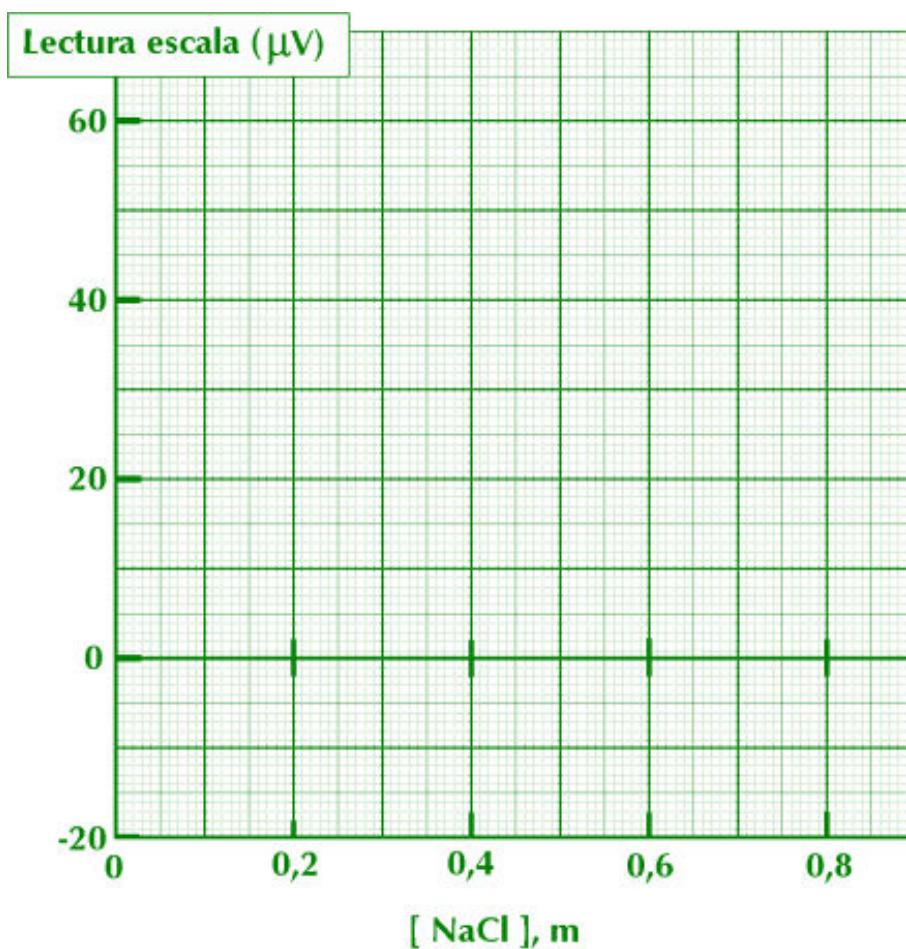
Diagrama de Höfler



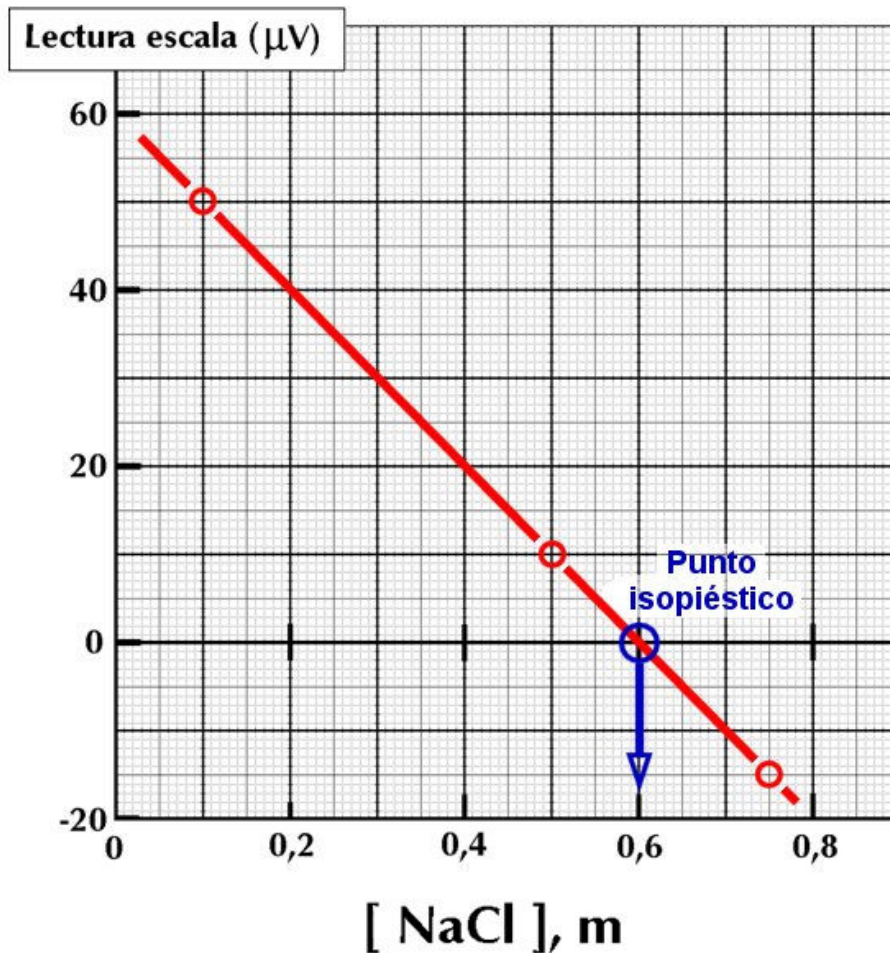
7) Al medir el Ψ_a de una hoja mediante la técnica isopiética se obtuvieron los siguientes datos:

[NaCl], m	Lectura escala (μV)
0,1	50
0,5	10
0,75	-15

Determinad el potencial hídrico del tejido a 25 °C.



Solución: Primero representamos en la gráfica los valores de las lecturas del termopar a las tres concentraciones que nos da la tabla de arriba:



El punto **isopiéctico** (cuando la horquilla del termopar ni se calienta ni se enfría, es decir, el cero del termopar) resulta ser 0,6 m de cloruro sódico. Pero hay que tener en cuenta que el cloruro sódico en disolución se disocia en dos iones, por lo que su molalidad efectiva (llamada **osmolalidad**) será, teóricamente, de

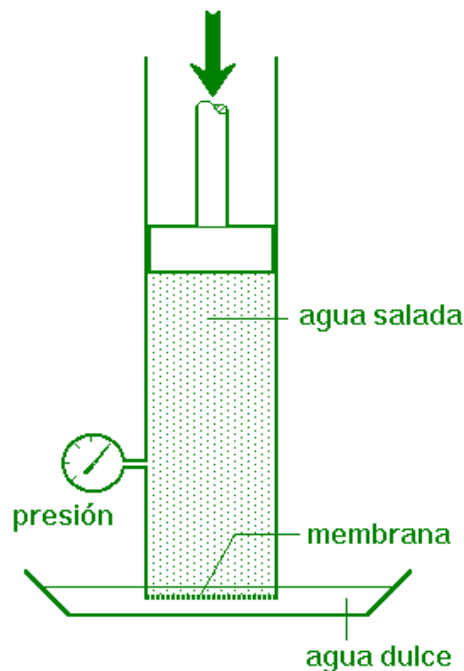
$$0,6 \times 2 = 1,2 \text{ m. Aplicando la fórmula:}$$

$$\Psi_a = \frac{RT}{V_a} \cdot \ln \chi_a = \frac{0,082 \times (273 + 25)}{0,018} \cdot \ln \left(\frac{1000/18}{(1000/18) + 1,2} \right) = -29,0110 \text{ atm} = -29,39 \text{ bar}$$

Resulta que el potencial hídrico del tejido es **-29,4 bar ò -2,94 MPa**.

8) Las máquinas desalinizadoras, o desaladoras, funcionan mediante el proceso de ósmosis inversa, que permite obtener agua pura a partir de una disolución (p.e., agua de mar). El método consiste en aplicar presión, con compresores, al agua marina en un sistema cerrado que tiene membranas semipermeables. De esta manera, se obtiene agua potable, siempre que se aplique una presión superior a la presión osmótica de la disolución: El agua fluye contra gradiente de potencial hídrico, desde la disolución (agua de mar) al disolvente puro (agua potable) a través de la membrana.

Las concentraciones, en mol/Kg, de los principales solutos del agua de mar son: $\text{Cl}^- = 0,546$, $\text{Na}^+ = 0,456$, $\text{Mg}^{2+} = 0,053$, $\text{SO}_4^{2-} = 0,028$ y $\text{Ca}^{2+} = 0,010$.



¿Cuál es la presión que debe aplicarse a la muestra de agua de mar, a 15 °C, confinada por una membrana semipermeable, para obtener agua dulce?

Solución: Nos puede sorprender que el problema no dé los valores de concentraciones de las distintas sales: cloruros, sulfatos..., pero al tratarse de compuestos disociables lo más adecuado es expresar las concentraciones (en este caso en molalidad, mol/Kg) de la especie disociadas (iones en disolución).

Lo único que tenemos que hacer es sumar las concentraciones:

$$\text{Molalidad total} = 0,546 + 0,456 + 0,053 + 0,028 + 0,010 = \mathbf{1,093 \text{ m}}$$

Ahora calculamos el potencial hídrico del agua de mar. El potencial hídrico y el osmótico **son idénticos** en una disolución donde Ψ_m y Ψ_p son inapreciables o cero.

¡Cuidado, nos dicen que la temperatura del agua de mar es 15° Celsius!

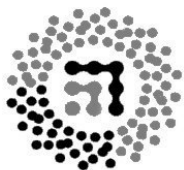
$$\Psi_a = \frac{RT}{V_a} \cdot \ln \chi_a = \frac{0,082 \times (273 + 15)}{0,018} \cdot \ln \left(\frac{1000/18}{(1000/18) + 1,093} \right) = -25,5617 \text{ atm} = -25,89 \text{ bar}$$

Esto quiere decir que el potencial osmótico será de -25,89 bar ò -2,59 MPa y que las presiones osmóticas serán +25,89 bar ò +2,59 MPa.

La presión hidrostática mínima a aplicar sobre el fluido será de +25,9 bar.

No obstante, el proceso real utiliza de 40-70 bar, debido fundamentalmente a aspectos técnicos: la presión extra que se necesita para mover grandes masas de agua por las tuberías y vencer la resistencia al flujo a través de las membranas.

Un problema de un Examen:



ZTF-FCT
Zientzia eta Teknologia Fakultatea
Facultad de Ciencia y Tecnología

Ikaslea
Alumno

1.º Deitura

Apellido 1º

2.º Deitura

Apellido 2º

Izena

Nombre

Data

24 de junio 2009

Fecha

Fisiología Vegetal



Problema (valor 3 puntos sobre 10)

Un fragmento de tejido vegetal se dejó equilibrar en agua destilada. Una vez que se hubo conseguido el equilibrio, se tomó un pequeño trozo del tejido y se determinó que su jugo vacuolar presentaba una concentración de 0,4836 m (molal).

Posteriormente, el mismo tejido se sumergió y se dejó equilibrar en dos soluciones de manitol con potenciales osmóticos de -0,8 y -1,2 MPa. Se observó entonces que el volumen celular disminuyó del 100% (cuando estaba en agua destilada) al 95 y 90%, respectivamente.

Rellenad la siguiente tabla con los valores de potencial hídrico, osmótico y de presión (en unidades MPa) en las tres situaciones. *Los medios estaban a una temperatura de 25 °C. El componente matricial se puede considerar inapreciable.*

$$(R = 0,082 \text{ atm} \cdot \text{l} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1})$$

	Pot. Hídrico (Ψ_a)	P. Osmótico (Ψ_s)	P. Presión (Ψ_p)	Volumen, %
En agua destilada				100
En manitol -0,8 MPa				95
En manitol -1,2 MPa				90

Problema. (explained step by step)

Los medios externos al tejido vegetal son: agua y dos soluciones de manitol con potenciales osmóticos de -0,8 y -1,2 MPa.

Los potenciales osmóticos de una disolución son iguales a los hídricos de dicha disolución: no hay componente de presión (o pared) y no hay (a menos que sea una disolución coloidal y se diga de manera expresa) componentes matriciales, luego:

$\Psi_a = \Psi_s$, o sea que tenemos agua y dos soluciones externas con potenciales hídricos (u osmóticos) de -0,8 MPa y -1,2 MPa.

El potencial hídrico del agua pura es cero, pero si uno no se lo cree sólo tiene que aplicar la fórmula de cálculo:

$$\psi_a = \frac{RT}{\bar{V}_a} \ln \left(\frac{n_a}{n_a + n_s} \right)$$

Si no hay solutos, la molalidad de solutos n_s es cero: el cociente entre paréntesis (n_a/n_a) es 1 y el logaritmo de 1 es cero. Luego, potencial hídrico del agua pura es cero.

Se supone (y lo dice expresamente el problema) que el tejido se ha equilibrado con los medios externos: su potencial hídrico se ha hecho igual (tomando o cediendo agua) al de los medios externos, por eso podemos completar la primera columna por la izquierda, la de potenciales hídricos del tejido vegetal:

	Pot. Hídrico (Ψ_a)	P. Osmótico (Ψ_s)	P. Presión (Ψ_p)	Volumen, %
En agua destilada	0 MPa			100
En manitol -0,8 MPa	-0,8 MPa			95
En manitol -1,2 MPa	-1,2 MPa			90

Siguiente paso: el problema nos dice que el jugo vacuolar tiene una concentración de 0,4836 m (molal), cuando el tejido está equilibrado en agua destilada.

Lo primero de todo es entender que la vacuola es un gran compartimento de agua y solutos que puede ocupar el 90-95% del volumen celular de las células vegetales diferenciadas. La vacuola determina el componente osmótico (Ψ_s) de la célula vegetal, porque en ella se almacenan concentraciones altas de solutos que serían muy peligrosas de mantener en el citoplasma: afectaría a toda la maquinaria bioquímica y además porque el volumen de la vacuola hace que su efecto sea enorme comparado con el efecto osmótico del citoplasma.

Esto quiere decir que si oímos hablar de “jugo vacuolar” inmediatamente tenemos que pensar en **potencial osmótico**.

Entonces, podemos calcular el **potencial hídrico** del jugo vacuolar (**que es el osmótico de la célula**). Otra vez la equivalencia osmótico-hídrico: hemos aislado una disolución de jugo vacuolar y calculamos el hídrico, por la fórmula de abajo, **pero hay que entender** que el efecto en la célula vegetal es la de componente **osmótico**).

$$\psi_a = \frac{RT}{\bar{V}_a} \ln\left(\frac{n_a}{n_a + n_s}\right) = \frac{0,082 \cdot (273 + 25)}{0,018} \cdot \ln\left(\frac{1000/18}{(1000/18) + n_s}\right)$$

También es importante entender que en esta fórmula se trabaja con concentraciones **molales**: calculamos el número de moles de agua en 1000 gramos de agua (1000/18), o sea, por kilogramo de disolución.

Por eso, n_s es precisamente el dato que nos dan: 0,4836 m

$$\psi_a = \frac{RT}{\bar{V}_a} \ln\left(\frac{n_a}{n_a + n_s}\right) = \frac{0,082 \cdot (273 + 25)}{0,018} \cdot \ln\left(\frac{1000/18}{(1000/18) + 0,4836}\right)$$

Cuando se trabaja con logaritmos, que implican a expresiones exponenciales, es esencial conservar, al menos, unos cuatro decimales en nuestros cálculos con la calculadora (o trabajar con la calculadora en operaciones enlazadas para no perder valor decimal). No resultará lo mismo si el cociente 1000/18 se mete como 55,5 que como 55,5555.

Ahora hacemos las operaciones de arriba y obtenemos:

$$\psi_a = \frac{0,082 \cdot (273 + 25)}{0,018} \cdot \ln\left(\frac{1000/18}{(1000/18) + 0,4836}\right) = -11,8451 \text{ atm}$$

¡Cuidado! Con esta fórmula siempre se obtiene el valor en **atmósferas**, debido a que la constante de los gases perfectos contiene esa unidad de presión ($R = 0,082 \text{ atm} \cdot \text{L} \cdot ^\circ\text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$). Tendremos que multiplicar por 1,013 para pasar el valor a bares y dividir por 10 para convertir los bares a Mega Pascales (o multiplicamos directamente por 0,1013).

$$\psi_a = -11,8451 \text{ atm} (\times 1,013) = -11,9991 \text{ bar} = -1,20 \text{ MPa}$$

Y podemos completar otra casilla: la del potencial osmótico cuando el tejido está en agua destilada:

	Pot. Hídrico (Ψ_a)	P. Osmótico (Ψ_s)	P. Presión (Ψ_p)	Volumen, %
En agua destilada	0 MPa	-1,20 MPa		100
En manitol -0,8 MPa	-0,8 MPa			95
En manitol -1,2 MPa	-1,2 MPa			90

Pero, inmediatamente, nos damos cuenta de que si el resultado del potencial hídrico es cero, para que esto ocurra, el potencial de presión (o pared) **debe ser el opuesto en signo**; luego:

	Pot. Hídrico (Ψ_a)	P. Osmótico (Ψ_s)	P. Presión (Ψ_p)	Volumen, %
En agua destilada	0 MPa	-1,20 MPa	+1,20 MPa	100
En manitol -0,8 MPa	-0,8 MPa			95
En manitol -1,2 MPa	-1,2 MPa			90

Ahora bien, nos quedan las demás casillas sin completar y tenemos que pensar en cómo hacerlo. Aquí se nos debe ocurrir que **los datos de variación de volumen en el tejido algo tendrán que ver**.

Pues sí, porque cuando el tejido se deshidrata (va perdiendo volumen, del 100% al 95 y 90%) y la **concentración** de solutos se hace **mayor** (hay menos agua y los solutos no pueden escapar a través de las membranas) el **potencial osmótico** debe hacerse más negativo.

En estos casos se aplica la **corrección Presión-Volumen** de la Ley de los gases de Boyle-Mariotte: en esencia la célula vegetal se comporta (variando de volumen) al deshidratarse -o hidratarse-, igual que un globo que pierde -o gana- presión. No es un gas, pero si un fluido, el agua, el que interviene en estos cambios de presión y volumen.

Y esta fórmula nos dice que: $\text{Presión 1} \times \text{Volumen 1} = \text{Presión 2} \times \text{Volumen 2}$. En nuestro caso la "Presión" es la osmótica (es decir, el Potencial osmótico).

Así pues, tendremos que el Potencial Osmótico, en agua destilada, multiplicado por el Volumen (100%), también en agua destilada, será igual a los Volúmenes, disminuidos, en las otras dos situaciones (-0,8 y -1,2 MPa de las disoluciones externas), multiplicado por sus correspondientes Potenciales Osmóticos:

$$100 \times (-1,20) = 95 \times \Psi_s \text{ en manitol } -0,8 \text{ MPa} ; \quad \Psi_s \text{ manitol } -0,8 \text{ MPa} = -1,26 \text{ MPa}$$

$$100 \times (-1,20) = 90 \times \Psi_s \text{ en manitol } -1,2 \text{ MPa} ; \quad \Psi_s \text{ manitol } -1,2 \text{ MPa} = -1,33 \text{ MPa}$$

Y rellenamos sus valores:

	Pot. Hídrico (Ψ_a)	P. Osmótico (Ψ_s)	P. Presión (Ψ_p)	Volumen, %
En agua destilada	0 MPa	-1,20 MPa	+1,20 MPa	100
En manitol -0,8 MPa	-0,8 MPa	-1,26 MPa		95
En manitol -1,2 MPa	-1,2 MPa	-1,33 MPa		90

Una vez que conocemos los Potenciales Hídricos y los Osmóticos, todo lo que falta por hacer es pan comido. Sabemos que la expresión de las relaciones hídricas en una célula vegetal (cuando el Potencial Matricial es insignificante) se resume en:

$$\Psi_a = \Psi_s + \Psi_p , \text{ y despejando el Potencial de Presión: } \Psi_p = \Psi_a - \Psi_s$$

Aquí hay que tener **cuidado con los signos**: $-(-X) = +X$.

$$\Psi_p \text{ manitol } -0,8 \text{ MPa} = -0,8 - (-1,26) = 1,26 - 0,8 = +0,46 \text{ MPa}$$

$$\Psi_p \text{ manitol } -1,2 \text{ MPa} = -1,2 - (-1,33) = 1,33 - 1,2 = +0,13 \text{ MPa}$$

De manera que podemos completar nuestra tabla:

	Pot. Hídrico (Ψ_a)	P. Osmótico (Ψ_s)	P. Presión (Ψ_p)	Volumen, %
En agua destilada	0 MPa	-1,20 MPa	+1,20 MPa	100
En manitol -0,8 MPa	-0,8 MPa	-1,26 MPa	+0,46 MPa	95
En manitol -1,2 MPa	-1,2 MPa	-1,33 MPa	+0,13 MPa	90

Una vez obtenidos los valores numéricos de un problema es esencial someterlos a una crítica rigurosa:

¿Tienen coherencia y sentido los valores que hemos obtenido? ¿No habrá algo discordante, que sea señal de algún error en los cálculos?

Este acto de análisis es tal vez el más fundamental en nuestra formación como científicos: cuando uno obtiene un conjunto de datos, debe ser inquisitivo, escéptico y tener **sentido común** y, a veces, **un sexto sentido** para no dar por válidos resultados erróneos.

En nuestra tabla, vemos que los valores de **Potencial Osmótico** se hacen más negativos a medida que el **Potencial Hídrico** disminuye y la célula vegetal se deshidrata (pierde volumen). Y también, que el **Potencial de Presión** se hace menos positivo (el tejido pierde turgencia, se vuelve más flácido) cuando el potencial hídrico disminuye.

Aparentemente todo encaja y tiene significado.

Hoy en día todos estamos familiarizados con la idea de **potenciales eléctricos**: la corriente va de un punto de alto potencial a otro de potencial más bajo. Estamos acostumbrados a decir que una masa, situada a alguna distancia del suelo, tiene un **potencial gravitatorio** mayor que otra que está en el suelo. Esto quiere decir que si quitamos la sujeción, no hay ninguna duda de hacia donde se moverá. De forma semejante, podemos hablar de **potencial químico** del agua de un sistema frente a otro. Sabemos que el agua se moverá de un punto de potencial alto (mayor concentración de moléculas de agua) a un punto de potencial bajo (concentración menor).

El potencial químico se expresa convencionalmente con la letra μ . Para la especie molecular agua: μ^{H_2O} .

Dos sistemas en equilibrio tendrán potenciales químicos iguales:

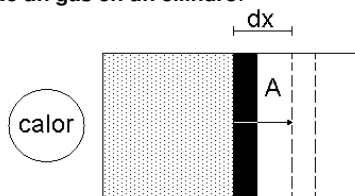
$$\mu_a^{H_2O} = \mu_b^{H_2O}$$

no habiendo movimiento neto de moléculas determinadas (e.g., de agua, si hablamos de potencial químico del agua) entre los dos sistemas. Si los dos sistemas no están en equilibrio, habrá un movimiento neto dirigido de mayor a menor potencial, y la energía liberada se calculará como:

$$(\mu_a^{H_2O} - \mu_b^{H_2O}) \cdot n$$

siendo n el número de moléculas (generalmente se refiere a moles) de la especie molecular agua, que se mueven del sistema **a** al **b** (liberando energía: proceso espontáneo, o absorbiendo energía: proceso no espontáneo). Hay que puntualizar que en los seres vivos, a escala celular, el agua se mueve de manera espontánea, es decir, que no hay bombas de membrana que puedan impulsar agua con gasto de energía (a mayor escala existen bombas o corazones para mover fluidos, creando gradientes de presión entre dos puntos del sistema).

Para poder expresar la diferencia entre dos potenciales, en función de los parámetros de concentración del disolvente y solutos de cada sistema, partiremos del ejemplo más clásico de la Termodinámica: **la expansión isotérmica de un gas en un cilindro**.



Si se supone que no hay fricción entre las paredes del cilindro y el pistón, que se trata de un gas perfecto y, por definición no existen fuerzas de atracción ni de repulsión entre ellas ..., al aplicar una fuente de calor muy débil en la superficie, el gas sólo se dilata de manera infinitesimal. El trabajo realizado por el sistema al desplazar el pistón, se debe a la presión ejercida por las moléculas del gas en expansión sobre la superficie A (presión \times área = fuerza), a lo largo de la distancia infinitesimal dx (fuerza \times longitud = trabajo). Este trabajo infinitesimal se expresa como:

$$dW = P \cdot A \cdot dx$$

donde $A \cdot dx$ es un volumen, aunque infinitesimal, dV :

$$dW = P \cdot dV$$

al pasar de una escala infinitesimal a otra observable, el trabajo se expresará en función de ΔV , es decir, la diferencia entre el volumen final V_2 y el volumen inicial V_1 , así que integramos la expresión anterior:

$$\int_0^W dW = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV$$

Es decir,

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV$$

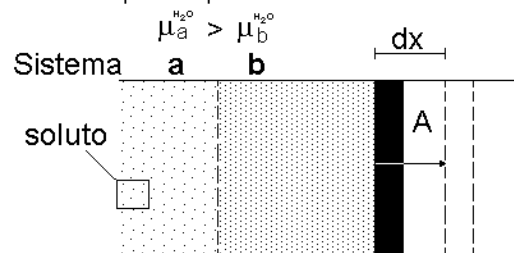
Para integrar el segundo miembro de la igualdad debemos buscar una forma de expresar P en función de V . De hecho, utilizamos la ecuación de los gases: $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$. Despejando P ,

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} \quad \text{ò} \quad P = \frac{RT}{V} \quad \text{para 1 mol. Así que}$$

tenemos:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{RT}{V} \cdot dV = RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = RT (\ln V_2 - \ln V_1) = RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Aunque la finalidad del cálculo para la expansión isoterma de un gas no resulta evidente al principio, veamos como en realidad es aplicable a nuestro caso: si sustituimos una fuente de calor por una diferencia de concentraciones entre dos sistemas separados por una membrana.



En resumen, podemos sustituir W por la diferencia de potenciales químicos entre los dos sistemas.

$$(\mu_a^{H_2O} - \mu_b^{H_2O}) = RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

También podemos escribir que $V_1 = n/C_1$ y $V_2 = n/C_2$, donde C es la concentración y n el número de moles y sustituyendo obtenemos la expresión:

$$(\mu_a^{H_2O} - \mu_b^{H_2O}) = RT \ln \frac{C_1}{C_2}, \text{ además } C_1 \text{ es igual a } C_b \text{ y en el}$$

$$\text{equilibrio } C_2 \text{ será igual a } C_a : (\mu_a^{H_2O} - \mu_b^{H_2O}) = RT \ln \frac{C_b}{C_a},$$

de manera que se relaciona la diferencia entre potenciales químicos con la concentraciones de cada disolución.

Hablar del valor absoluto de un potencial químico es enteramente arbitrario, aunque conveniente en la práctica. Para ello, se escoge como valor patrón el agua pura y se sustituye el valor de la concentración por la **fracción molar del agua** (que es el disolvente) y que toma el valor de 1 para el agua pura.

$$\chi = \frac{n_a}{n_a + n_s}, \text{ donde } n_a \text{ es el número de moles del}$$

agua y n_s del soluto, quedando al final la expresión:

$$(\mu_a^{H_2O} - \mu_0^{H_2O}) = RT \ln \frac{\chi}{\chi_0} \text{ y siendo } \mu_0^{H_2O} \text{ igual a cero,}$$

como valor de referencia, y χ_0 igual a 1, obtenemos:

$$\mu^{H_2O} = RT \ln \chi = RT \ln \left(\frac{n_a}{n_a + n_s} \right)$$

El potencial hídrico se define como el potencial químico del agua dividido por el **volumen molar parcial del agua** ($\bar{V}_a = 0,018$, el volumen en litros que ocupa un mol de agua):

$$\psi_a = \frac{RT}{\bar{V}_a} \cdot \ln \left(\frac{n_a}{n_a + n_s} \right)$$