

Agua

María de la Luz Velázquez Monroy & Miguel Ángel Ordorica Vargas

Importancia Biológica del Agua

El agua es el compuesto más abundante en la biosfera; como tal, es indudable que juega un papel determinante en las características de los seres vivos y su medio ambiente. Todos los procesos que en conjunto llamamos "vida", se llevan a cabo en un medio acuoso o están influenciados por la presencia del agua. En Medicina, el balance hídrico es uno de los factores que tienen mayor influencia en el estado de salud de los seres humanos.

Por si mismos, estos hechos bastarían para impulsar el estudio del agua. Si a ello añadimos que el conjunto de sus propiedades fisicoquímicas resulta una colección de singularidades, para un compuesto de peso molecular tan bajo, la importancia de su estudio en Bioquímica, resulta aún más evidente.

Entre las propiedades del agua importantes para la vida se encuentran el volumen negativo de fusión, densidad máxima en el estado líquido (4 °C), elevada constante dieléctrica, temperaturas de fusión, ebullición y crítica demasiado altas para un compuesto covalente, movilidad iónica alta para H^+ y OH^- , por mencionar algunos ejemplos.

Distribución corporal del agua

En un adulto, el agua constituye en promedio el 60% del peso corporal total, lo cual representa aproximadamente 42 kg o litros de agua en un individuo promedio de 70 kg¹. Esta cantidad varía con la edad (**Figura 1**), el sexo (las mujeres tienen alrededor de 65%) y la constitución física del individuo (los individuos obesos tienen menor proporción)².

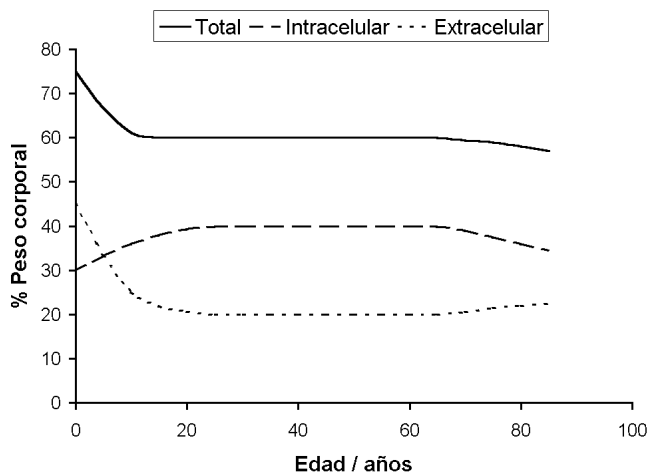


Figura 1. Variación en la distribución del agua corporal con la edad.

El agua corporal está distribuida en dos grandes compartimentos, separados por membranas celulares:

Agua Intracelular. El agua intracelular es la que se encuentra dentro de la célula, constituye alrededor del 67% del agua total, o sea 2/3 partes de ella, lo que representa 28 kg o litros de agua, y

el 40% del peso corporal total. Está distribuida en los organelos como citoplasma, mitocondria, núcleo, etc.; la cantidad varía entre organelos y tejidos.

Agua Extracelular. El agua extracelular representa el 33% del agua total (20% del peso corporal, ó 14 litros). El agua extracelular se reparte en los compartimentos siguientes:

- *Plasma.* Constituye poco más del 8% del agua total o 5% del peso corporal. Está contenida en el sistema vascular. También denominada “fracción circulante” es la fuente principal de líquidos y electrolitos para el resto de los compartimentos.
- *Intersticial y Linfa.* Es el líquido exterior a los vasos sanguíneos, que rodea las células. La linfa es el líquido intersticial que entra a los vasos linfáticos. Es el 15% del agua total.
- *Tejido Conectivo y Hueso.* Se encuentra en piel, ligamentos tendones y sistema óseo. Aunque se puede clasificar como intersticial se intercambia tan lentamente que se considera un compartimiento aparte. Representa el 8% del agua total.
- *Transcelular.* Está separada del resto de los fluidos extracelulares por membranas epiteliales, en las cavidades de los sistemas respiratorio, digestivo y urogenital, en pleura, peritoneo, sinovia, etc. Es el 2% del agua total.

La relación entre estos compartimentos se resume en la **Figura 2**.

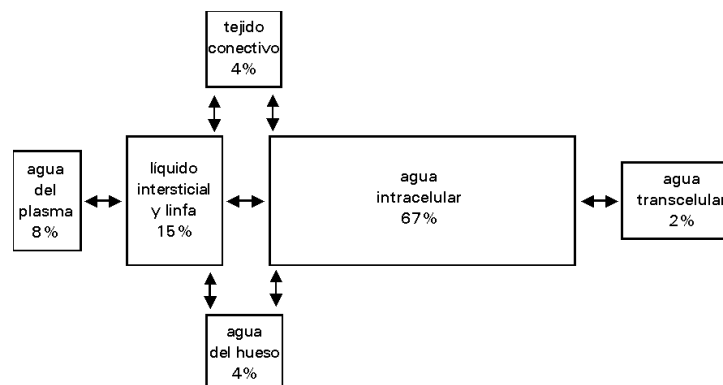


Figura 2. Porcentaje del agua total en los compartimentos del organismo.

La concentración de solutos es diferente en los distintos compartimentos. Por ejemplo, la concentración de proteínas es alta en el compartimiento intracelular, menor en el plasma y aún más pequeña en el espacio intersticial. La concentración extracelular de sodio es alta y la de potasio baja mientras que en el compartimiento intracelular la relación se invierte. La diferencia de concentraciones de sodio y potasio a ambos lados de la membrana celular se mantiene mediante transporte activo, indispensable para el buen funcionamiento de la célula.

Equilibrio Hídrico

El contenido de agua del organismo debe mantenerse constante, para ello se requiere de un balance cuidadoso en el cual participan varios procesos, los más importantes se enlistan en la **Tabla 1**. Las proporciones mostradas pueden variar entre individuos, y para un mismo individuo según la época del año y etapa de la vida. El sudor y la respiración constituyen las vías de pérdida “insen-

sible” de agua porque no estamos conscientes de ellas, por otro lado la principal vía de ganancia insensible de agua es el agua metabólica.

Tabla 1. Vías ordinarias de ganancia y pérdida de agua

GANANCIA DE AGUA			PÉRDIDA DE AGUA		
Exógenas	Bebidas	1.5 litros	Fijas:	Respiración	0.3 litros
	Alimentos	0.8 litros		Sudor	0.5 litros
Endógenas	Metabólica	0.2 litros	Variables:	Heces	0.2 litros
				Orina	1.5 litros
Total		2.5 litros	Total		2.5 litros

Los procesos enlistados en la tabla anterior también se conocen como **vías ordinarias** porque son las normales, en comparación con las **vías extraordinarias** que se presentan sólo en forma esporádica. Entre las **vías de ganancia extraordinarias** más frecuentes están las **transfusiones, inyecciones y sueros**. Por su parte las **pérdidas extraordinarias** más comunes incluyen las **hemorragias, vómito, diarrea, tos y desordenes respiratorios**.

Ganancia de Agua

Ingesta de agua. En el ser humano normal, la ingesta de agua está controlada por la sed, que se define como el reconocimiento consciente del deseo de agua. Aunque puede ser inhibida por pautas sociales, la sed sigue siendo el mecanismo fundamental de suministro de agua que no se consume como parte de los alimentos.

El estimulante esencial de la respuesta de beber parece ser la hipertonía del líquido extracelular. En los adultos sanos, un aumento de solo 2-3% de la osmolaridad del líquido extracelular produce un fuerte deseo de beber. Los osmorreceptores que identifican el cambio de osmolaridad del plasma están situados en el hipotálamo y pueden ser estimulados tanto por la deshidratación como por la infusión de un suero salino hipertónico y en menor grado por soluciones hipertónicas de Urea o Glucosa. Además del aumento en la osmolaridad del plasma, la hipovolemia y la hipotensión también estimulan la sed, por mecanismos aún no conocidos.

Agua metabólica. El agua metabólica es el agua formada durante la oxidación de los alimentos. El volumen de agua obtenido de este modo varía con el tipo de alimento oxidado. La oxidación de 1 g de proteína proporciona 0.38 g de agua; de 1 g de almidón, 0.56 g de agua y de 1 g de grasa, 1.07 g de agua. Pese al mayor volumen obtenido de la grasa, la mayor parte del agua metabólica procede del almidón, dada su abundancia en casi todas las dietas. En el ser humano el agua metabólica constituye una parte muy pequeña de las necesidades diarias. Sin embargo, algunos animales del desierto sobreviven casi exclusivamente con agua metabólica, porque posee un mecanismo renal de concentración de la orina muy eficaz.

Pérdidas de Agua

Pérdida insensible. Se denomina pérdida insensible a la que tiene lugar a través de la respiración, transpiración y eliminación en el aparato gastrointestinal. En una persona inactiva y a temperatura ambiente, la pérdida de agua por respiración y transpiración menor a 1 mL/min. Al aumentar la actividad del individuo y la temperatura, la pérdida aumenta, y en condiciones extremas puede llegar

a 20-25 l/día. Estas condiciones se toleran durante períodos breves, siempre y cuando sea posible reemplazar adecuadamente las pérdidas.

El agua perdida por el aparato gastrointestinal suele ser escasa; sin embargo, los vómitos y la diarrea pueden hacer que se pierdan grandes cantidades. Además de deshidratación grave, los vómitos pueden provocar alteraciones importantes del equilibrio electrolítico y ácido-base, al extraer las secreciones gástricas del sistema. Se han comunicado casos de diarrea con pérdida de hasta 1 l/hora de líquido. Ello puede dar lugar a la pérdida de iones de potasio y bicarbonato y, dependiendo del estímulo que haya causado la diarrea, producir hiper o hiponatremia. La imposibilidad de corregir estas alteraciones puede llevar a la muerte.

Excreción renal de agua. El riñón del mamífero sirve como órgano regulador principal del balance de agua en el organismo. La regulación de la excreción de agua por el riñón es fundamentalmente hormonal. La autorregulación que ejerce el glomérulo sobre el índice de filtración glomerular parece depender de la interacción de prostaglandinas y Angiotensina II. La liberación de estas hormonas es estimulada por los cambios de la presión de perfusión renal, así como por las alteraciones del líquido que atraviesa la región del túbulo distal en que se encuentran las células de la mácula densa. Las células de la mácula densa detectan los cambios del flujo de sodio o cloruro de sodio en el túbulo distal o las variaciones de la osmolaridad del líquido tubular y provocan que las células yuxtglomerulares liberen a la sangre la enzima **Renina** (EC 3.4.23.15) una proteasa que hidroliza el Angiotensinógeno, una glicoproteína de la familia α_2 de las globulinas plasmáticas, liberando el decapeptido Angiotensina I (DRVYIHPFLL), que tiene poca actividad vasopresora, pero que al pasar por los pulmones es sustrato de la **Enzima Convertidora de Angiotensina** (ECA, EC 3.4.15.1), que elimina 2 aminoácidos del extremo carboxilo, y la transforma en el octapeptido Angiotensina II (DRVYIHPF) vasopresor potente, que provoca cambios del flujo sanguíneo renal y del índice de filtración glomerular. Las prostaglandinas cumplen su función en el proceso autorregulador, ya sea directamente o bien modulando el efecto de la Angiotensina II.

La reabsorción de agua depende del control de la Hormona Antidiurética (Vasopresina, ADH). El aumento de la osmolaridad del líquido extracelular es el estímulo primario de la liberación de esta hormona; otros estímulos son la hipovolemia, la hipotensión y la Angiotensina II circulante. Por separado o combinados, estos estímulos provocan la liberación de ADH por la hipófisis posterior. La hormona actúa en el riñón a través del AMP cíclico provocando mayor reabsorción de agua.

La corteza suprarrenal libera Aldosterona como respuesta a la Angiotensina II, a las variaciones del potasio del plasma y, en menor grado, a las concentraciones de sodio y ACTH en el plasma. La Aldosterona aumenta la secreción de potasio y la reabsorción de sodio. El sodio reabsorbido es acompañado por agua, por lo que la Aldosterona incrementa la cantidad total de sodio y agua. Aunque esta hormona puede reducir la concentración de potasio en el plasma, en condiciones normales no modifica la de sodio. El aumento del sodio corporal total, que se produce como consecuencia de la secreción de Aldosterona no causa elevación de la concentración del mismo en el plasma porque queda contrarrestado por el flujo de agua que diluye el sodio reabsorbido.

Estructura

En esta sección estudiaremos la estructura de la molécula de agua, la forma como las moléculas individuales se asocian para formar la estructura del hielo y la transición que lleva al cambio de es-

tado sólido - líquido. Todas las propiedades del agua pueden explicarse a partir de la estructura de su molécula y las propiedades de los átomos que la forman, así se puede entender la razón por la cual el agua es un compuesto con propiedades tan especiales, y la importancia de dichas propiedades en los procesos biológicos.

Estructura de la molécula de agua. La molécula de agua está formada por un átomo de Oxígeno y dos de Hidrógeno unidos por enlaces covalentes polares³. La configuración electrónica del átomo de Oxígeno en la molécula de agua corresponde a una hibridación sp_3 ⁴.

En la molécula de agua (**Figura 3.A**), el ángulo de enlace H–O–H es de 104.5° . La discrepancia con el valor ideal de 109.5° , se explica por la repulsión entre los orbitales llenos no enlazantes. La distancia de enlace H–O en la molécula de agua es de casi 0.1 nm .

La diferencia de electronegatividad entre los átomos de Hidrógeno y Oxígeno, hace que los electrones de enlace se distribuyan en forma asimétrica, hay mayor probabilidad de encontrarlos alrededor del Oxígeno que del Hidrógeno, por este motivo, el enlace es covalente polar. La polaridad del enlace y la hibridación sp_3 del Oxígeno, hacen que la molécula tenga un momento dipolo elevado, mayor que el de otras moléculas de peso molecular semejante.

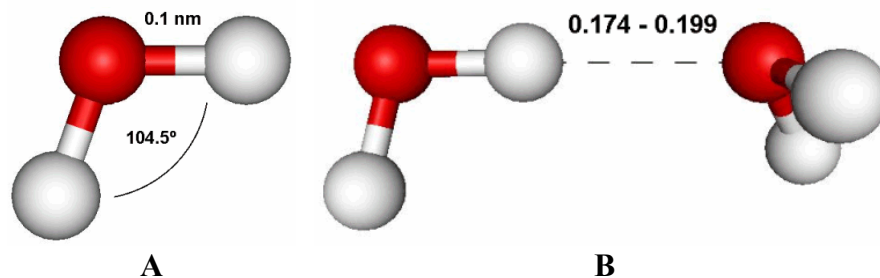


Figura 3. (A) Estructura de la molécula de agua. Rojo, átomo de Oxígeno. Gris, átomo de Hidrógeno. (B) Puente de hidrógeno.

El momento dipolo del agua permite que cuando dos moléculas de agua se encuentran próximas, se formen las interacciones conocidas como *Puentes de Hidrógeno*⁵. Las características de los puentes de hidrógeno entre moléculas de agua se muestran en la **Figura 3.B**.

La formación de puentes de hidrógeno entre moléculas de agua explica en gran parte, las propiedades especiales del agua.

Estructura del Hielo. Cuando el agua se congela, las moléculas pierden energía cinética y la fuerza de los puentes de hidrógeno es suficiente para mantenerlas en posiciones fijas. Debido a su geometría tetraédrica, cada molécula puede formar cuatro enlaces por puente de hidrógeno con sus vecinas, dos como donador y dos como aceptor del Hidrógeno (**Figura 4**) formado una estructura cristalina tridimensional, llamada *micro celosía*, en la que las moléculas se encuentran lo más alejadas posibles, de ahí que la densidad del hielo sea menor que la del agua líquida.

En la **Figura 5.A** se muestra un esquema de la estructura de micro celosía del hielo.

Estructura del Agua Líquida. Al aumentar la temperatura, las moléculas de agua adquieren suficiente energía cinética para vencer la fuerza de los puentes de hidrógeno y se pueden mover rápidamente, entonces la estructura de la celosía se colapsa y pasa al estado líquido (**Figura 5.B**). Se ha calculado que basta el rompimiento del 15% de los enlaces por puente de hidrógeno para el cambio de estado. En el estado líquido las moléculas de agua pueden aproximarse más que en el hielo, de ahí que la densidad del líquido sea mayor que la del sólido. También los puentes de hidrógeno son más débiles y de vida más corta. La estructura exacta del agua líquida no se conoce pero se supone que estaría formada por estructuras de micro celosía de vida corta, mezcladas con agrupamientos menos regulares y estructuras de tipo *clatrato*⁶, con moléculas de agua en su interior, todo en un cambio constante.

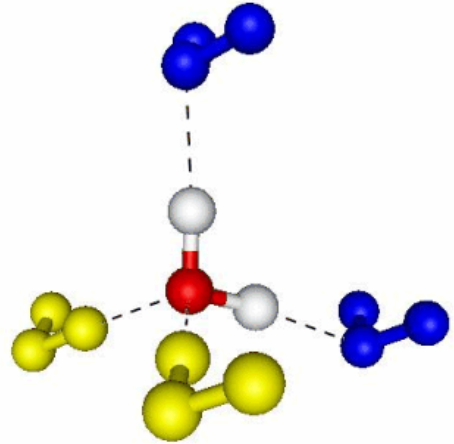


Figura 4. Formación de puentes de hidrógeno. Claro, moléculas donadoras de hidrógeno. Oscuro, moléculas receptoras.

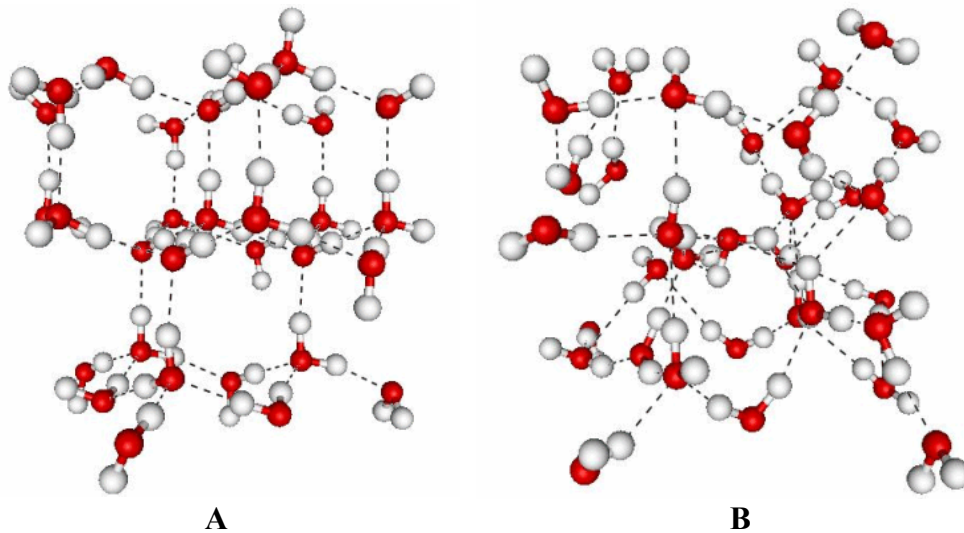


Figura 5. (a) "Micro celosía" del hielo. (b) Estructura del agua líquida.

Propiedades Físicoquímicas

Las propiedades fisicoquímicas del agua se clasifican según el tipo de fenómenos en los que se manifiesta, como:

- A) **Térmicas.** Propiedades relacionadas con el comportamiento del agua durante los intercambios de energía
- B) **Mecánicas.** Son aquellas responsables del comportamiento del agua en movimiento.
- C) **Eléctricas.** Están relacionada con el comportamiento del agua en presencia de cargas y campos eléctricos.

A continuación se estudian las propiedades fisicoquímicas del agua más importantes en los seres vivos.

Propiedades Térmicas.

Punto de Fusión. El punto de fusión se define como la temperatura a la cual una sustancia en estado sólido pasa al estado líquido, en condiciones ambientales. Para el agua esta propiedad tiene un valor de 273.15 K (0 °C) a presión de 1 atmósfera y se utiliza como el punto de referencia cero de la escala centígrada de temperatura.

Al comparar la temperatura de fusión de los hidruros de los elementos del Grupo IVA de la Tabla Periódica (Oxígeno, H₂O; Azufre, H₂S; Selenio, H₂Se y Telurio, H₂Te) la del agua es la más alta. Si se comportara como los otros compuestos, sería alrededor de 173 K (-100 °C), como se observa en la gráfica de la **Figura 6.A**.

La diferencia en comportamiento se explica porque para fundir el hielo, es necesario romper los puentes de hidrógeno y para ello las moléculas de agua, deben absorber más energía que las del resto de los compuestos, que no tienen suficiente electronegatividad para formar puentes de hidrógeno. A consecuencia de esto, las moléculas de agua deben tener mayor energía cinética para cambiar de estado, lo cual significa una mayor temperatura.

Si además, comparamos el punto de fusión del agua, con los hidruros de los elementos de su mismo periodo (Borohidruro, B₂H₆; Metano, CH₄; Amoníaco, NH₃; Agua, H₂O y Fluoruro de hidrógeno, HF), encontramos el mismo tipo de comportamiento, como se observa en la gráfica de la **Figura 6.B**.

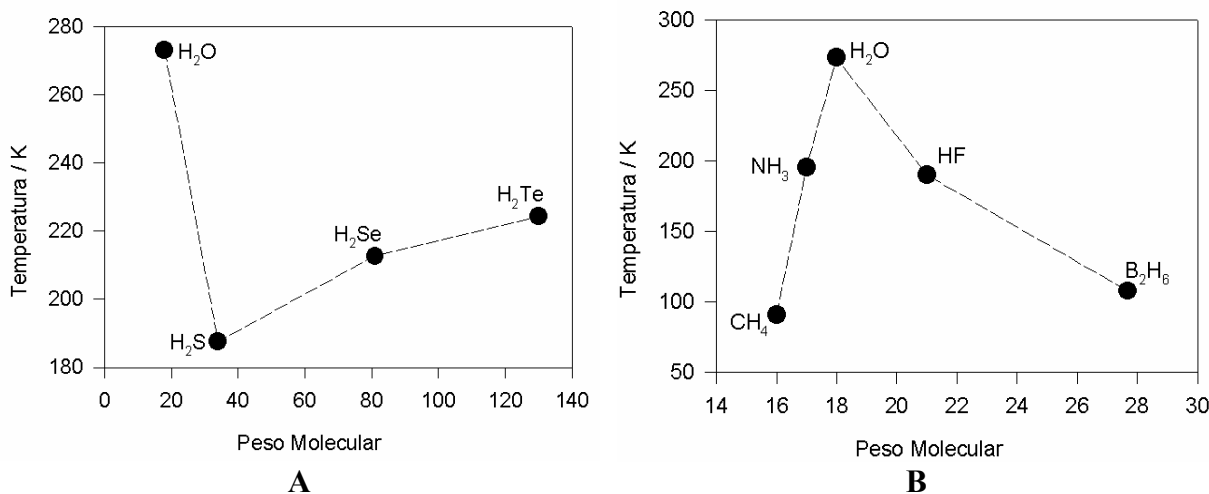


Figura 6. (A) Comparación de las temperaturas de fusión de los hidruros de los elementos de la familia del Oxígeno. (B) Comparación de las temperaturas de fusión de los hidruros de los elementos del periodo del Oxígeno.

Esta desviación también se explica por la asociación de las moléculas de agua mediante puentes de hidrógeno. Aunque el NH₃ y el HF también pueden formar puentes de hidrógeno, en el amoníaco, estos son más débiles porque la electronegatividad del Nitrógeno es menor que la del Oxígeno y por lo tanto el enlace N–H es menos polar. Además, el Nitrógeno del amoníaco, tiene sólo un par de electrones para compartir y por ello forma puentes de hidrógeno menos regulares que los del

agua. Por su parte el enlace F–H del fluoruro de hidrógeno, aunque tiene mayor polaridad que los enlaces del agua, y forma puentes de hidrógeno más fuertes, sólo puede hacer uno como donador por molécula y el efecto global es menor que para el agua.

Punto de Ebullición. Se define como la temperatura a la cual un líquido cambia al estado de vapor en condiciones ambientales. Para que esto suceda, la presión de vapor del líquido debe igualar la presión atmosférica. A nivel del mar, la temperatura de ebullición del agua es de 373.15 K (100 °C).

Como la de fusión, la temperatura de ebullición del agua es alta, en comparación a la de los hidruros de los elementos de su mismo grupo. De seguir la misma tendencia que ello, su temperatura de ebullición sería de alrededor de 200 K (-70 °C) como se puede ver en la gráfica de la **Figura 7.A**. Sucede lo mismo, y por las mismas razones, al comparar la temperatura de ebullición del agua con la de los hidruros de los elementos de su mismo periodo (**Figura 7.B**).

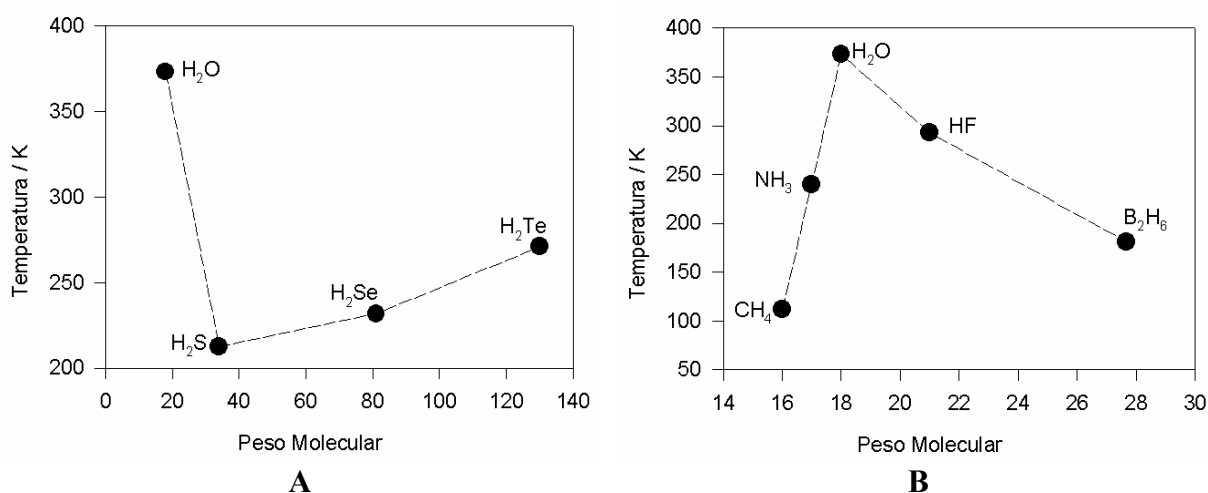


Figura 7. (A) Comparación de las temperaturas de ebullición de los hidruros de los elementos de la familia del Oxígeno. (B) Comparación de las temperaturas de ebullición de los hidruros de los elementos del periodo del Oxígeno.

Calor Específico. El calor específico se define como la energía necesaria para elevar un grado centígrado la temperatura de un gramo de sustancia. Cuando se expresa en base molar se conoce como *capacidad calorífica*. El agua tiene un calor específico mayor que el de los metales y casi cualquier otra de las sustancias comunes (4.186 J/g = 1 cal/g). El valor tan alto de esta propiedad se explica porque los puentes de hidrógeno que se forman entre las moléculas de agua frenan la agitación térmica y reducen la velocidad con que aumenta la temperatura. Esta es una de las propiedades más importantes del agua en la regulación de la temperatura corporal, pues se necesita intercambiar mucha energía para que el agua corporal cambie de temperatura.

Es interesante notar que el calor específico del agua tiene su valor mínimo alrededor de 310 K (37 °C) que es la temperatura normal de los animales homeotermos. Esto significa que se requiere mayor cantidad de calor para mantener constante la temperatura en cualquier valor diferente a 37 °C, y por lo tanto, mayor gasto de energía. Este fenómeno se ilustra en la gráfica de la **Figura 8**.

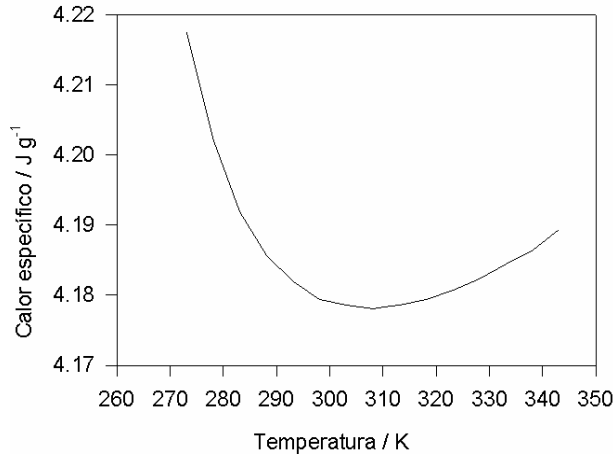


Figura 8. Variación del calor específico del agua con la temperatura.

Calor Latente de Evaporación. Es la cantidad de energía que se necesita para pasar un mol de una sustancia del estado líquido al de vapor, a temperatura constante. Esta es otra de las propiedades del agua que le permiten regular la temperatura. El calor latente de evaporación del agua es de 40.79 kJ/mol o 537 cal/g a 100 °C (591 cal/g a 20 °C); superior al de cualquier otra sustancia líquida. Se dice que se requiere toda esa energía para romper una cantidad tal de puentes de hidrógeno, que permita al agua líquida pasar al estado de vapor.

Para la regulación de la temperatura, la evaporación de pequeñas cantidades de agua, elimina grandes cantidades de energía, que de otra manera provocarían aumento de temperatura. La eliminación de energía mediante evaporación de agua se realiza constantemente a través de la respiración y se puede incrementar en forma notable con la sudoración intensa.

Calor Latente de Fusión. Es la cantidad de energía que se necesita para pasar un mol de una sustancia del estado sólido al líquido, a temperatura constante. El calor latente de fusión del agua es de sólo 6.01 kJ/mol o 80 cal/g a 0 °C; aunque mucho menor que el de evaporación, también es superior al de la mayoría de los líquidos. Se dice, que esta diferencia se debe a que se rompen menos puentes de hidrógeno para fundir el sólido que para evaporar el líquido.

De cualquier manera, la fusión del hielo extrae suficiente calor del medio ambiente para enfriar en forma perceptible las sustancias que lo rodean. A la inversa, al congelarse una pequeña cantidad de agua, se libera al medio ambiente suficiente calor para hacer más difícil la congelación de más agua.

Conductividad Térmica. Es la facilidad con que una sustancia permite el paso del calor. Para el agua es de 0.591 J/K m², menor que la de los metales pero mayor que la mayoría de los compuestos orgánicos y lo bastante grande para que en las dimensiones celulares, participe en forma importante para mantener la temperatura celular uniforme. Cuando el agua se congela, su conductividad térmica disminuye hasta menos de 0.01 J/K m², por lo que el hielo es un buen aislante térmico.

Junto con la conductividad térmica del agua, la circulación sanguínea, también participa en la homogeneización de la temperatura a nivel corporal.

Presión de Vapor. Se llama presión de vapor a la presión que ejerce el vapor de una sustancia en equilibrio con una fase condensada (sólido o líquido), a temperatura constante. La presión de vapor es una medida de la volatilidad de las sustancias, a mayor presión de vapor más rápida es la evaporación. Los sólidos con presiones de vapor altas como el Bióxido de Carbono y el Yodo, pueden pasar del estado sólido al vapor sin pasar por el líquido, este proceso se llama *sublimación*.

La presión de vapor del agua es menor que la de otros líquidos ($13\ 248\ \text{N/m}^2$ a $310\ \text{K}$), de modo que no es fácil de evaporar. Este es el comportamiento que se espera de un líquido en el que sus moléculas interactúan con fuerza, como el agua.

Propiedades Mecánicas

Densidad. Se llama densidad de una sustancia, a la masa contenida por cada unidad de volumen. La densidad máxima del agua es de $1\ \text{g/mL}^7$ que se alcanza a la temperatura de $4\ ^\circ\text{C}$. Una de las propiedades más raras del agua es el tener su máxima densidad cuando aún se encuentra en estado líquido (**Figura 9**) Por esta razón su el volumen aumenta al pasar al estado sólido y por eso el hielo flota en el agua líquida.

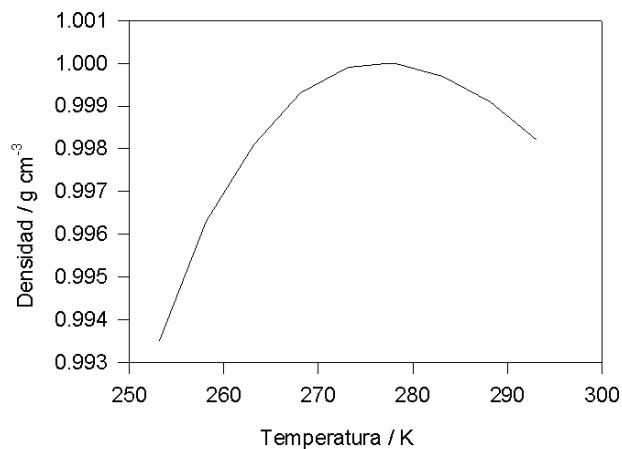


Figura 9. Variación de la densidad del agua con la temperatura.

Este raro comportamiento es importante para los organismos que viven en el agua, porque el hielo queda en la superficie de los cuerpos de agua y sirve como aislante, permitiendo que el agua se mantenga en estado líquido y con ello, la supervivencia de los organismos acuáticos.

Como se discutió antes, la menor densidad en el hielo se debe a que la distancia promedio entre las moléculas es mayor en el estado sólido que en el líquido, debido a la asociación por puentes de hidrógeno.

Viscosidad. La viscosidad es la resistencia de los fluidos a moverse. El agua tiene una viscosidad en fase líquida de $0.001\ \text{kg/m s}$ ($0.01\ \text{Poise}$) que corresponde a un valor medio. Por este motivo, el agua puede circular con facilidad a través de los sistemas circulatorios de los seres vivos, impulsada por las "bombas" que son sus corazones.

Por otro lado, la disolución de compuestos higroscópicos, aumenta la viscosidad del agua hasta un punto que la hace útil como lubricante en articulaciones y soporte en cavidades del organismo.

Tensión superficial. La tensión superficial es la resistencia que opone un líquido al aumento del área de su superficie. El agua tiene un valor de tensión superficial muy alto, 0.07275 N/m, sólo menor a la del mercurio líquido.

Es la tensión superficial la que permite el ascenso capilar que requieren algunas plantas para alimentarse. Por otro lado, la elevada tensión superficial impide la dispersión de las grasas en el agua, a menos que se empleen agentes tensoactivos negativos, como los componentes de la bilis en la digestión. Para que se pueda efectuar el intercambio de gases en la respiración, los alvéolos pulmonares se deben mantener húmedos sin que se colapsen a causa de la tensión superficial del agua. Para lograr esto, se requiere una glicoproteína, el factor surfactante, que disminuye la tensión superficial; la falta congénita de esta proteína provoca desordenes respiratorios.

Propiedades Eléctricas

Momento Dipolo. El momento dipolo o bipolar, es una medida de la simetría en la distribución de cargas que presenta una molécula, si las cargas están distribuidas en forma homogénea el momento dipolo es cero, y mientras menor simetría exista en su distribución, mayor será el momento dipolo. El momento dipolo (μ) se calcula como el producto de la magnitud de la carga que está separada (q), y la distancia (d) de separación entre el centro de carga positiva y el de carga negativa mediante la ecuación siguiente:

$$\mu = q \times d$$

El agua tiene un momento bipolar de 1.87 Debye⁸, que resulta muy alto para una molécula tan pequeña. La magnitud del momento bipolar del agua, aunada a su bajo peso molecular hace que las interacciones por puente de hidrógeno entre sus moléculas sean muy importantes, de manera que pueden explicar la magnitud de las propiedades térmicas y mecánicas del agua, así como los valores de constante dieléctrica, conductividad, movilidad iónica, etc.

Constante Dieléctrica. La constante dieléctrica (ϵ) de una sustancia, es una medida de la resistencia que opone la sustancia a la interacción entre cargas eléctricas. Se define como el cociente de la capacitancia de la sustancia (C), entre la capacitancia del vacío (C_0)⁹.

$$\epsilon = \frac{C}{C_0}$$

La constante dieléctrica se aplica en la ecuación de Coulomb para el cálculo de la fuerza (F) con que interactúan dos cargas (q_1 y q_2), separadas por una distancia (r).

$$F = \frac{q_1 \times q_2}{\epsilon \times r^2}$$

Resulta evidente que mientras mayor sea la constante dieléctrica del medio en que se encuentran las cargas, menor será la fuerza con que interactúen. Como es un cociente, la constante dieléctrica es un número adimensional. El agua tiene una constante dieléctrica de 78.54 a 298.15 K, muy grande para una molécula tan pequeña, que le permite mantener en solución todo tipo de iones, haciendo posibles fenómenos como la conducción nerviosa y la contracción muscular.

Conductividad Eléctrica. La conductividad eléctrica es la facilidad con que una sustancia permite el paso de la corriente eléctrica. En general depende de la facilidad con que se mueven los electrones o las cargas que contenga la sustancia. Se mide como la inversa de la resistencia eléctrica. El agua pura es un mal conductor de la electricidad ya que casi no tiene cargas y sus electrones están ocupados en enlaces covalentes y puentes de hidrógeno. El valor de la conductividad en el agua pura es de $4 \times 10^{-8} \Omega^{-1}$ a 291.15 K. La conducción de la corriente es sólo posible cuando el agua contiene iones en solución.

Movilidad Iónica. Es la velocidad con que se mueven los iones en un medio, cuando se aplica una diferencia de potencial. En el agua, los iones se mueven a velocidad considerable, en especial H^+ y OH^- , esta movilidad permite el desplazamiento de los iones y su papel en los fenómenos de excitabilidad celular. La alta velocidad de los protones e hidroxilos se debe al “efecto de túnel” favorecido por los puentes de hidrógeno entre moléculas, que permiten el desplazamiento de las cargas sin que se muevan las partículas.

Constante de Disociación. Es la constante de equilibrio de la reacción de disociación de una sustancia. El agua está un poco disociada, la K_D es de 1.81×10^{-16} a 298.15 K. Esta propiedad constituye la base de la escala de pH^{10} , a través de su transformación en la constante del *producto iónico* del agua (K_w).

$$K_w = K_D[H_2O] = [OH^-][H^+] = 1 \times 10^{-14}$$

El agua pura contiene cantidades iguales de iones H^+ y OH^- y se dice que es neutra porque no da reacción ácida o básica, en este caso la concentración de ambos iones es de 1×10^{-7} M, por lo que el valor de pH en la neutralidad es 7 a 25 °C. A 37 °C, el agua está más disociada y el pH neutro es de 6.8.

El Agua como Solvente

El agua se considera como el **solvente universal** porque puede interactuar con todo tipo de sustancias, pero en diferentes formas:

- Capas de solvatación. Para sustancias iónicas.
- Puentes de hidrógeno. Con moléculas polares sin carga.
- Clatratos. Con moléculas no polares.
- Micelas y Bicapas. Formadas por las moléculas anfipáticas en agua.

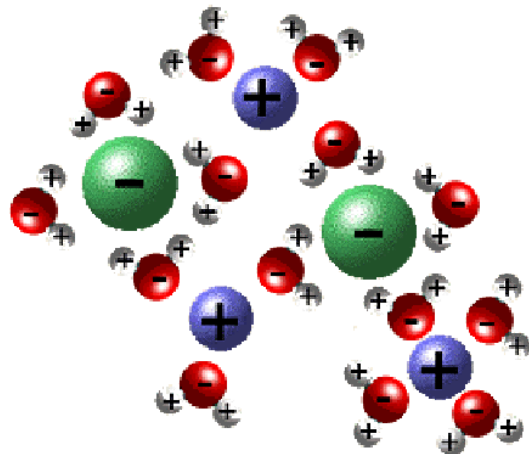


Figura 10. Capas de hidratación de iones.

Compuestos con Carga. Todos los metales se disuelven en forma de iones, la disociación de ácidos, bases y sales también produce iones que se disuelven en agua. Para poder disolver los iones, el agua debe solvatarlos orientando los polos de sus moléculas alrededor de los iones según su carga; el Oxígeno de la molécula se orientará hacia los iones positivos mientras que los Hidrógenos lo

harán hacia los iones negativos (**Figura 10**). Las capas de hidratación son mayores para los iones pequeños y para los polivalentes. Las moléculas de agua de hidratación pueden acompañar a los iones incluso en los cristales sólidos.

Los aminoácidos y muchos intermediarios metabólicos tienen cargas, lo mismo que todos los derivados del ácido fosfórico, de gran importancia en Bioquímica, y todos ellos interactúan con el agua formando capas de hidratación.

Compuestos Polares sin Carga. Los compuestos polares sin carga forman enlaces por puentes de hidrógeno con las moléculas de agua. Los glúcidos son los principales solutos polares sin carga de importancia en Bioquímica. Las cadenas laterales de muchos aminoácidos de las proteínas, como Serina, Treonina, Asparagina y Glutamina tienen grupos polares (-OH ó -NH₂) capaces de formar puentes de hidrógeno que son importantes en la estructura tridimensional de las proteínas.

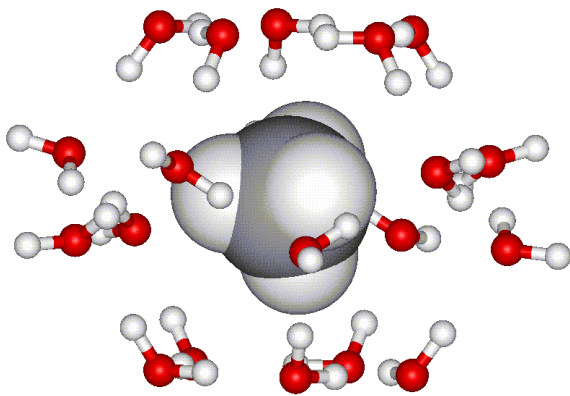


Figura 11. Estructura de un clatrato de Metano

Los clatratos son cavidades formadas por moléculas de agua en las cuales se pueden acomodar moléculas no polares, sin interactuar con el agua. Estas cavidades tienen geometría variable pero con predominio de las formadas con caras pentagonales regulares, como el dodecaedro, con un átomo de Oxígeno en cada vértice.

Compuestos Anfipáticos. Los compuestos que tienen una porción de su molécula hidrófila y otra hidrófoba se denominan anfipáticos. La tendencia de la porción no polar de las moléculas anfipáticas, a alejarse del agua, promueve su agrupación en el interior de las moléculas orgánicas en donde establecen las llamadas “interacciones hidrófobas” o “enlaces hidrófobos”, que determinan las propiedades de muchas moléculas orgánicas individuales y también de complejos macromoleculares.

Los fosfolípidos de las membranas celulares son compuestos anfipáticos, al igual que los jabones (sales de ácidos grasos) Al entrar en contacto con el agua estas moléculas se organizan de modo que su porción polar queda en contacto con el agua y la porción no polar se aleja de ella acumulándose en la superficie; esta organización es responsable de la disminución en la tensión superficial del agua que producen las sustancias anfipáticas (**Figura 12**)

Compuestos No Polares. En contra de la creencia extendida, las moléculas de compuestos no polares sí pueden interactuar con moléculas de agua, pero sus interacciones con ellas son más débiles que las que se forman entre moléculas de agua, de manera que estas interactúan entre sí, y no con las moléculas no polares que por lo tanto, no se pueden disolver. Los lípidos y las proteínas de membrana son insolubles en agua porque no son polares.

Si son pequeñas, las moléculas no polares pueden inducir al agua a organizarse alrededor de ellas en forma de clatratos (**Figura 11**).

Los clatratos son cavidades formadas por moléculas de agua en las cuales se pueden acomodar moléculas no polares, sin interactuar con el agua. Estas cavidades tienen geometría variable pero con predominio de las formadas con caras pentagonales regulares, como el dodecaedro, con un átomo de Oxígeno en cada vértice.

Cuando la cantidad de sustancias anfipáticas es mayor, se presenta la formación de las estructuras llamadas micelas y bicapas, en las cuales las fracciones hidrófobas se agrupan porque no pueden interactuar con el agua; este tipo de estructuras se puede cerrar sobre si misma para formar los liposomas. Las bicapas constituyen la base estructural de las membranas celulares (**Figura 13**). Las proteínas también presentan propiedades anfipáticas y su estructura tridimensional se debe a la necesidad de los restos de aminoácidos no polares como Alanina, Valina, Leucina, Isoleucina, etc. de alejarse del agua, agrupándose en el interior de la proteína.

Los nucleótidos que forman los ácidos nucleicos también son moléculas anfipáticas, la parte polar está constituida por los azúcares fosforilados y la no polar por las bases nitrogenadas. La tendencia de las bases a agruparse sin interactuar con el agua, es un factor importante que estabiliza la estructura de la doble hélice de los ácidos nucleicos.

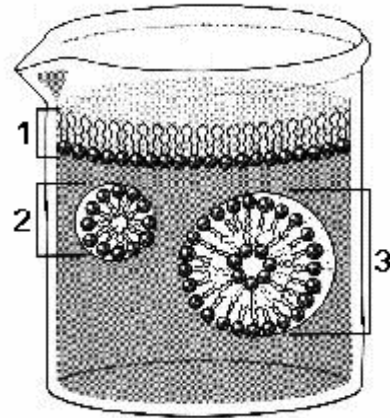


Figura 12. (1) Acumulación de moléculas anfipáticas en la superficie. (2) Micela. (3) Bicapa en forma de liposoma.

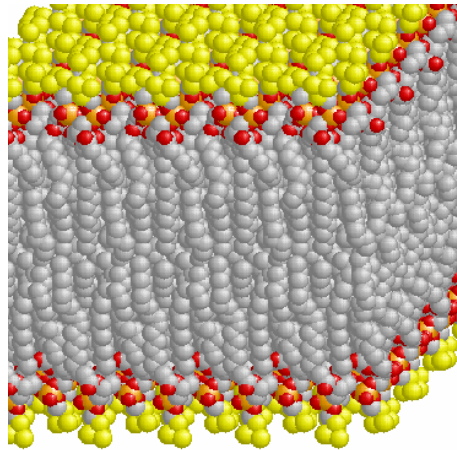


Figura 13. Estructura de bicapa de las membranas biológicas.

Apéndice. Algunos Desordenes del Equilibrio Hídrico¹¹.

Diabetes Insípida. En la diabetes insípida neurógena o nefrógena se incrementa el volumen de orina debido a la alteración el control normal de la ADH sobre la homeostasis del agua. Esta alteración se produce como consecuencia de traumatismos quirúrgicos o accidentales, tumores, infecciones u otros procesos patológicos que impiden la producción, transporte o almacenamiento de ADH. También las lesiones del área receptora del hipotálamo causan menor secreción de ADH. Se ha descrito asimismo un defecto congénito de la liberación, que se transmite en forma autosómica dominante.

La diabetes insípida nefrógena aparece cuando el riñón no es capaz de responder a la ADH circulante. El mecanismo exacto de esta ausencia de sensibilidad no se conoce con certeza. Las anomalías anatómicas e histológicas observadas en estos riñones podrían ser la consecuencia, y no la causa, de la diabetes insípida. Además de la diabetes insípida nefrógena secundaria, también existe una variante que se transmite genéticamente en forma recesiva ligada al cromosoma X.

Los pacientes con diabetes insípida presentan un aumento del volumen urinario y descenso de la osmolalidad de la orina. También suele elevarse la osmolalidad del plasma por aumento del agua libre urinaria. El incremento de la osmolalidad del plasma estimula la sed e induce polidipsia. La mayor ingesta de agua restablece el equilibrio entre ingresos y pérdidas, pero la osmolalidad del plasma se mantiene alta, en un valor próximo al umbral osmótico de estimulación de la sed.

Síndrome de secreción inadecuada de Hormona Antidiurética. Cuando la liberación de ADH aumenta exageradamente, en forma independiente de los estímulos adecuados, se producen trastornos clínicos relacionados con el síndrome de secreción inadecuada de ADH. La elevación crónica de esta hormona en el plasma lleva a la formación de una orina excesivamente concentrada y, como consecuencia, un paso excesivo de agua libre hacia la circulación. Los pacientes con este trastorno suelen presentar **hiponatremia**. La retención inadecuada de agua puede ser difícil de diagnosticar sólo por el volumen extracelular de líquido, porque casi toda el agua reabsorbida pasa al compartimiento intracelular. Aunque la concentración urinaria de Sodio de estas personas suele ser alta, si se las somete a una restricción dietética, pueden conservar el Sodio reduciendo su concentración urinaria.

Edema. El edema es la acumulación excesiva de líquidos en los espacios tisulares. La presencia de un exceso de líquido en el espacio intersticial retarda el intercambio de nutrientes y desechos entre las células y el plasma. Cuando la filtración de líquido de la circulación excede al drenaje, aparece el edema. Puede ser consecuencia de cualquier influencia que aumente en forma suficiente la presión capilar, o disminuya la concentración de proteínas en el plasma, o bien incrementé la permeabilidad capilar. Cuando estos cambios son exagerados, la acumulación de líquidos en el compartimiento extravascular sobrepasa la capacidad de remoción por el drenaje linfático, y este compartimiento se torna tumefacto y congestivo. Todos los procesos causantes de edema pueden explicarse por un desplazamiento incorrecto de los factores de la ecuación de Starling.

Existen dos tipos del edema: localizado y generalizado. El **edema localizado** se debe a cambios en las fuerzas que regulan el movimiento de líquido entre el capilar y el espacio intersticial. En general, es autolimitado porque el aumento de la presión hidráulica intersticial termina por impedir el paso de líquido hacia la zona edematosa. Puede producirse edema localizado persistente cuando el

sistema linfático falla; ello ocurre si disminuye el flujo de linfa a través de los ganglios linfáticos regionales por causas patológicas o si estos son extirpados quirúrgicamente para evitar la diseminación de células cancerosas.

Aunque la elevación de la presión capilar o el descenso de la presión oncótica del plasma facilitan la filtración y puede llevar, eventualmente, al edema, los edemas más rápidos e intensos resultan de incrementos en la permeabilidad capilar o de bloqueos linfáticos. Cuando aumenta la permeabilidad capilar, las proteínas plasmáticas pueden atravesar la pared capilar, provocando la reducción de la presión oncótica del plasma y el aumento simultáneo de la presión oncótica tisular, favoreciendo la acumulación de líquido en los espacios extravasculares.

Existen varios factores que pueden elevar la permeabilidad capilar. Los aumentos acentuados en la presión y el volumen capilar por grandes trasfusiones, dosis altas de drogas vasodepresoras, inflamación bacteriana avanzada o formación de productos metabólicos tóxicos, estiran la pared capilar y ensanchan las aberturas intracelulares e intercelulares. Además, los metabolitos tóxicos, las sustancias como la Histamina y las toxinas bacterianas parecen actuar directamente sobre la pared capilar para aumentar su permeabilidad. En todos estos casos, se observa un incremento del flujo linfático. Sin embargo, la capacidad de drenaje del sistema linfático es limitada, y se presentará edema cuando la filtración capilar supere al drenaje linfático. La forma más exagerada de edema localizado, la elefantiasis de las piernas y el escroto, es causada por el bloqueo de los vasos linfáticos que producen las filarias.

El **edema generalizado** tiene múltiples causas. Entre las más frecuentes se encuentran la insuficiencia renal, hepática o cardíaca. En los ancianos, la insuficiencia cardíaca congestiva es una causa de retención de líquido en el organismo y puede dar lugar a edema, que aparece sobre todo en las zonas declives del cuerpo.

Edema Cardíaco. Surge como consecuencia de la falla de un ventrículo para expulsar una cantidad normal de sangre (insuficiencia cardíaca) y habrá acumulación de sangre en los vasos que vacían en la aurícula que antecede al ventrículo. Por ejemplo, la insuficiencia ventricular derecha conduce al aumento del volumen sanguíneo en las venas sistémicas, la presión venosa se eleva y se opone al regreso osmótico de agua hacia el extremo venoso de los capilares produciendo un *edema generalizado o periférico*, evidenciado por la hinchazón de los tobillos y las piernas y acumulación de líquido en el abdomen (ascitis). Por otro lado, la insuficiencia ventricular izquierda eleva el volumen sanguíneo pulmonar, produciendo *edema pulmonar*.

Edema Cirrótico. El edema de la cirrosis se localiza en la cavidad abdominal (ascitis). La degeneración de las células parenquimatosas del Hígado perturba la circulación intrahepática, especialmente a nivel del sistema venoso de la porta, de baja presión. Se produce así una hipertensión portal, que favorece la trasudación y acumulación de líquido, procedente de los capilares hepáticos e intestinales, en la cavidad abdominal. Sin embargo, la hipertensión portal no es la única causa de este tipo de edema. La insuficiencia hepática provoca una hipoalbuminemia y facilita así, al disminuir el gradiente de concentración, la filtración de líquido desde los capilares. La concentración urinaria de ADH, que está aumentada en los cirróticos, refleja un incremento en la actividad anti-diurética; esto parece deberse a una inactivación defectuosa de la hormona por el Hígado. De acuerdo con ciertas evidencias, el cuadro también se acompañaría de una hipersecreción de Aldosterona, que favorecería la retención de agua y sales. Los procesos obstructivos a nivel del Hígado

originan un cuadro similar; esto se observa, por ejemplo, en la esclerosis de los vasos hepáticos por tumores o aneurismas y en la fase ictérica aguda de la hepatitis infecciosa.

Edema renal. Las principales causas del edema renal son: (1) disminución de la presión oncótica del plasma debido a una pérdida renal de albúmina; (2) aumento en la permeabilidad de los capilares sistémicos, que determina un escape de proteínas hacia el espacio intersticial; (3) insuficiencia cardíaca congestiva, de tipo hipertensivo, cuando se asocia a una nefritis crónica, y (4) retención de Na^+ . En la nefrosis crónica, en la fase nefrótica de la glomerulonefritis y en la amiloidosis renal, la cantidad de proteínas excretadas en la orina (por lesión glomerular) puede alcanzar a, 10-20 gramos diarios. La concentración plasmática de albúmina, que normalmente es de 5%, puede reducirse al 2% y provocar una acentuada disminución en la presión oncótica. El líquido de este edema tiene un bajo contenido en proteínas, de alrededor de 0.1%. La glomerulonefritis aguda se acompaña de un daño capilar difuso, que abarca todas las regiones del organismo; en este caso, la concentración de proteínas en el líquido de edema puede ser elevada (más de 1%) El edema resulta de la combinación de dos factores: (1) disminución de la presión oncótica del plasma, y (2) aumento en la presión oncótica del líquido intersticial. Las glomerulonefritis y pielonefritis crónicas, al igual que el riñón poliúístico, se acompañan de una cardiopatía hipertensiva. Con el tiempo, la descompensación cardíaca (insuficiencia cardíaca congestiva) agrega una serie de factores al cuadro, que incluyen un aumento en la presión venosa y una retención de Na^+ .

Edema nutricional. Se produce por trastornos metabólicos o por deficiencias en la nutrición. Aunque también la insuficiencia vitamínica puede contribuir al cuadro, por ejemplo, insuficiencia de vitamina B_1 en el beriberi y de vitamina C en el escorbuto, el factor más importante parece ser la deficiencia de proteínas en la dieta. La ingestión inadecuada de proteínas provoca un estado de hipoalbuminemia y disminuye la presión oncótica del plasma, por lo cual el líquido se desplaza desde los capilares hacia el compartimiento intersticial. El movimiento de líquido también puede estar facilitado por el desgaste de los tejidos o por aumentos en la permeabilidad capilar, que resultan de la deficiencia vitamínica. De acuerdo con algunos autores, la reducción general en la actividad cardiovascular perturba la función renal y produce una retención secundaria de Na^+ como factor contribuyente final.

El tratamiento clínico de este proceso combina los estimulantes cardíacos y los medicamentos diuréticos. Por desgracia, las insuficiencias renal y hepática son más difíciles de tratar y a veces exigen medidas extremas.

Deshidratación. Cuando la cantidad de agua eliminada supera a la ingerida, el compartimiento intersticial deja salir líquidos hasta un cierto límite, y después comienza la deshidratación de las células. En el individuo normal, la pérdida de agua puede resultar de dos mecanismos generales: (1) transpiración exagerada, y (2) privación prolongada de agua.

Durante las fases iniciales de un balance hídrico negativo, la piel y el músculo son los primeros tejidos que pierden líquido, protegiendo así a los órganos vitales. Cuando el líquido intersticial se ha reducido al mínimo, el organismo comienza a extraer agua del plasma, por lo cual la sangre se concentra (hemoconcentración o anhidremia). Las pérdidas y/o privaciones prolongadas de agua también se acompañan de una pérdida del agua intracelular.

Los signos característicos de la deshidratación temprana son: aspecto demacrado a la cara y el cuerpo; la piel pierde su elasticidad normal y se hace rígida y de consistencia correosa; el peso corporal disminuye rápidamente. Cuando la pérdida de agua es tal que el agua disponible no es suficiente para eliminar el calor metabólico, se producen grandes aumentos en la temperatura corporal. Si continúa el deterioro de las condiciones, se provoca una insuficiencia circulatoria, con un cuadro de anuria y retención de productos ácidos, que conduce a la acidosis. Las alteraciones cerebrales se manifiestan por excitación, delirio y coma, y constituyen la fase terminal del proceso.

La deshidratación clínica puede deberse a: (1) fallas en la absorción a nivel del tubo digestivo, como ocurre en la estenosis pilórica o en las obstrucciones intestinales altas; (2) pérdidas excesivas por sudación profusa, vómitos prolongados, diarreas y diuresis exageradas, y (3) escape de líquidos por heridas y quemaduras.

Junto con el agua eliminada en estas condiciones también se pierden electrolitos, principalmente NaCl. Si se intenta compensar la pérdida de líquidos administrando agua pura, el compartimiento extracelular se hace hipotónico, provocando el desplazamiento de agua hacia el interior de las células hiperosmóticas, con lo que se producen síntomas de intoxicación hídrica, entre ellos los calambres de calor. Por tal motivo, el tratamiento debe incluir la administración de electrolitos principalmente (NaCl).

Dependiendo de la causa, la deshidratación puede ser Isotónica, cuando es provocada por la pérdida de líquidos isotónicos debido a vómito, diarrea y enfermedades que los producen, pérdida de sangre, plasma, etc.; Hipertónica, si se debe a un aporte insuficiente de agua, pérdida de agua a través de la piel (sudor), pulmones (neumonía y otras enfermedades respiratorias) e intestino (retención intestinal de agua), diabetes insípida y mellitas; o Hipotónica si la causa es un aporte insuficiente de sodio, pérdida de sodio (insuficiencia renal, deficiencia de Aldosterona).

Sobrecarga de agua. La sobre hidratación celular también puede producirse por infusión forzada de líquidos hipotónicos, administrados con el fin de provocar diuresis, cuando la función renal está perturbada. A su vez, las diuresis intensas y prolongadas pueden provocar la pérdida exagerada de solutos extracelulares, con desplazamiento de agua desde el líquido extracelular hipotónico al interior de las células. Los síntomas de intoxicación hídrica se relacionan especialmente con el sistema nervioso central: salivación, náuseas y vómitos, inquietud, astenia, temblores, ataxia y convulsiones tónicas y clónicas que pueden llevar al coma y a la muerte.

NOTAS

¹ Considerando que la densidad del agua es casi 1 g/mL, esta masa equivale a un volumen entre 38.5 y 42 litros.

² Para evitar el efecto de la variación en el contenido de grasa, es frecuente que la cantidad de agua se exprese como porcentaje de la masa corporal magra (sin grasa), en tal caso el agua representa alrededor del 70% del peso corporal.

³ Los enlaces covalentes se forman cuando dos átomos comparten un par de electrones en zonas de probabilidad electrónica denominados “orbitales moleculares”. Si los electrones se comparten de manera uniforme los enlaces son *no polares* pero si no lo es, entonces se forman enlaces covalentes *polares*.

⁴ Se denomina configuración electrónica de un átomo a la descripción detallada de la distribución de los electrones de un átomo en zonas de probabilidad denominadas "orbitales atómicos". El número y tipo de orbitales atómicos está determinado por las constantes conocidas como "números cuánticos". Cuando un átomo se encuentra en el estado basal, de mínima energía, los orbitales atómicos son "puros". Los orbitales atómicos "híbridos" se forman por la combinación de dos o más tipos de orbitales atómicos puros y las configuraciones electrónicas que resultan, dan a los átomos capacidad para formar enlaces con geometría diversa. La configuración electrónica sp_3 corresponde a una geometría de forma tetraédrica con ángulos entre los orbitales atómicos de 109.5° .

Dado que el Oxígeno tiene 6 electrones de valencia, su configuración electrónica sp_3 es:



en la cual dos de los orbitales híbridos pueden aceptar electrones de los átomos de Hidrógeno.

⁵ Los átomos fuertemente electronegativos, como Nitrógeno, Oxígeno o Flúor, cuando forman enlaces con Hidrógeno, adquieren mayor densidad electrónica que este y una carga parcial negativa ($\delta(-)$), dejando al Hidrógeno con carga parcial positiva ($\delta(+)$). Entonces, cuando uno de estos átomos se aproxima a un Hidrógeno unido a otro de ellos, se forma una atracción entre las cargas contrarias que recibe el nombre de interacción o enlace por puente de hidrógeno. Estos enlaces son muy importantes en la estructura del agua, moléculas orgánicas y complejos supramoleculares.

⁶ Los clatratos son complejos de moléculas de agua unidas por puentes de hidrógeno que se caracterizan por formar "huecos" con caras pentagonales en las que cada vértice es ocupado por el átomo de Oxígeno de una molécula de agua, asociada a otras dos por puentes de Hidrógeno. En el interior de los clatratos no hay interacción de las moléculas de agua.

⁷ En forma estricta, la densidad se define usando cm^3 , pero en unidades SI, $1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ mL}$.

⁸ El Debye es la unidad de medida del momento dipolar, llamada así en honor de *Peter Wilhem Debye*, pionero del campo. Un Debye (D) es igual a $3.338 \times 10^{-30} \text{ C m}$.

⁹ Un condensador es un dispositivo que se usa para almacenar carga eléctrica. Está formado por dos placas metálicas separadas por una sustancia no conductora. La capacitancia de un condensador es la cantidad de carga que puede contener el condensador por cada unidad de la diferencia de potencial que existe entre las placas del condensador. La capacitancia depende de la sustancia no conductora que separa las placas metálicas.

¹⁰ El pH es una transformación logarítmica de la concentración molar de protones:

$$pH = \log \left(\frac{1}{[H^+]} \right) = -\log [H^+]$$

Fue propuesta por *Sören P. L. Sörensen* en 1909, para convertir los valores pequeños de concentración de protones, en números más fáciles de manejar; su empleo fue ampliamente aceptado. Los pH ácidos tienen valores de pH menores que 7 y los valores de pH mayores de 7 son alcalinos. En la actualidad esta transformación se emplea para expresar todo tipo de cantidades pequeñas y no sólo la concentración de protones.

¹¹ Modificado de: Janssen, H. F. Capítulo 10 del libro: *Conocimientos actuales sobre nutrición*. 6ª Edición (1991). Publicado por la Organización Panamericana de la Salud. Págs. 104-112.