



INTRODUCCIÓN

El **agua** representa el componente más abundante en el cuerpo, constituyendo en el hombre aproximadamente el **60% de su peso corporal**. La cantidad de agua total se denomina **agua corporal total**: ACT.

El agua corporal total depende del peso de la persona, la edad, el sexo y la cantidad de tejido adiposo. En el recién nacido, el agua representa el 75% de su peso, pero existe una tendencia a la reducción de este porcentaje con la edad, particularmente durante los 10 primeros años de la vida. Con respecto al sexo, a igual peso corporal, existe una **menor proporción de agua en las mujeres** que en los hombres, lo que probablemente esté en relación con la mayor cantidad de grasa subcutánea en la mujer.

Dado que el **tejido adiposo** es el de más bajo contenido en agua, el volumen total de ésta varía inversamente al grado de obesidad de los sujetos. De hecho, en los sujetos obesos el porcentaje de agua puede llegar a ser de tan sólo un 45% de su peso.

El agua corporal total se distribuye en dos grandes compartimientos de líquidos corporales: el **líquido extracelular**: LEC, también llamado **medio interno**, que se encuentra en el exterior de las células, y el **líquido intracelular**: LIC, que se encuentra en el interior celular. Ambos compartimientos están separados entre sí por las **membranas plasmáticas**.

Los fisiólogos emplean el término **homeostasis** para referirse al mantenimiento de condiciones constantes en el medio interno. Esencialmente todos los órganos y tejidos del organismo realizan funciones que colaboran en el mantenimiento de estas condiciones.

INGESTIÓN Y PÉRDIDA DE LÍQUIDOS

El agua ingresa al cuerpo a través de dos fuentes principales:

- **Se ingiere** en forma de líquidos o agua de los alimentos, que juntos suman alrededor de 2100 ml/día.
- **Se sintetiza** en el cuerpo como resultado de la oxidación de diferentes compuestos, en una cantidad de 200 ml/día.

INGRESOS		EGRESOS	
Aguas y Bebidas	1500 ml	Orina	1500 ml
Agua de alimentos	600 ml	Heces	100 ml
Agua metabólica	200 ml	Respiración	350 ml
		Piel (no sudor)	350 ml
TOTAL 2300 ml		TOTAL 2300 ml	

Ambas fuentes, proporcionan un ingreso total de agua de 2300 ml/día. Pero la ingestión de agua varía dependiendo de la persona y de las condiciones a las que se enfrente.

Con respecto a la pérdida diaria de agua, se pierde constantemente por evaporación en las vías respiratorias y difusión a través de la piel. Ambos fenómenos suman una pérdida de alrededor de 700 ml/día. A este tipo de pérdida se la denomina **pérdida insensible de agua**.





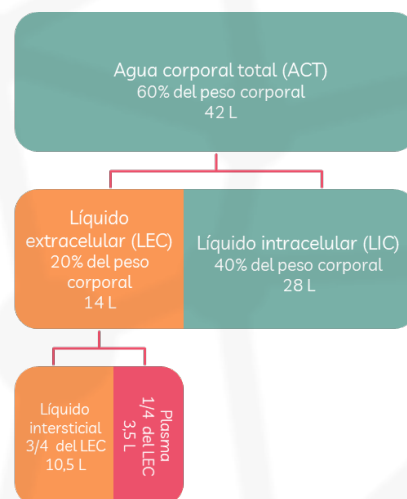
La pérdida media de agua por difusión a través de la piel es de unos 300-400 ml/día. Dicha pérdida es minimizada por la presencia de colesterol en la capa córnea de éste órgano. Así mismo, la pérdida insensible de agua a través de las vías respiratorias es de 300-400 ml/día. A medida que el aire entra en las vías respiratorias se satura de humedad, hasta una presión de agua de unos 47 mmHg, hasta que se espira. Como la presión de aire inspirado suele ser menor a 47 mmHg, el agua se pierde continuamente a través de los pulmones con la respiración.

El sudor es otra vía de pérdida de agua, siendo de unos 100 ml/día. Sin embargo, en un clima muy cálido o durante el ejercicio intenso, la pérdida de agua puede aumentar hasta 1000-2000 ml/día. Asimismo, en las heces se pierde una pequeña cantidad de agua (100 ml/día). Dicha pérdida puede verse aumentada en situaciones de diarrea intensa.

Teniendo en cuenta las **vías de egreso de agua** hasta el momento podemos contabilizar una pérdida de agua de alrededor de 900 ml/día. Como el ingreso total de agua es de aproximadamente 2300 ml/día, tendríamos una diferencia de 1600 ml/día. Este resto es eliminado en la orina por los riñones. Dependiendo la situación, el volumen de orina puede ser de 500 ml/día en una persona deshidratada o de 20000 ml/día en una persona que ha bebido grandes cantidades de agua.

COMPARTIMIENTOS ACUOSOS DEL ORGANISMO

- **Líquido extracelular (LEC) o medio interno:** Es el líquido que se halla por fuera de las células. Representa aproximadamente el **20% del peso corporal**, considerando a una persona adulta de 70 kg, y se caracteriza por hallarse en movimiento constante por todo el cuerpo. A su vez, podemos dividir al LEC en **líquido intersticial** y **líquido intravascular** o plasma, que se hallan separados por la pared capilar. El líquido intersticial rodea a las células de los distintos tejidos del cuerpo y representa $\frac{3}{4}$ partes del volumen del LEC. El plasma es el líquido extracelular existente en los vasos sanguíneos, la porción líquida de la sangre, y representa $\frac{1}{4}$ del volumen total del LEC.
- **Líquido intracelular (LIC):** El fluido intracelular es aquel que se halla dentro de las células y constituye el 40% del peso corporal.



COMPOSICIÓN DEL LEC Y DEL LIC

En la tabla se resume la **composición del LEC y del LIC** para una serie de iones y moléculas. La composición del LIC se mantiene gracias a la acción de varias proteínas de transporte específicas de la membrana, entre las que destaca la ATPasa $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ (bomba Na-K).

A pesar de las diferencias de concentración de los solutos individuales, la **osmolaridad total es igual en el LIC y en el LEC**, siendo de alrededor de 290 mOsm/L. Esto se consigue gracias a que el agua fluye libremente a través de las membranas celulares.

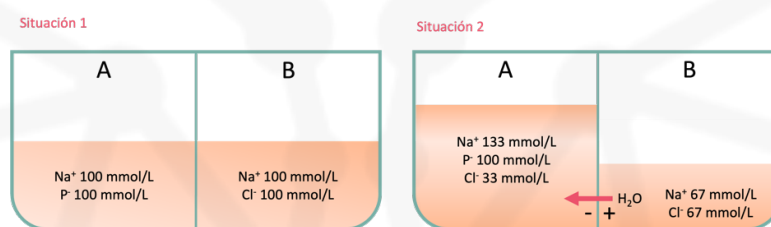
Las diferencias en la concentración de solutos a través de las membranas celulares se crean y se mantienen mediante mecanismos de transporte con gasto de energía. Entre estos mecanismos se encuentra la **bomba Na-K** , la cual transporta 3 Na^+ desde el LIC al LEC y, simultáneamente, transporta 2 K^+ del LEC al LIC. Tanto el ion sodio como el ion potasio se transportan en contra de su gradiente electroquímico, por lo tanto, se necesita de la energía aportada por la hidrólisis del ATP para que se pueda llevar a cabo el transporte.





	LEC	LIC
Na ⁺ (mEq/l)	140	14
K ⁺ (mEq/l)	4	120
Ca ²⁺ (mEq/l)	2,5	1x10 ⁻⁴
Cl ⁻ (mEq/l)	105	10
HCO ₃ ⁻ (mEq/l)	24	7,1
Osmolaridad (mOsm/l)	290	290
pH	7,4	7,1

La composición del compartimiento plasmático y del líquido intersticial dentro del LEC es similar, dado que sólo se separan por el endotelio capilar, una barrera que resulta permeable a los iones y a las moléculas pequeñas. La principal diferencia entre el líquido intersticial y el plasma es que en este último existen muchas más proteínas. Las proteínas plasmáticas están **cargadas negativamente**, lo cual hace que las mismas atraigan a los cationes y repelan a los aniones generando una distribución despareja de los mismos. Este efecto se denomina **equilibrio Gibbs-Donnan**. La siguiente imagen muestra este fenómeno:



La presencia de un **ion no difusible**, a un lado de una membrana, determina una redistribución iónica cuyo resultado final será el **equilibrio Gibbs-Donnan** (situación 2), donde el potencial químico es igual, pero de sentido opuesto, al potencial eléctrico. En los dos compartimientos hay igual número de cargas positivas y negativas, pero el compartimiento que contiene el ion no difusible (A) tiene, con respecto al otro compartimiento, un mayor número de partículas. De no existir algún otro mecanismo que compense esta diferencia de osmolaridad, deberá aparecer un flujo de agua desde el compartimiento que NO contiene al ion no difusible hacia el lado que contiene el ion no difusible. Este flujo de agua haría que este compartimiento aumentara de volumen.

Dada su abundancia en el LEC, el Na⁺ y sus aniones acompañantes, sobre todo Cl⁻ y HCO₃⁻, son los principales determinantes de la osmolaridad de este compartimiento. En ausencia de insuficiencia renal o de hiperglucemia, la osmolaridad del líquido extracelular puede estimarse como el doble de la concentración plasmática de sodio.

Para mejorar esa aproximación, en las situaciones clínicas donde el paciente tiene alteraciones en el metabolismo de la urea y de la glucosa, la forma más precisa de estimar la osmolaridad del plasma y, por lo tanto, la del LEC y la del LIC, es considerar el aporte que hacen la glucosa y la urea a la osmolaridad. Según esto, será posible calcular la **osmolaridad plasmática** como:

$$\text{Osm}_{\text{pl}} = 2([\text{Na}^+]_{\text{pl}}) + \frac{[\text{glucosa}]}{18} + \frac{[\text{urea}]}{2,8}$$





La concentración de sodio se expresa en mEq/L y la concentración de glucosa y de urea se expresan en mg/dl. Al dividir por 18 la concentración de glucosa y por 2,8 la de urea se pueden convertir los mg/dl en mmoles/L (milimoles/litro), lo cual hace que la unidad de la osmolaridad plasmática sea mOsm/L (miliosmoles/litro).

MOVIMIENTO DE AGUA

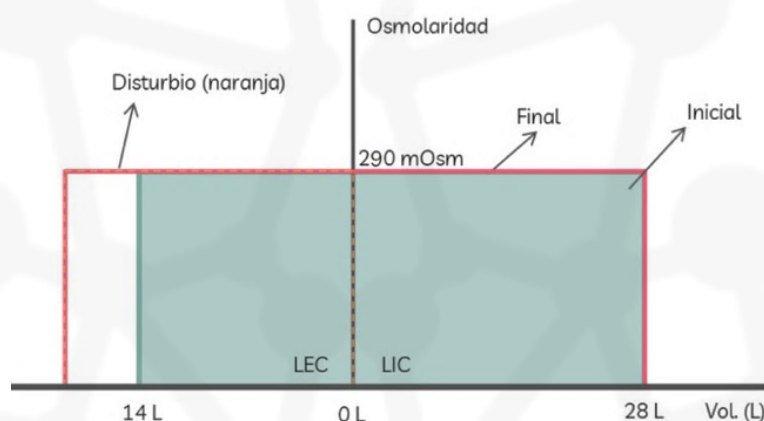
Las **diferencias de presión osmótica** entre el LEC y el LIC son responsables del desplazamiento del líquido entre estos compartimientos. Dado que la membrana plasmática de las células contiene aquoporinas, el agua puede atravesarla con facilidad. Por tanto, un cambio en la osmolaridad del LEC o del LIC determina un rápido movimiento de agua entre estos compartimientos (en minutos). Salvo algunos cambios transitorios, los compartimientos de LIC y LEC se encuentran en **equilibrio osmótico**.

A diferencia de lo que sucede con el agua, el desplazamiento de iones entre las membranas celulares es más variable de una célula a otra y depende de la presencia de proteínas transportadoras específicas en dichas membranas. En consecuencia, como primera aproximación se puede analizar el intercambio de líquido entre el LEC y el LIC asumiendo que no se producen desplazamientos apreciables de iones entre ambos compartimientos.

Para entender esta aproximación utilizaremos los diagramas de **Darrow-Yannet** y plantearemos lo que sucede en el LEC y en el LIC cuando se añaden soluciones que contienen cantidades variables de NaCl al LEC.

HIDRATACIÓN ISOTÓNICA: adición al LEC de NaCl isotónico.

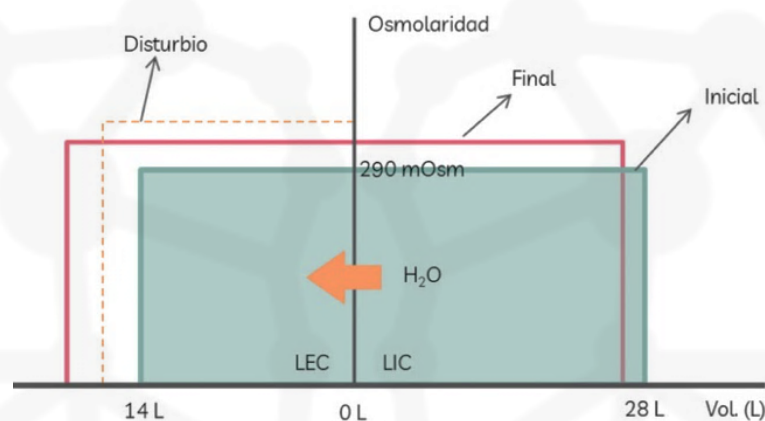
La adición al LEC de una **solución de NaCl isotónica** (NaCl al 0,9%) **aumenta el volumen** de este compartimiento en la misma magnitud que el volumen administrado. Como este líquido tiene la misma osmolaridad del LEC y del LIC, no se produce ninguna fuerza que estimule el desplazamiento de líquido entre los compartimientos, de forma que el volumen del LIC no sufrirá cambios. Aunque el Na^+ puede atravesar la membrana celular, queda limitado dentro del LEC gracias a la actividad de la ATPasa Na^+-K^+ . Por lo tanto, **no se produce un desplazamiento neto de NaCl** infundido hacia el interior de las células.



HIDRATACIÓN HIPERTÓNICA: adición al LEC de NaCl hipertónico.

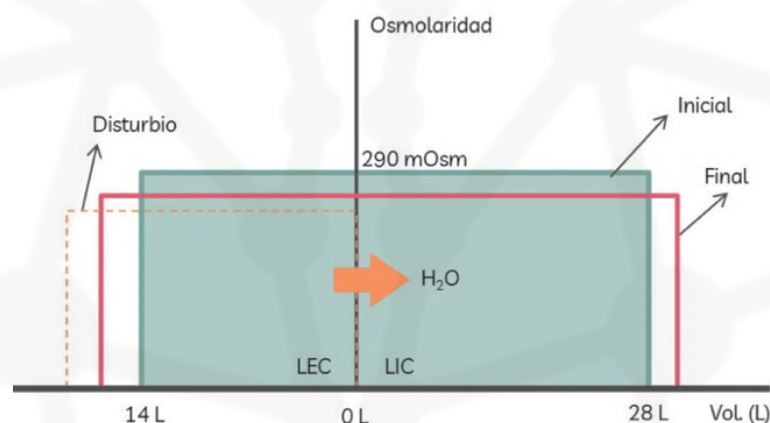
La adición de una **solución de NaCl hipertónica** al LEC (NaCl al 3%) **aumenta la osmolaridad** de este compartimiento y permite que el agua salga de las células. Tras llegar al equilibrio osmótico, la osmolaridad del LEC y del LIC serán iguales, pero mayor que antes de la infusión. El volumen del LEC estará aumentado y el del LIC disminuirá.





HIDRATACIÓN HIPOTÓNICA: adición al LEC de NaCl hipotónico.

La adición de una **solución de NaCl hipotónica** al LEC (NaCl al 0,45%) **reduce la osmolaridad** de este compartimiento líquido y permite el desplazamiento de agua al interior del LIC. Tras lograrse el equilibrio osmótico, la osmolaridad del LIC y del LEC será igual, pero menor que antes de la infusión, y el volumen de cada compartimiento será mayor. El aumento del volumen del LEC será mayor que el del LIC.



MÉTODOS DE MEDIDA DE COMPARTIMENTOS

El volumen de un compartimiento líquido en el cuerpo puede medirse colocando una sustancia indicadora en el compartimiento, permitiendo que se distribuya de manera homogénea en el líquido de ese compartimiento y después analizando la extensión con la que la sustancia se diluye.

Principio de dilución de indicadores

Usando este método se puede medir el volumen de cualquier compartimiento líquido si se tiene una sustancia indicadora. Este método se basa en el **principio de conservación de la masa total**, lo que significa que la masa total de una sustancia tras la distribución en el compartimiento líquido será la misma que la masa total inyectada en el compartimiento.

En la práctica, se inyecta una cantidad conocida de una sustancia marcadora en el compartimiento y se permite una distribución homogénea, luego se mide su concentración en una muestra tomada de ese compartimiento. El volumen de distribución es calculado según la siguiente ecuación:



$$\text{Volumen de distribución (V}_d\text{)} = \frac{\text{Masa inyectada (mg)}}{\text{Concentración (mg/ml)}}$$

Cuando este método se aplica “*in vivo*”, se inyecta el indicador en el plasma y, de esa manera, podemos conocer el volumen de otros compartimientos del organismo.

La sustancia marcadora debe cumplir con los siguientes requisitos:

- No ser tóxica
- Distribuirse homogéneamente en el compartimiento a medir
- No ser metabolizado durante el período de prueba
- No alterar el volumen del compartimiento en estudio

Indicadores utilizados para la medición de los distintos compartimientos

- **Agua corporal total:** se puede medir con antipirina (sustancia liposoluble), óxido de deuterio (agua deuterada, D₂O) o agua tritiada (T₂O). Dada la facilidad de la medición y su rápida velocidad de distribución, se prefiere la antipirina.
- **LEC:** puede calcularse utilizando diversas sustancias que se dispersan en el plasma y en el líquido intersticial, pero no atraviesan la membrana celular. Entre ellas se encuentran dos tipos principales de sustancias: *sacáridos* (inulina, sucrosa, manitol) e *iones* (tiosulfato, tiocianato, cloruro, bromuro y sodio) marcados radiactivamente.
- **Volumen plasmático:** puede ser medido mediante albúmina o globulina plasmática marcadas con colorante (Azul de Evans).
- **LIC:** se puede calcular a partir de los datos obtenidos del ACT y del LEC → LIC = ACT – LEC
- **Líq. intersticial:** se puede calcular a partir de los datos obtenidos del LEC y del volumen plasmático → Líq. Intersticial = LEC – Vol. plasmático

Volemia

La sangre está compuesta por dos fracciones, las células sanguíneas y el plasma. La volemia (VS) es el volumen total de sangre que posee un individuo y está representado por el volumen ocupado por ambas fracciones: VC (volemia celular) y VP (volemia plasmática). Dicha volemia está relacionada con el peso corporal de cada individuo y corresponde aproximadamente al 7% del peso corporal.

Para determinar la volemia de un individuo se puede utilizar el método de dilución de indicadores usando glóbulos rojos marcados radiactivamente, pero solo puede hacerse de manera experimental. En la práctica, se puede utilizar el dato del *hematocrito*: Si se conoce el volumen plasmático (método de dilución de indicadores) y el hematocrito (Hto = % de GR con respecto al volumen total de sangre), se usa la siguiente fórmula:

$$VS = \frac{VP \cdot 100}{100 - Hto}$$





ANEXO

En el siguiente cuadro se resumen los cambios en la osmolaridad y el volumen del LEC y del LIC en las diferentes alteraciones hidroelectrolíticas. SC: sin cambios SM: sin movimiento

Cuadro		Causa	Efecto sobre LEC y LIC				
			LEC		Movimiento de agua	LIC	
			Vol.	Osm		Vol.	Osm
Deshidratación isotónica	Pérdida proporcionada de agua y sodio	Diarrea, quemadura	↓	SC	SM	SC	SC
Deshidratación hipertónica	Pérdida predominantement e acuosa	Ingesta insuficiente de agua, pérdida de líquidos hipotónicos por la piel (sudoración) o los riñones (diabetes insípida).	↓	↑	←	↓	↑
Deshidratación hipotónica	Pérdida predominantement e salina	Pérdida de sales por el riñón debido a insuficiencia renal.	↓	↓	→	↑	↓
Hidratación isotónica	Aumento de agua y sodio proporcionales	Infusión i.v. de solución fisiológica	↑	SC	SM	SC	SC
Hidratación hipotónica	Ganancia predominante de agua	Ingesta excesiva de agua, SIADH (síndrome de secreción inadecuada de hormona antidiurética).	↑	↓	→	↑	↓
Hidratación hipertónica	Ganancia predominante de sodio	Ingesta elevada de NaCl	↑	↑	←	↓	↑

SC: sin cambios SM: sin movimiento

Bibliografía de referencia

- Berne RM, Levy MN, Koeppen BM, Stanton BA. Fisiología. 6.ª ed. Barcelona: Elsevier; 2009.
- Raff H, Levitzky M. Fisiología médica: un enfoque por aparatos y sistemas. 1.ª ed. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores; 2013.
- Silverthorn DU. Fisiología humana: un enfoque integrado. 8.ª ed. Madrid: Editorial Médica Panamericana; 2019.

