

# EL AGUA: UNA SUSTANCIA EXTRAORDINARIA Y SÓLO UNA SIMPLE MOLÉCULA

Palabras clave: agua, molécula, propiedades del agua, calidad del agua, sistemas naturales.  
Key words: water, molecule, water properties, water quality, natural environments.

El agua es esencial para la vida y para el desarrollo de las sociedades. La cultura del agua ha estado presente a lo largo del tiempo en todas y cada una de las antiguas civilizaciones, cuyo desarrollo dependió en gran parte del agua. El agua puesta en atmósfera mantiene el ciclo hidrológico en constante movimiento. Este ciclo es un proceso complejo que incluye la precipitación, el escurrimiento, la evapotranspiración y la infiltración, que describe al agua en la naturaleza. En contraste, la química se desarrolló esencialmente en el laboratorio. Este trabajo apunta esencialmente a describir las propiedades del agua, propiedades que la hacen única y que están regidas por la estructura de las moléculas que la forman: Existe en las tres fases, sólida, líquida y gaseosa dentro de los límites de temperatura y presión naturales en la tierra; posee una gran capacidad calorífica; la propiedad de expandirse cuando se congela; una alta constante dieléctrica y una alta tensión superficial. La escasez de agua dulce es un riesgo muy serio del que ningún país está ajeno. Los recursos de agua son renovables, pero finitos, limitados y frágiles con una demanda creciente. La respuesta adecuada debe ser de orden ético y cultural. Este recurso fundamental es, desde el punto de vista químico, sólo una simple molécula.

■ Miguel A. Blesa<sup>1,2</sup>  
Alicia Fernández Cirelli<sup>3,4\*</sup>

<sup>1</sup>Gerencia Química, Comisión Nacional de Energía Atómica.

<sup>2</sup>Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de San Martín.

<sup>3</sup>Instituto de Investigaciones en Producción Animal (INPA-UBA-CONICET).

<sup>4</sup>Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua, Instituto de la Universidad de Buenos Aires (CETA). Av. Chorroarín 280 (C1427CWO). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

\* [afcirelli@fvvet.uba.ar](mailto:afcirelli@fvvet.uba.ar)

Water is essential for life and social development. The culture of water has been present in each of ancient civilizations, whose existence has been deeply influenced by water resources. The hydrological cycle including precipitation, run-off, evapotranspiration and infiltration describes the natural movement of water. On the other hand, chemistry has flourished in the laboratory. Water properties, based in its molecular structure, make this substance unique: it exists in the three phases (solid, liquid, gas) at normal pressures and temperatures usual in our planet; it possesses a high calorific capacity; the property of expansion on freezing; a high dielectric constant and a high surface tension. Freshwater scarcity is a serious risk which involves every country. Water resources are renewable but finite, limited and fragile with increasing demand. An accurate response should be ethical and moral. This crucial resource is, from a chemical point of view, only a simple molecule.

## ■ INTRODUCCIÓN

El agua cubre más del 70% de la superficie del planeta; se la encuentra en océanos, lagos, ríos; en el aire, en el suelo. Es la fuente y el sustento de la vida, contribuye a regular el clima del mundo y con su fuerza formidable moldea la Tierra. Posee propiedades únicas que la ha-

cen esencial para la vida. Es un material flexible: un solvente extraordinario, un reactivo ideal en muchos procesos metabólicos; tiene una alta capacidad calorífica que se pone en juego en el ciclo hidrológico y en su uso industrial y la notable propiedad de expandirse cuando se congela. Con su movimiento puede moldear el paisaje y afectar el clima.

A las temperaturas y presiones típicas de la superficie de la Tierra, el agua puede encontrarse en los estados sólido, líquido o gaseoso. El agua líquida constituye una alta fracción del inventario total del agua del planeta y esta característica está íntimamente relacionada con el desarrollo de la vida en la Tierra. El agua constituye el medio

ideal en el cual pueden tener lugar las complejas reacciones bioquímicas y todas las teorías del origen de la vida hablan de un “caldo primordial” en el cual se sintetizaron las primeras moléculas biológicas y después las primeras formas de vida. Según Tales de Mileto (624-546 a.C.) considerado como el “padre de la filosofía”, todo nacía del agua que era el elemento básico del que estaban hechas todas las cosas, pues se constituye en vapor, que es aire, nubes y éter; del agua se forman los cuerpos sólidos al condensarse y la Tierra flota en ella. Creía que era la sustancia original del universo de la cual todo había surgido y a la cual todo debía retornar en última instancia. No está tan lejos de la respuesta que da la Docta Simpatía a sus examinadores en *Las Mil y Una Noches*:

*Él volvió a preguntar:*

*-¿Cuál es el origen de la creación?*

*Ella dijo:*

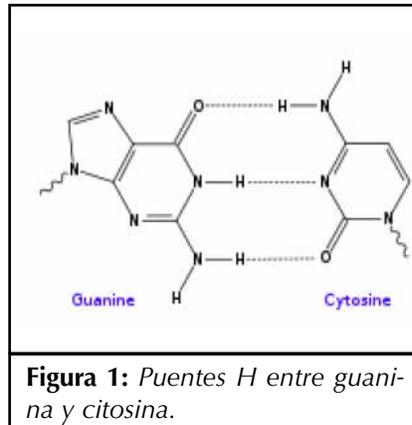
*-Alá hizo a Adán con barro seco, el barro se formó con espuma, la espuma se sacó del mar, el mar de las tinieblas, las tinieblas de la luz, la luz de un monstruo marino, el monstruo marino de un rubí, el rubí de una roca, la roca del agua y el agua se creó con la palabra omnipotente: ¡Sea!*

*Historia de la Docta Simpatía, Las Mil y Una Noches (autor anónimo)*

Si lo miramos desde las Ciencias Químicas vemos, sin embargo, una sustancia muy simple, compuesta de sólo dos elementos: hidrógeno y oxígeno y formada por moléculas con una estructura muy simple: dos átomos de hidrógeno unidos a un átomo de oxígeno, con bajo peso molecular (18).

Por contraste, mirando desde la misma disciplina, cuando pensamos en las moléculas de la vida ¿en qué pensamos? Inmediatamente nos vienen a la mente el ADN, las proteínas, los glicoconjugados...

Ésos son ejemplos de biomoléculas, todas ellas de alto peso molecular y estructuras complejas: primarias, secundarias, terciarias, cuaternarias. ¡Qué paradoja! Porque sin agua la vida, tal como la conocemos, es imposible, a pesar de que no surja como ejemplo de biomolécula en nuestro imaginario químico.

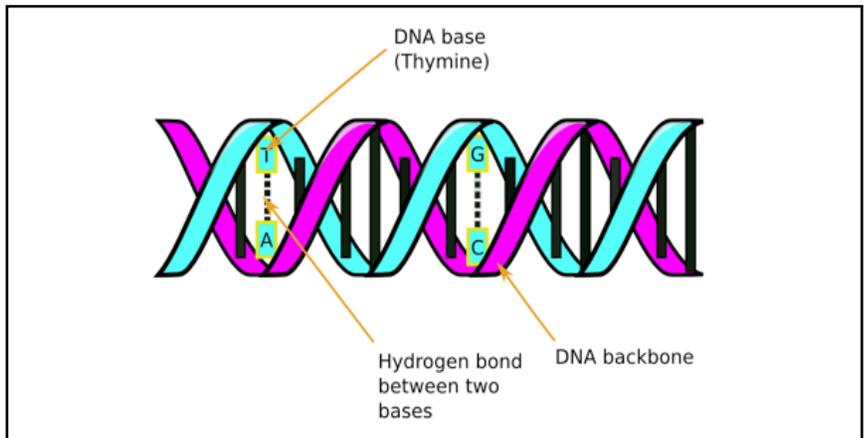


**Figura 1:** Puentes H entre guanina y citosina.

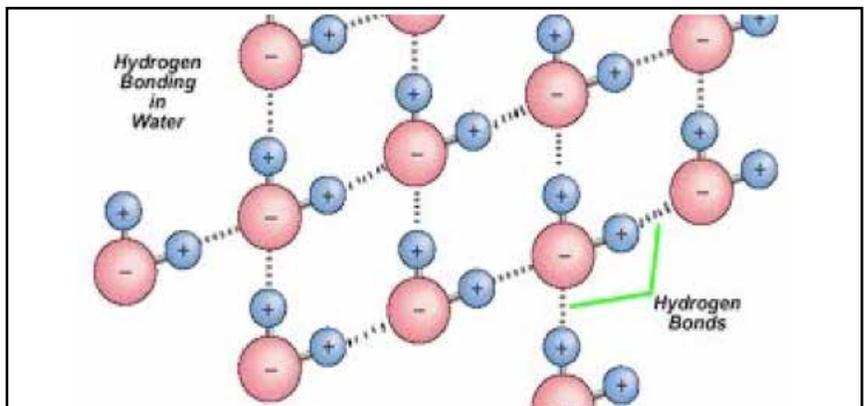
¿Qué mantiene juntas las dos hebras de ADN?: puentes de hidrógeno. La Figura 1 muestra un par de bases de dos hebras de DNA, fuertemente unidas por puentes de hidrógeno. La estructura global se muestra en la Figura 2.

La formación de puentes de hidrógeno es una propiedad muy característica del agua, como se muestra en la Figura 3.

Gran parte de las propiedades que hacen al agua esencial para la vida se relacionan con esta propiedad. La conformación de las proteínas es el hecho estructural ligado a su función y si nos preguntamos cuál es uno de los factores que la estabilizan veremos que son los puentes de hidrógeno.



**Figura 2:** La doble hélice de ADN.



**Figura 3:** Puentes H en el agua.

El agua tiene interesantes y únicas propiedades que explican el papel que juega en la naturaleza y en la vida. Nos podemos formular infinidad de preguntas que nos remiten a las propiedades del agua y al papel de las mismas en nuestro mundo. Por ejemplo: ¿Cuál es el pH del agua? ¿Cuál es el rango de pH compatible con la vida? ¿Por qué la biota acuática puede resistir cambios de temperatura? ¿Por qué algunas sustancias se disuelven fácilmente en agua y otras no? ¿Por qué aquellas que no se disuelven fácilmente son las que se bioacumulan en organismos?

El agua se renueva a través del ciclo hidrológico que es sustentado por la energía solar, está indisolublemente ligada a la vida y al ambiente, todo gracias a sus propiedades que también son la base de sus numerosos y diferentes usos.

Esa sustancia, constituida por moléculas tan simples, ha estado fuertemente ligada al desarrollo de las civilizaciones.

## ■ EL AGUA Y LAS CIVILIZACIONES

Este trabajo apunta esencialmente a describir las propiedades químicas del agua, propiedades que la hacen única y que están regidas por la estructura de las moléculas que la forman. Es, sin embargo, útil recordar brevemente que el agua es, para la humanidad, mucho más que una sustancia química. La cultura del agua ha estado presente a lo largo del tiempo en todas y cada una de las antiguas civilizaciones cuyo desarrollo dependió en parte del agua. Cada una de estas civilizaciones entendió a su manera dicha cultura desarrollando creencias, mitos, arquitecturas y un sinfín de saberes y usos relacionados con el vital líquido.

La cultura egipcia tiene una extensa relación con la cultura del agua. Su forma de vida se desarrollaba en torno al Río Nilo. Los egipcios supieron utilizar muy bien el recurso agua para la producción de alimentos y también como elemento de ocio y relajación. En la Antigua Grecia se consideró el agua como el origen de la vida. Los dioses del agua siempre ocuparon un lugar privilegiado en la vida de los griegos que, a su vez, adquirieron los romanos. Había dioses como Poseidón, dios del mar, y otras deidades: Las Náyades, hijas de Zeus y ninfas de los ríos y arroyos que abandonan las aguas para danzar. Afrodita y Venus: nacidas del mar.

Para el mundo islámico el agua tiene un sentido de purificación tanto de cuerpo como de alma. Dar agua es ser piadoso. Los musulmanes desarrollaron canalizaciones, crearon baños, fuentes y alcázares de enorme belleza.

El agua tiene gran importancia en las religiones. Es un elemento que proporciona vida, lo cual le otorga un grado indiscutiblemente divino. Por ejemplo, es utilizada para el bautismo (nacimiento espiritual al cristianismo).

En nuestro continente, la relación entre la población y el ambiente físico en el noroeste ha variado significativamente a lo largo del tiempo y se evidencia particularmente en el manejo del agua. Los pueblos originarios en sus primeros momentos en los lugares más desérticos se desarrollaron en armonía con el ambiente circundante. La relación de estas culturas con el agua fue muy fuerte, priorizando el uso para las cosechas, que garantizaban su alimentación y construyendo obras para su manejo (canales, reservorios). En todas las culturas se observa claramente la dualidad de mirada religiosa y

de desarrollos tecnológicos para el uso del agua. Para los mayas, en el Yucatán mexicano, el agua era la fuente y origen de todo y era importante su dios del agua, Chaac, que controlaba la lluvia. Pero en paralelo, aprovechaban los cenotes para proveerse de agua y construyeron sofisticados acueductos. Los aztecas construyeron Tenochtitlán en medio de una laguna y distribuían el agua con un sistema de cañerías abiertas. Los incas, por su parte, construyeron complejos canales en Machu Picchu y movían el agua por gravedad para alimentar su sistema de agricultura en terrazas. Y para ellos, la mujer del dios supremo Viracocha, llamada Mama Cocha, era la *Madre del Agua* así como la Pacha Mama era la *Madre de la Tierra*.

La conquista española introdujo una visión diferente que se puso en evidencia también en el manejo de los recursos hídricos. Este manejo se alejó de la sustentabilidad, produciendo problemas de abastecimiento y salud. El ambiente era considerado por los españoles como un recurso y no como una parte esencial de la vida y el desarrollo de la población. Actualmente, el crecimiento demográfico junto con otros factores, como las migraciones internas, implica una creciente demanda de alimento y agua que impacta en su calidad y cantidad. Este hecho nos lleva a reflexionar sobre la importancia de considerar el agua y el ambiente como parte indisoluble de la vida misma y basar su uso en este paradigma.

Las antiguas civilizaciones nos han dejado su legado. Como reza una inscripción en un monumento fúnebre egipcio: *Quiera Osiris ofrecerte agua fresca*.

Lógicamente, en las expresiones culturales de la cultura judeocristiana también aparece recu-

rrentemente el agua. Podríamos hablar de la literatura o de la pintura; mencionemos sólo algunos casos en que el agua se vincula con la música. La *Música Acuática* de Händel (ver y oír [http://www.youtube.com/watch?v=sr3k7jE\\_4v8](http://www.youtube.com/watch?v=sr3k7jE_4v8)), los *Juegos de Agua* de Ravel (ver y oír <http://www.youtube.com/watch?v=LwiULUzp8ks>), los *Jardines bajo la Lluvia* de Debussy (ver y oír <http://www.youtube.com/watch?v=4iH8kFrGnqc>), son ejemplos de ella. Y también aparece en la música contemporánea de autores ligados a otras culturas: el *Hechizo de la Lluvia* del japonés Toru Takemitsu (ver y oír <http://www.youtube.com/watch?v=9sbhPvtW0vM>), o el *Ciclo del Agua* del marroquí Ahmed Essayad (ver y oír <http://www.youtube.com/watch?v=D6RHOTpIGSM>) son ejemplos de ello. También abundan los ejemplos en la música popular, como el célebre *Singin' in the rain* del filme musical del mismo nombre cantado y bailado por Gene Kelly (ver y oír <http://www.youtube.com/watch?v=D1ZYhVpdXbQ>) o las piezas folclóricas dedicadas al río Paraná, como la *Canción del Jangadero* de Jaime Dávalos, algunas canciones de *Los de Salta (Río río*, ver y oír <http://www.youtube.com/watch?v=dd8mtll6lOk>; *Capricho del río*, ver y oír <http://www.youtube.com/watch?v=2GRduPA11Fk>).

Dice un crítico sobre la música de Essayad: *Para Essayad, que nunca ha perdido contacto con los paradigmas de su cultura original, el agua es símbolo ineludible del flujo del tiempo y de la renovación permanente pero es también, como para los pobladores del desierto, la representación de un tesoro preciado y de resonancias con frecuencia dramáticas.* La analogía entre el fluir del agua y el fluir del tiempo no puede estar mejor expresada que en el famoso texto de Borges:

<b>Cuadro 1</b> <i>Los estados de ánimo y el agua</i>	
<p><i>Singin' in the rain</i> asocia la lluvia con la alegría del enamoramiento. No es eso lo más usual. La música popular está llena de ejemplos en los que la lluvia se asocia a la nostalgia, a la tristeza. Baste recordar <i>Esta tarde vi llover</i> de Armando Manzanero, o <i>Lágrimas del alma</i> (ver y oír <a href="http://letras.com/miguel-aceves-mejia/1238994/">http://letras.com/miguel-aceves-mejia/1238994/</a>) cantada por el <i>Rey del Falsete</i>, Miguel Aceves Mejía (1915-2006), cuya letra mostramos a continuación,</p> <p>Después de un día lluvioso El cielo se oscurece Ahí es donde comienza Mi pecho a suspirar. Recuerdo aquella tarde De nuestra despedida Pues era un día como este Que no podré olvidar.</p> <p>Por eso cuando llueve Me lleno de recuerdos Y con tristeza espero La horrible oscuridad. Las lágrimas del alma Semejan esta lluvia; La noche con su manto Tendrá su día de luz.</p> <p>Sumido en el letargo El pensamiento implora Que aclare nuestro cielo Y vuelva a ser feliz.</p>	

*Mirar el río hecho de tiempo y agua  
y recordar que el tiempo es otro río,  
Saber que nos perdemos como el río  
y que los rostros pasan como el agua.*  
Jorge Luis Borges, *Arte Poética*.

#### ■ EL AGUA EN LA NATURALEZA

A nuestra tierra se la ha llamado con sobrada razón, el “planeta del agua”. Si no fuera por la invasora presencia del agua en ella las formas de vida que conocemos simplemente no existirían. Si este planeta no estuviera a 150 millones de kilómetros de nuestro Sol, la Tierra no tendría su actual mezcla de humedad gaseosa, líquida y sólida.

El Sol produce la evaporación

del agua de los océanos, así como la de los lagos, los embalses y los ríos. Otra contribución importante a la humedad atmosférica proviene de la superficie de las hojas de las plantas, mediante transpiración. El agua puesta en la atmósfera mantiene el ciclo (*ciclo hidrológico*) en constante movimiento. Este ciclo es un proceso complejo que incluye la precipitación, el escurrimiento, la evapo-transpiración y la infiltración.

Cuando las masas de humedad entran en contacto con masas de aire más frío, se producen la lluvia, el granizo y la nieve. Si la precipitación cae sobre un suelo relativamente impermeable, el agua correrá por el suelo formando pequeños

arroyos o riachuelos. Pero si la superficie del suelo es bastante porosa se producirá una mayor infiltración. Una vez que el agua comienza a infiltrarse por la superficie del suelo, se mueve mucho más lentamente. Si el suelo es muy compacto o contiene mucha arcilla, el agua apenas circulará. En este caso, puede tardar cientos de años en alcanzar el nivel freático, esa zona subterránea de la tierra que está saturada de agua. La humedad que llega hasta las aguas

subterráneas no queda separada para siempre del agua que circula en el ciclo hidrológico terrestre. Aunque con lentitud, las aguas subterráneas se mueven hacia el océano. El ciclo continúa, la Tierra sigue funcionando con el agua en movimiento perenne, pero su cantidad en lo esencial se mantiene constante. El motor de ese ciclo perenne es la energía solar. La Figura 4 da una posible imagen cualitativa del ciclo del agua.

El inventario de agua en nuestro planeta es del orden de  $1,4 \times 10^{18}$  toneladas, cantidad muy elevada. Sin embargo, más del 97% de esa agua está en los océanos y no está fácilmente disponible para el hombre. El agua que usa el hombre proviene del ciclo hidrológico y es por lo tanto un recurso renovable pero finito. Se calcula que al año se evaporan aproximadamente  $3,6 \times 10^{14}$  toneladas de agua de los océanos. Sin embargo, la mayor parte se precipita nuevamente sobre los mismos océanos. Los océanos dan cuenta de aproximadamente 97,5 % del agua del planeta. Únicamente un 2,5% es agua dulce. Los glaciares, la nieve y el hielo de los cascos polares representan casi el 80% del agua dulce, el agua subterránea 19% y el agua de superficie accesible rápidamente sólo el 1%. Esta baja cantidad de agua de superficie fácilmente accesible se encuentra principalmente en lagos (52%) y humedales (38%).

Los contenidos de agua, en gramos de cada uno de los reservorios involucrados en el ciclo hidrológico, se muestran en la Figura 5 que presenta un esquema simplificado del movimiento del agua. En dicha figura se señalan los contenidos de agua de los diversos reservorios y la magnitud de los flujos entre ellos. Allí se ha optado por incluir a todas las aguas dulces en un solo reservorio. La Figura 5 indica los flujos entre reservorios. Aún cuando la fracción contenida en la atmósfera es muy pequeña (del orden de  $10^{-5}$  del total), el intercambio de agua entre la atmósfera y el mar o entre la atmósfera y las aguas dulces es muy dinámico y la cantidad total de agua que pasa por la atmósfera por año es un orden de magnitud mayor que la totalidad del inventario de aguas dulces (líquida) del planeta. La atmósfera es la cinta transportadora del agua en el ciclo hidrológico.

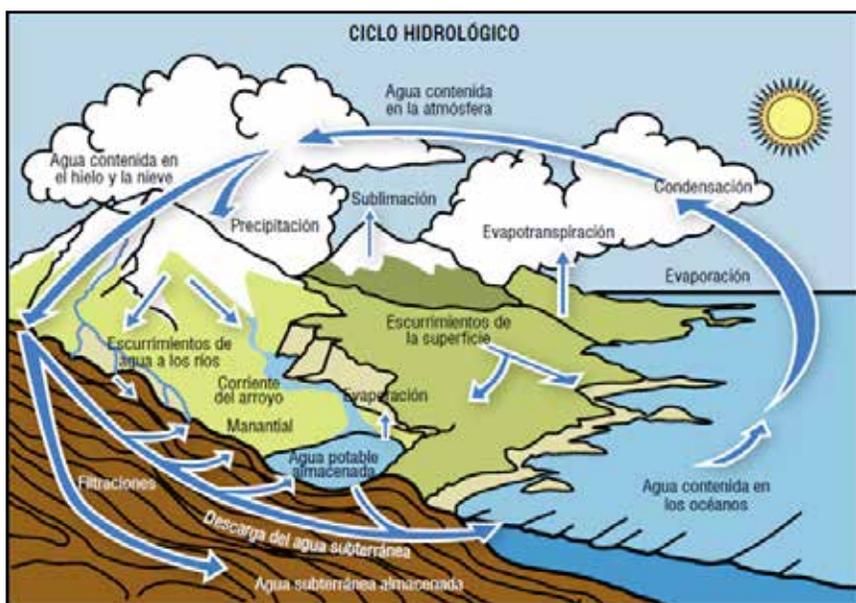


Figura 4: El ciclo hidrológico.

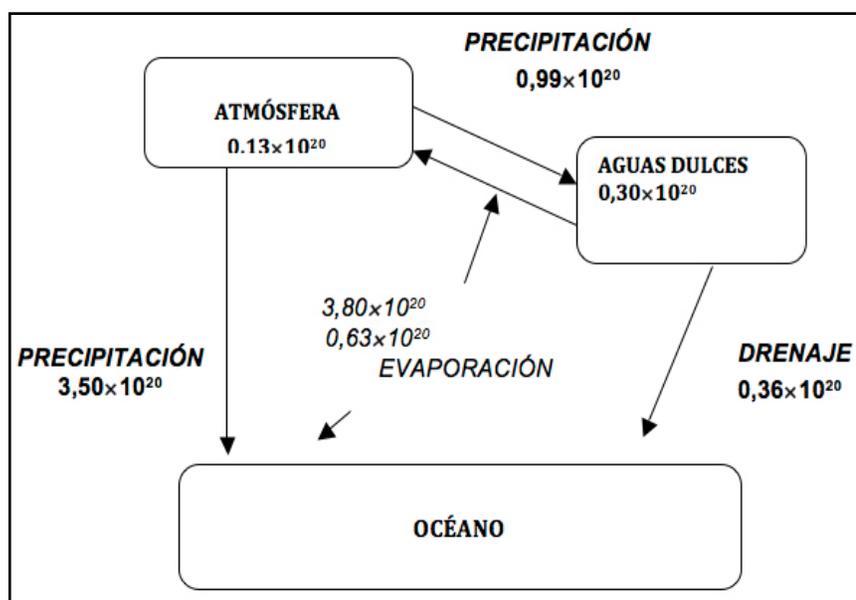


Figura 5: Ciclo hidrológico simplificado; los contenidos de los reservorios están dados en g, y los flujos en g año<sup>-1</sup>.

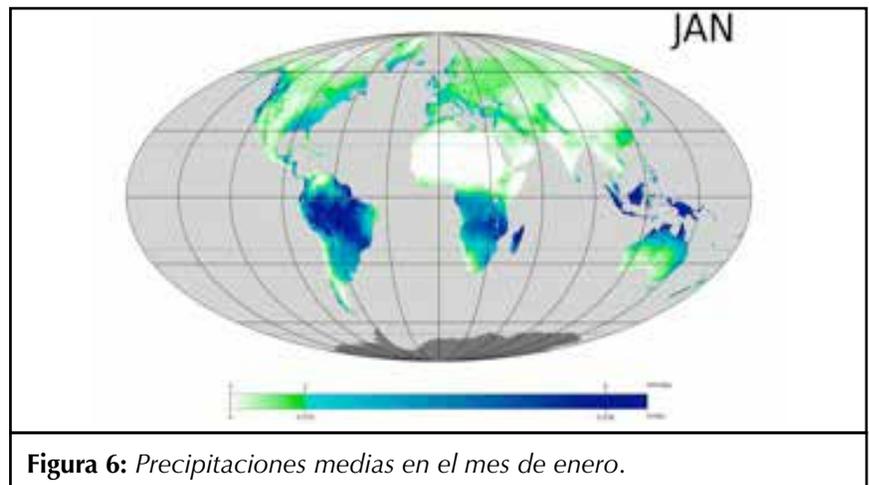
A partir de las masas de agua en cada reservorio y de los flujos máxicos es posible calcular los tiempos de residencia del agua en el océano, en lagos y ríos y en la atmósfera. Estos valores que indican el tiempo que, *en promedio*, permanece una molécula de agua en el reservorio resultan ser del orden de 3550 años, 4 meses y 11 días, respectivamente.

En realidad es conveniente dividir el agua de mar, definiendo dos compartimientos diferentes: las aguas superficiales y las aguas profundas porque, como ya se dijo, las mismas se mezclan muy lentamente entre sí. El valor de 3550 años es entonces un promedio pesado de dos tiempos de residencia muy diferentes. Los tiempos de residencia de lagos y ríos y de estos últimos entre sí son también muy diferentes. Por este motivo se distingue entre sistemas lóticos (con tiempos de residencia cortos) y lénticos (o leníticos, con tiempos de residencia más largos).

De la Figura 5 puede verse que llueve sobre la tierra más de  $120 \times 10^{12}$  toneladas de agua por año. Pero esa agua se distribuye de manera irregular, tanto en el tiempo como en el espacio. La Figura 6 muestra la distribución espacial de lluvia en enero, donde las zonas más áridas están en blanco y las más húmedas en azul intenso. Se puede encontrar en <http://en.wikipedia.org/wiki/File:MeanMonthlyP.gif> la secuencia de imágenes correspondientes a todos los meses.

La distribución espacial muy despareja que muestran los sitios en los que se registraron promedios anuales máxicos y mínimos de precipitaciones puede consultarse en: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/globalextremes.html>. En Sudamérica, basta recorrer 2755 km en línea recta para trasladarse desde Arica, en Chile, donde llueve menos de 1 mm

<b>Cuadro 2</b> <i>¿Cuánto tiempo perdura el agua antes de renovarse?</i>
Los organismos vivos tienen una cantidad de agua aproximadamente constante, pero esa agua está en permanente renovación. Lo mismo ocurre con el agua atmosférica, con el agua de los ríos, etc. <i>En World Water Balance and Water Resources of the Earth, UNESCO, 1999</i> encontramos valores sobre los tiempos que tarda el agua en renovarse:
<b>Agua biológica: varias horas</b>
<b>Agua atmosférica: 8 días</b>
<b>Aguas fluviales: 16 días</b>
<b>Humedad del suelo: 1 año</b>
<b>Agua de pantanos: 5 años</b>
<b>Agua de lagos: 17 años</b>
<b>Agua subterránea: 1400 años</b>
<b>Glaciares de montaña: 1600 años</b>
<b>Océanos: 2500 años</b>
<b>Casquetes polares: 9700 años</b>



**Figura 6:** *Precipitaciones medias en el mes de enero.*

por año, hasta Lloró, en Colombia, donde se estima que llueve más de 13.000 mm por año.

#### ■ UN CAMBIO DE ESCALA: DEL AGUA EN LOS SISTEMAS NATURALES AL AGUA EN EL LABORATORIO

El ciclo hidrológico describe al agua en la naturaleza. En contraste, la química se desarrolló esencialmente en el laboratorio. Para comprender el comportamiento de los sistemas químicos en el laboratorio, los químicos desarrollaron la Termodinámica Química y el concepto de *equilibrio químico*. Las condiciones de equilibrio se alcan-

<b>Cuadro 3</b> <i>Las unidades que miden la cantidad de agua caída.</i>
La cantidad de agua caída suele medirse en milímetros. ¿Cuánta agua representa 1mm en la Ciudad de Buenos Aires? La superficie de la ciudad es de 203,3 km <sup>2</sup> o 203,3 millones de metros cuadrados. Como 1 mm= 0,001 m, una capa de 1 mm en toda la ciudad equivale a un volumen de 203.300 m <sup>3</sup> o a 203.300 toneladas de agua. Dado que las precipitaciones anuales en Buenos Aires superan los 1000 mm, la cantidad de agua que cae sobre la ciudad por año es mayor que 200 millones de toneladas.

zan cuando no se observan cambios con el transcurso del tiempo: por ejemplo, el color permanece constante en un matraz que contiene una mezcla de sustancias que reaccionan entre sí. Para formular las leyes de la Termodinámica Química es imprescindible definir previamente los conceptos de *sistema* y *medio ambiente*.<sup>1</sup> El sistema es una porción delimitada del universo que constituye el motivo de estudio; un sistema en el laboratorio puede ser la solución contenida en un matraz cónico o un recipiente hermético que contiene un gas a cierta presión y a cierta temperatura. El resto del universo es el medio ambiente. Entre el sistema y el medio ambiente puede haber o no haber intercambio de energía; un sistema que no intercambia energía con el medio ambiente se llama adiabático. También puede haber o no haber intercambio de materia; los sistemas que no intercambian materia con el medio son sistemas cerrados y en general los sistemas de laboratorio son sistemas cerrados.

En cambio, los sistemas acuosos naturales son un lago, un mar, un río, un acuífero (subterráneo), etc. Los sistemas naturales que nos interesan son sistemas abiertos, porque intercambian materia constantemente con el medio ambiente. La Figura 4 ilustra las diversas posibilidades.

Los *sistemas naturales* que intercambian materia entre ellos son en general de gran tamaño (por ejemplo, el mar que intercambia materia con la atmósfera y con los sedimentos). Los sistemas naturales son apreciablemente diferentes de los sistemas de laboratorio especialmente por sus dimensiones. Además, son muchas veces idealizaciones más que entes físicos; baste pensar en la hidrosfera como un sistema. La distinción entre sistema y medio ambiente se esfuma, si no desaparece

totalmente, cuando estudiamos sistemas naturales. El intercambio de materia y de energía tiene lugar entre sistemas de tamaños muchas veces comparables más que entre un sistema pequeño y un medio ambiente de capacidad infinita. Cada uno de esos sistemas es un *reservorio* y en la naturaleza lo que observamos son *flujos* entre los reservorios (flujos de materia, de energía).

Cuando el intercambio de materia se acopla con un flujo de energía se alcanza en muchos casos un *estado estacionario* y los flujos de materia entre reservorios se transforman en ciclos cerrados: la materia se mueve incesantemente entre los reservorios, pero la cantidad presente en cada reservorio es constante en el tiempo. Para nuestros fines, el ciclo hidrológico es el ejemplo más acabado, donde el flujo incesante del agua entre los reservorios es posible gracias al flujo de energía, esencialmente proveniente del Sol.

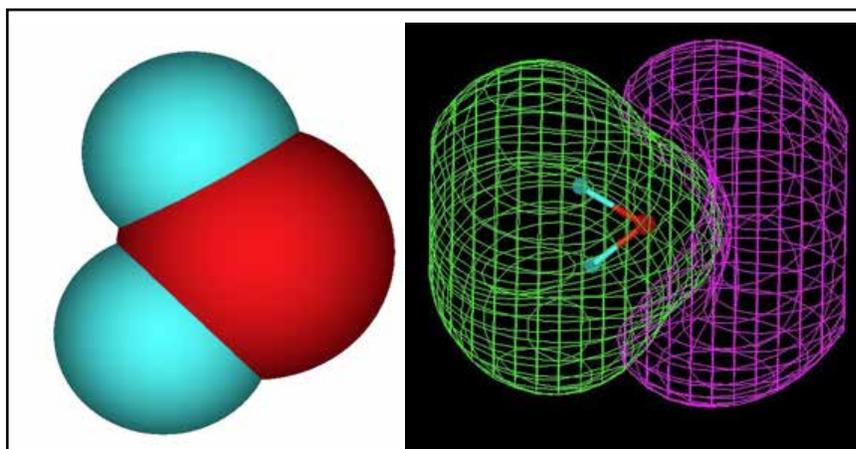
Uno de los enfoques más sencillos usados al estudiar sistemas naturales es la búsqueda de la descripción de los estados estacionarios que describen la cantidad de materia presente en cada reservorio y los flujos entre ellos. Si el estado estacionario sufre una perturbación,

la dinámica de intercambio entre los reservorios genera una respuesta del sistema en busca del equilibrio. Estos conceptos son los que justifican el concepto de *ciclos naturales*. El ciclo hidrológico es el ejemplo más importante para nuestros fines.

## ■ LAS PROPIEDADES DEL AGUA

El agua es una sustancia molecular constituida por moléculas discretas:  $H_2O$ . La molécula de agua es angular; el ángulo H-O-H es de  $104,5^\circ$  y la distancia H-O es de  $1,01 \text{ \AA}$ .<sup>2</sup> La Figura 3 muestra la estructura electrónica de la molécula de agua aislada (por ejemplo en fase gaseosa a presiones bajas), con dos uniones O-H y dos pares electrónicos solitarios (región más negativa de la imagen de la izquierda). En la jerga de la Química Cuántica, la hibridación del átomo de oxígeno es  $sp^3$  y cada unión O-H se forma por solapamiento de un híbrido de esa naturaleza con el orbital s del hidrógeno. Figura 7.

El diagrama de fases del agua se muestra en la Figura 8. Este diagrama demarca las regiones de presión y temperatura en las cuales son estables cada una de las fases (líquida y vapor y un número importante de fases sólidas). Sobre las líneas coe-



**Figura 7:** La molécula de agua. La imagen de la derecha muestra curvas de isodensidad electrónica, realizadas con el software Hyperchem 7, con un máximo en el oxígeno.

xisten en equilibrio dos fases y en el punto de intersección de las curvas sólido / líquido / vapor coexisten las tres fases (punto triple). La Figura 8 ilustra algunas de las propiedades especialmente importantes del agua líquida: su amplio ámbito de estabilidad y la posibilidad de cambio de estado en un ámbito moderado de temperaturas y presiones, fácilmente alcanzables en la superficie de la Tierra. Las diversas fases sólidas aparecen a presiones elevadas.

En condiciones normales de presión (0,1 MPa, 1 atm, Figura 8) el agua es líquida entre 0 y 100°C o 273 y 373 K. Ambos valores son altos en relación con la posición del hidrógeno y del oxígeno en la Tabla Periódica e indican que se necesita mucha energía para fundir el hielo o para evaporar el agua líquida. (Tabla I).

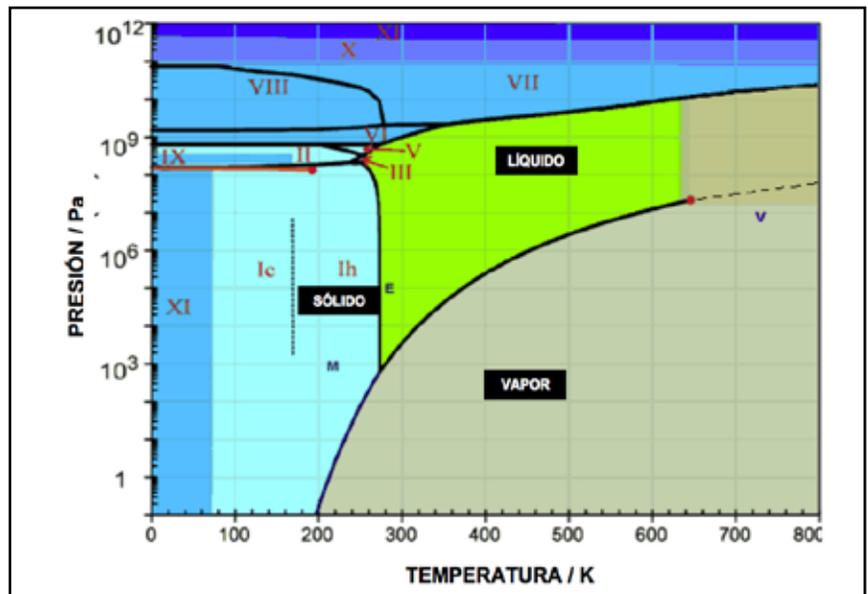
Para fundir hielo y para vaporizar agua se necesita mucha más energía que para realizar los mismos procesos en sustancias constituidas por moléculas análogas, por ejemplo amoníaco  $\text{NH}_3$  o metano  $\text{CH}_4$ . Las razones hay que buscarlas en la estructura del hielo y del agua líquida. El hielo contiene átomos de oxígeno que están rodeados por cuatro H, dos provenientes de la propia molécula y otros dos de moléculas vecinas. Los cuatro átomos de hidrógeno definen aproximadamente un tetraedro con dos distancias H-O de 1,01 Å y dos de 1,74 Å. Todos los átomos de hidrógeno están involucrados en la formación de fuertes puentes de hidrógeno con dos átomos de oxígeno de moléculas vecinas. En el agua líquida, esta estructura se mantiene localmente, pero los puentes de hidrógeno se rompen con facilidad y el ordenamiento de largo alcance se pierde. Ello confiere a las moléculas la alta movilidad característica del estado líquido. La energía requerida

para romper los puentes de hidrógeno explica el alto calor de fusión del hielo. En el calentamiento del agua, desde 0 hasta 100°, estos puentes de hidrógeno se rompen y ello conduce también a una alta capacidad calorífica<sup>3</sup> ( $18 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ). Finalmente, en la ebullición, esos puentes terminan de romperse y el calor de vaporización es también elevado.

Los cambios de estado del agua juegan un papel no despreciable en las regulaciones del clima tanto directamente, por el calor absorbido

o liberado, como indirectamente, por ejemplo, por la reflectividad de la energía solar, el **albedo**, que es mayor sobre superficies de hielo (las nubes juegan un papel análogo).

En virtud de las estructuras del agua líquida y del hielo, la densidad de éste es menor razón por la cual el hielo flota en el agua. La necesidad de mantener coordinación tetraédrica alrededor del oxígeno en una red rígida como la del sólido obliga a empaquetamientos poco compactos en el hielo, por fusión se rompen di-



**Figura 8:** Diagrama de fases del agua pura. Nótese que la escala de presiones es logarítmica. Tomado de *Water Structure and Behavior*, M. Chaplin, London Southbank University, 2007 (<http://www.lsbu.ac.uk/water/index2.html>).

**TABLA I**

*Algunas propiedades físicas del agua.*

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Volumen molar a 4°C	18 cm <sup>3</sup> / mol
Calor de vaporización a 0°C	45,05 kJ/mol
Calor de fusión	6,02 kJ/mol
Momento dipolar	1,85 D
Constante dieléctrica a 25°C	78,4
Viscosidad a 20°C	0,01 poise
Energía superficial	72,75 dinas/cm

námicamente los puentes de hidrógeno con mucha facilidad conduciendo a un empaquetamiento más compacto, con mayor densidad. Esta propiedad tiene también consecuencias ambientales importantes, como la protección frente a la solidificación de masas de agua líquida por capas de hielo que se forman en la superficie.

Los cambios de fase asociados con la formación de témpanos en las regiones polares y con los cambios de la densidad del agua líquida cuando cambia la temperatura generan también un efecto de alta importancia en la dinámica de las aguas oceánicas y en la regulación del clima. El agua en las regiones polares está sometida a bajas temperaturas, con lo que su densidad aumenta. Además, cuando se congela el agua de mar se forma hielo de salinidad mucho más baja que el agua líquida (en el caso límite más sencillo el hielo es agua pura, sin sales) y las sales se acumulan en el agua líquida. Se produce así un aumento de la salinidad y densidad en las aguas líquidas frías que es responsable de las corrientes marinas profundas que da origen a la *circulación termohalina*. Este mecanismo se suma al efecto

causado por los vientos, definiendo el patrón global de circulación oceánica. Las corrientes profundas de agua fría eventualmente emergen, al calentarse, y el circuito de las aguas se cierra con las corrientes cálidas de superficie (como la corriente del Golfo). La Figura 9 muestra las corrientes profundas en rojo, y las superficiales en azul. Los principales sitios de formación de aguas profundas están identificados con las letras L (Labrador), G (Groenlandia), W (Mar de Weddell) y R (mar de Ross).

La temperatura de congelamiento del agua depende de la salinidad, en función de un conocido fenómeno, el *descenso crioscópico* (este tema puede consultarse en cualquier texto de Química General) y es por eso que una solución salina al 3,5% como el agua de mar congela a temperaturas algo inferiores a los 0°C.

La densidad máxima del agua se alcanza a una temperatura próxima a los 4°C. Este máximo en la densidad tiene otra consecuencia importante. El mezclamiento vertical depende fuertemente de los gradientes de densidad; las aguas menos densas subirán y las más densas baja-

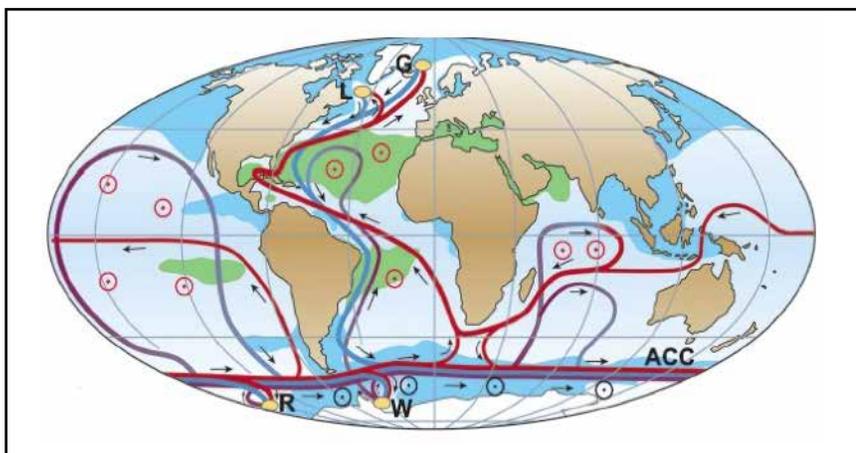
rán. En el agua, eso significa que las aguas más profundas, al adoptar temperaturas próximas a los 4°C alcanzan su máxima densidad y no se mezclan apreciablemente con aguas superficiales, lo que resulta en una estratificación térmica. Entre otros fenómenos este escaso mezclamiento determina que la capacidad de absorción de sustancias presentes en la atmósfera se vuelva muy lento. Es así que, si bien potencialmente el mar tiene la capacidad de absorber todo el dióxido de carbono que el hombre está liberando a la atmósfera, en la práctica la respuesta del océano es extremadamente lenta y el dióxido de carbono se acumula en la atmósfera.

La variación de la presión de vapor ( $p_v$ ) del agua con la temperatura (ver Figura 8) viene dada por la ecuación de Clausius-Clapeyron:

$$\log p_v = A - \frac{\Delta H}{2,3RT} \quad (1)$$

En la ecuación (1), A es una constante y  $\Delta H$  la entalpía (calor) de vaporización. Esta ecuación describe la influencia de la temperatura sobre la presión parcial del agua en la fase gaseosa cuando está en equilibrio con el agua líquida. La situación de equilibrio entre agua líquida y su vapor ocurre cuando la humedad relativa ambiente, H.R.A., definida por la ecuación (2), es de 100%. Como la presión de equilibrio  $p_v$  aumenta con la temperatura según la ecuación (1), la presión de vapor de agua  $p$  necesaria para mantener una H.R.A. fija aumenta con la temperatura de manera análoga. El bien conocido efecto de "secado" del aire por calefacción y el empañamiento de superficies frías se describen con esta ecuación.

$$\text{H.R.A.} = 100 \times (p / p_v) \quad (2)$$

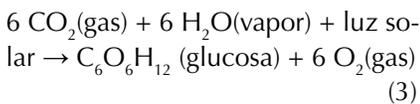


**Figura 9:** Mapa de corrientes submarinas. Para interpretación completa de la figura, véase la referencia original: S. Rahmstorf, *Thermohaline Ocean Circulation*, en *Encyclopedia of Quaternary Sciences*, Editor: S.A. Elias. Elsevier, Amsterdam 2006).

## Disolución de gases en agua

Los cuerpos de agua tienen distintas proporciones y composición de gases disueltos, predominando los gases atmosféricos. Existen dos gases que son cruciales para el desarrollo de la vida en los sistemas acuáticos: el oxígeno (O<sub>2</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

En última instancia, todo el oxígeno proviene de la fotosíntesis, ecuación (3).



En esta ecuación, de forma simplificada, se identifica a la biomasa con glucosa. Esta reacción tiene lugar constantemente en la región iluminada de los mares, por acción de las algas. Más importante, esta reacción dio origen al oxígeno atmosférico en un proceso que cambió la composición atmosférica por acción de los seres vivos hace más de dos mil millones de años. En la actualidad, el oxígeno disuelto en las aguas proviene de la producción fotosintética de las algas y de la reabsorción del oxígeno del aire. La primera de estas fuentes no es realmente significativa debido a que su aporte es pequeño. Por otra parte, cuando las algas mueren su degradación consume oxígeno, por lo cual es mayor la cantidad que consumen que la que aportan.

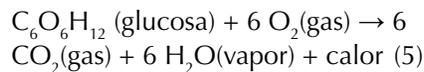
Analicemos la fijación de oxígeno desde la atmósfera. Los químicos definen la solubilidad de oxígeno en agua como la concentración máxima que puede alcanzarse en condiciones óptimas de equilibrio. Según la ley de Henry, a temperatura constante la solubilidad de un gas en un líquido es proporcional a la presión parcial del gas en contacto con el líquido; matemáticamente, esta ley se

expresa por la ecuación (4).

$$\text{Concentración de O}_2 \text{ en agua} = K_H p\text{O}_2 \quad (4)$$

En esta ecuación,  $K_H$  es una constante cuyo valor es más chico cuanto más alta es la temperatura (la solubilidad disminuye con la temperatura).

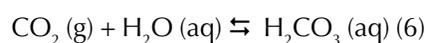
La degradación de la materia orgánica por medio de oxígeno puede representarse por la ecuación inversa a la (3):



Esta reacción puede representar la respiración y los procesos de descomposición en presencia de aire. Estos procesos producen una disminución de los niveles de oxígeno en cursos de agua que puede provocar incluso la mortandad de peces.

Si se cumplieran las leyes de la termodinámica, las aguas naturales en contacto con aire estarían siempre saturadas en oxígeno: si la fotosíntesis produce más, el exceso se debe liberar a la atmósfera; si la respiración consume oxígeno, el mismo se repone desde el aire. Sin embargo, los tiempos que requieren estos procesos de intercambio con el aire son largos y las aguas pueden estar subsaturadas o sobresaturadas por tiempos prolongados.

A diferencia del oxígeno o el nitrógeno atmosférico, la solubilidad del dióxido de carbono en agua no depende solo de la temperatura: la acidez del agua tiene una influencia crucial porque el dióxido de carbono es un ácido que reacciona con los iones hidróxido, según las ecuaciones (6) - (8):



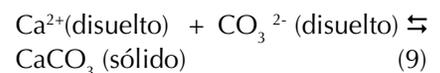
ácido carbónico

ión bicarbonato



La proporción de CO<sub>2</sub> en la atmósfera es de sólo 0,035 %, por lo tanto si consideramos agua pura en equilibrio con el aire, la cantidad de CO<sub>2</sub> disuelto será realmente baja. Sin embargo, en sistemas naturales se deben considerar otros factores en la evaluación del CO<sub>2</sub> disuelto en agua, por ejemplo, las algas producen CO<sub>2</sub> durante una fase de sus procesos metabólicos en ausencia de luz y también se produce CO<sub>2</sub> a raíz del proceso de decaimiento de la materia orgánica, mientras que las algas lo consumen en la fase fotosintética para sintetizar biomasa. En otras palabras, como lo indican las ecuaciones (3) y (5), las transformaciones de la biomasa afectan al dióxido de carbono de forma opuesta a cómo afectan al oxígeno disuelto.

Además, en la definición de la solubilidad del dióxido de carbono, también juega un papel importante la solubilidad de los carbonatos, especialmente los de calcio. Las aguas naturales contienen calcio disuelto que reacciona con los iones carbonato formando los depósitos calcáreos:

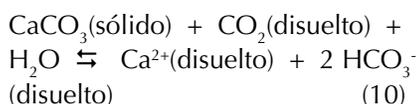


En el transcurso de las eras geológicas se han formado grandes masas de estos carbonatos en el lecho del mar; un ejemplo espectacular es el de las estalactitas y estalagmitas (Figura 10).

En la actualidad esos sedimentos calcáreos pueden reaccionar con el dióxido de carbono disuelto, con lo cual, a partir de una molécula disuelta se generan dos iones disueltos:



**Figura 10:** Estalactita y estalagmita a punto de unirse para formar una columna (tomado de <http://es.wikipedia.org/wiki/Estalactita>).



Los cálculos de las concentraciones en condiciones de equilibrio son algebraicamente engorrosos pero sencillos. En la actualidad, los mismos se realizan fácilmente con programas diseñados especialmente para ello. El lector interesado en más detalles puede consultar la bibliografía (Blesa y col. 2012).

Rara vez los cuerpos de agua están equilibrados con la atmósfera o con los sedimentos calcáreos. La actividad biológica ha ido moldeando este paisaje natural y todo el carbonato de calcio de los sedimentos marinos es de origen biológico, se formaron por acción metabólica de los organismos marinos. Ese es también el origen de las "arenas blancas" de, por ejemplo, las playas de Varadero, en Cuba, "arenas" que no son silíceas, sino carbonato de calcio.



**Figura 11:** Imagen de la playa de Varadero (Cuba), Tomada de <http://www.vuelaviajes.com/la-espectacular-playa-de-varadero-en-cuba/>.

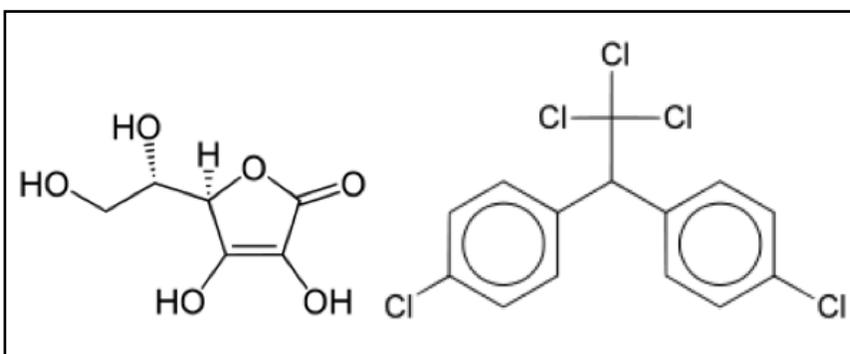
### El comportamiento del agua y de los aceites (fases líquidas no miscibles).

Los seres vivos contienen una cantidad elevada de agua, por ejemplo, alrededor del 70% de nuestro peso es agua. Pero los organismos vivos tienen también regiones no acuosas, constituidas por sustancias orgánicas que son muy poco miscibles con agua.

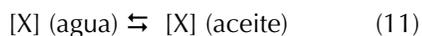
¿Qué pasa cuando una sustancia se encuentra con regiones acuosas y no acuosas en el organismo? ¿Dónde se disuelven? Las sales, como el cloruro de sodio, se disuelven en el agua y poco o nada en las sustancias no miscibles con agua o lipídicas, que podríamos denominar genéricamente aceites o grasas. En

cambio, los compuestos orgánicos pueden tener mayor o menor afinidad por cualquiera de las dos fases; se dice que pueden ser hidrofílicos o lipofílicos. Si la molécula tiene grupos iónicos, como por ejemplo el ácido ascórbico (vitamina C), su solubilidad en agua será elevada. En cambio, si posee cadenas largas de átomos de carbono y no posee grupos iónicos o polares, se concentrará en las grasas; tal es el caso, por ejemplo, del DDT. Sus moléculas se muestran en la Figura 12.

En general, cualquier sustancia X se distribuirá entre las dos fases, en grado variable. El equilibrio que se establece en estas situaciones es el siguiente, donde las concentraciones se representan con corchetes:



**Figura 12:** Las moléculas de ácido ascórbico (hidrofílico, a la izquierda) y del DDT (hidrofóbico, a la derecha).



La constante de equilibrio correspondiente  $K_d$ , recibe el nombre de coeficiente de distribución o coeficiente de partición:

$$[X] (\text{aceite}) / [X] (\text{agua}) = K_d \quad (12)$$

La distribución de sustancias orgánicas no polares entre agua y sólidos naturales u organismos puede visualizarse como un proceso de partición entre la fase acuosa y la materia orgánica presente en suelos o biota.

Ya en 1900 investigadores que estudiaban el comportamiento de drogas no polares descubrieron que podían usar la partición entre agua y solventes como el n-octanol como un "modelo" para la distribución de fármacos en el organismo. Si bien la partición entre una solución acuosa y estos solventes no es idéntica a lo que pasa con los organismos es directamente proporcional. Es decir, una acumulación mayor en las grasas de un organismo corresponde a una partición más favorable en el solvente orgánico. La constante de partición octanol-agua se usa entonces para describir la afinidad de cualquier sustancia por las regiones grasas. Cuanto más alto es  $K_{ow}$  mayor es el riesgo que esa sustancia se acumule en el organismo:

$$K_{ow} = C_o / C_w \quad (13)$$

Esta constante,  $K_{ow}$  está relacionada con la toxicidad que un contaminante puede tener en el organismo ( $LD_{50}$ ).

### Procesos de oxidación reducción en aguas naturales.

La solubilidad y los procesos de ácido-base controlan las concentraciones de iones inorgánicos como el carbonato en las aguas, mientras

que el contenido orgánico en el agua está dominado por reacciones de oxidación reducción, siendo las más importantes las que involucran al oxígeno disuelto.

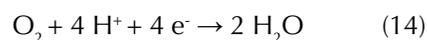
Las reacciones de óxido-reducción, denominadas comúnmente *reacciones redox*, involucran cambios en el estado de oxidación de las especies intervinientes existiendo intercambio de electrones. Este tipo de reacciones resulta de importancia vital en los sistemas acuosos naturales y en aguas de desecho. Muchas reacciones redox que, desde el punto de vista termodinámico estarían favorecidas, suelen no ocurrir u ocurrir tan lentamente que no son apreciables. Algunas son catalizadas por microorganismos, por ejemplo, la degradación de materia orgánica por acción del oxígeno.

Para el análisis de los procesos de óxido reducción en medios acuosos se usa el concepto de pE, análogo al de pH, que se define como el *logaritmo negativo de la actividad electrónica*. La actividad de  $H^+$  se utiliza para determinar las características ácidas o básicas del agua y, por analogía, el pE indica si las condiciones son oxidantes o reductoras. *Cuando la actividad electrónica es alta, el pE es bajo y las condiciones son reductoras, mientras que cuando la actividad electrónica es baja, el pE es alto y las condiciones del medio son oxidantes.*

Los sistemas acuáticos son sistemas dinámicos que normalmente no están en equilibrio. Por ejemplo, pueden coexistir materia orgánica y oxígeno disuelto que deberían reaccionar entre sí pero lo hacen lentamente. Por ese motivo, los sistemas acuosos naturales están muchas veces en estado estacionario como ya se explicó. Aun así, la aplicación de los modelos de sistemas en equilibrio resulta útil para visualizar ten-

dencias en aguas naturales y sistemas de desecho con un modelo lo suficientemente sencillo para poder comprenderlos.

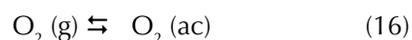
De lejos, el más importante agente oxidante en las aguas naturales es el oxígeno molecular disuelto,  $O_2$ . En la reacción, cada uno de sus átomos de oxígeno se reduce desde su estado de oxidación cero hasta el estado  $-2$  en el  $H_2O$ . La hemireacción que muestra la tendencia del oxígeno a captar electrones oxidando a otras sustancias, si tiene lugar en aguas ácidas es,



mientras que la que ocurre en aguas alcalinas es



La concentración de oxígeno disuelto en agua es pequeña a causa de su baja solubilidad y, por tanto, es precaria desde el punto de vista ecológico. Para la reacción



la constante de equilibrio que debe considerarse es la constante de la Ley de Henry,  $K_H$ , que para el oxígeno a  $25^\circ C$  es  $1,3 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1} \text{ atm}^{-1}$ :

$$K_H = [O_2 (ac)] / P_{O_2} = 1,3 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1} \text{ atm}^{-1} \quad (17)$$

Puesto que en el aire seco la presión parcial de oxígeno,  $P_{O_2}$ , es de  $0,21 \text{ atm}$ , se tiene que la solubilidad del  $O_2$  es  $8,7$  miligramos por litro de agua ( $8,7 \text{ ppm}$ ). Debido a que las solubilidades de los gases aumentan al disminuir la temperatura, la cantidad de  $O_2$  que se disuelve a  $0^\circ C$  ( $14,7 \text{ ppm}$ ) es mayor que la cantidad que se disuelve a  $35^\circ C$  ( $7,0 \text{ ppm}$ ). En las aguas servidas, la oxidación de la materia orgánica ha consumido todo el oxígeno y la putrefacción

tiene lugar en condiciones parcialmente anaeróbicas.

## ■ EL AGUA Y LAS ACTIVIDADES ANTRÓPICAS

En ausencia de cualquier impacto humano, las aguas que fluyen en los sistemas naturales presentan concentraciones variables de determinadas sustancias químicas (en forma disuelta o como partículas en suspensión) y organismos biológicos. Esta composición varía en función del terreno por el cual circula el agua ya que ésta tiene la capacidad de disolver determinados minerales. Además, deben añadirse las entradas atmosféricas de origen natural como los aerosoles procedentes de los océanos o las sustancias que provienen de las erupciones volcánicas, además de la materia orgánica procedente del proceso de erosión de los suelos o de los subproductos del ecosistema que se encuentra en el seno del río. Esta variabilidad también se observa en los cursos de agua desde su nacimiento hasta su desembocadura. A medida que los ríos fluyen, aumentan las interacciones con el entorno y las concentraciones de las diferentes sustancias. Estas diferencias son pequeñas comparadas con las provocadas por la actividad humana. El hombre tiene la capacidad de modificar de forma importante la calidad del agua.

En la medida en que usamos el agua hemos generado *ciclos antrópicos*. Captamos de las fuentes naturales agua cuya calidad es mejor a la del agua que devolvemos a esos mismos cuerpos de agua. Debemos conocer y tener en cuenta todas las fases del *ciclo hidrológico natural*, para lograr sustentabilidad. Para ello, es necesario no solo velar por la utilización y la distribución eficiente del agua dulce sino también salvaguardar el estado de la cuenca de captación y las aguas subterrá-

neas (antes del consumo), así como el tratamiento y la eliminación adecuada de las aguas de desecho (después del consumo). Es necesario privilegiar el conocimiento del vínculo existente entre el uso del agua y los ecosistemas que la abastecen.

El agua tiene diferentes usos y cada uno presenta requerimientos específicos. No es lo mismo regar un cultivo que una plantación de árboles, ni es de esperar que el agua usada para refrigerar un reactor químico tenga los mismos requisitos que el agua para cocinar. La actividad humana que más agua demanda es la agricultura; en nuestro país, el 70% del consumo de agua se destina a esta actividad.

Nosotros advertimos sin duda nuestro uso de agua cuando requerimos en la ciudad la provisión para cocinar, para higiene. Ésta es el agua que vemos, cuyo origen es lo que algunos autores llaman “agua azul”, es decir el agua en ríos, lagos, acuíferos. El requerimiento diario de agua de bebida para una persona adulta está entre 2 y 4 litros, pero a ello se debe sumar el agua usada para cocinar y para la higiene personal y del hogar. Por ese motivo, el consumo en una ciudad es del orden de 260 litros por día y por persona pero en Buenos Aires la cifra es mucho más alta, del orden de 670 litros por día y por persona; el grueso se gasta en la descarga de los inodoros, en la ducha, en el lavarropas, etc. A ello se suman las pérdidas en los artefactos domiciliarios, en la red de distribución y en usos tales como la limpieza de veredas y autos con mangueras.

Pero además del “agua azul” también hay agua que no vemos. Se requiere entre 2000 y 5000 litros por día para producir los alimentos necesarios para alimentar a una persona. Según estimaciones realizadas,

para producir una papa mediana se requieren 25 litros de agua, para 1 kg de cítricos hacen falta 1000 litros, para 1 kg de carne de vaca, 15000 litros. Esa agua que no vemos se denomina “**agua virtual**” y se define como el agua que contienen los productos e incluye el agua necesaria para producirlos.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) ha definido **huella hídrica** de una persona o de un país como el volumen total de agua dulce utilizada para producir los bienes y servicios consumidos por dicha persona o país. El promedio de la huella hídrica en la Argentina es de 1.404 m<sup>3</sup> /cápita/año y el promedio de la huella hídrica mundial es de 1.243 m<sup>3</sup>/cápita/año.

El comercio de productos agrícolas que constituye el 15% del comercio mundial es un vector básico del intercambio de agua. De esa manera, los exportadores de productos agrícolas exportan agua y los importadores la importan. Estados Unidos es el primer exportador de agua virtual, ocupando nuestro país el cuarto lugar. Por otra parte, Japón, China y España se encuentran entre los primeros 10 países importadores de agua virtual. Los países de Medio Oriente y África del Norte son también grandes importadores de agua virtual. Minimizar la importancia del agua virtual conduce a no valorar debidamente el agua.

La escasez de agua dulce es un riesgo muy serio, del que ningún país está ajeno. Los recursos de agua son renovables pero finitos, limitados y frágiles. Por otra parte, la demanda es creciente. El agua no puede ser una mercancía en los mismos términos que otros bienes y recursos, por eso la respuesta adecuada debe ser de orden ético y cultural. En la historia de la humanidad la utilización

■ **NOTA**

del agua ha unido mucho más de lo que ha dividido. Así y todo, la palabra "rival" viene del latín *rivalis*, que designa a los habitantes de las riberas opuestas de un mismo río. Qué mejor que recordar aquí a Iva Zanicchi cantando *La orilla blanca, la orilla negra* (ver y oír <http://www.youtube.com/watch?v=m442tFMAZ44>).

Este recurso fundamental, esencial para la vida y el desarrollo es desde el punto de vista químico sólo una simple molécula.

Algunas secciones de este artículo siguen textualmente el material incluido en la referencia 2, Blesa, M.A., Apella, M.C. y dos Santos, A. (2012) *Agua y Ambiente. Un Enfoque desde la Química* EUDEBA.

**Cuadro 4**

*Algunos datos sobre el agua.*

- Se puede vivir cerca de un mes sin alimentos, pero solo una semana sin agua
- Cerca del 70% de la piel humana es agua
- Mujeres y niños de la mayoría de las regiones en desarrollo recorren una distancia media de 10 a 15 kilómetros diarios para abastecerse de agua.
- Unas 34000 personas mueren diariamente por enfermedades relacionadas con la calidad del agua, como diarrea o lombrices intestinales. Es lo mismo que si se estrellaran 100 aviones jumbo y murieran todos sus ocupantes.
- Una persona necesita cinco litros de agua diarios para beber y cocinar y otros 25 litros para su higiene personal.
- Una vaca lechera necesita beber unos cuatro litros de agua por cada uno de leche que produce
- El tomate contiene 95% de agua
- Para fabricar cuatro neumáticos se precisan 9.400 litros de agua
- Cada día se utilizan 1.400 millones de litros de agua para imprimir la prensa de todo el mundo.

**Fuente:** International Development Initiative of Mc Gill University, Canada y sint Paul Water Utility, Minnesota, Estados Unidos.

**Cuadro 5**

*Sequías e Inundaciones en la Provincia de Buenos Aires.*

Desde los inicios de nuestra historia independiente, las actividades agropecuarias en la Provincia de Buenos Aires han estado asociadas a los ciclos de sequías e inundaciones.

A fines del siglo XVIII, en el Río de la Plata aparece el salado de carnes en forma comercial debido a franquicias aduaneras y al abaratamiento de la sal. Sin embargo, la verdadera industria bonaerense surge posteriormente por el libre intercambio y medidas de fomento que implantan los primeros gobiernos nacionales. La exportación de carne salada siguió en constante aumento y Europa era el mercado más importante.

En 1810, la creciente producción de carne salada trajo como consecuencia el aumento del precio de la carne fresca, un alimento de las clases populares. Este hecho, sumado a la gran sequía, preocupó a la Primera Junta que debió tomar medidas y prohibió la matanza de animales sin permiso de las autoridades.

La sequía no sólo afectaba la provisión de aguas sino que provocó escasez de pastos en los campos. En los comienzos de la patria, ya se mencionan los ciclos de sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires y su impacto en la actividad ganadera.

Entre 1829-1832 se produjo otra importante sequía en la provincia de Buenos Aires que causó la muerte de 11.000 cabezas de ganado en una sola estancia en Chascomús.

Fue en 1832 cuando John Whitakker intentó introducir el primer molino "*wind power hydraulic machine*". El inventor recomendaba a los ganaderos su uso para asegurar el continuo suministro de agua para sus haciendas; su invento, sin embargo, generó desconfianza de los ganaderos.

En 1858 se realizó la Primera Exposición agrícola rural argentina y en 1866 se creó la Sociedad Rural Argentina. En 1880, los molinos de viento se exhibieron en sus exposiciones y en 1901 se introdujo su complemento indispensable, el tanque australiano.

En 1884 Florentino Ameghino publicó su obra "Las secas y las inundaciones en la provincia de Buenos Aires. Obras de retención y no de desagüe". Allí criticó las obras de canalización y sostuvo la importancia

de las obras de retención para la recarga de acuíferos y reserva para los períodos de sequía.

En esa época no existían los conocimientos actuales de la dinámica del agua subterránea y resultaba de suma importancia la reserva en lagunas y bajos como aguadas naturales, indispensables para la explotación ganadera y principal limitante a la producción en esos años. Aunque muchas observaciones del ilustre naturalista mantienen vigencia, deben situarse dentro del contexto del conocimiento científico-tecnológico de su época.

Los registros pluviométricos sistemáticos de una serie histórica de 100 años en la Llanura pampeana permiten detectar períodos más húmedos y más secos. Pueden mencionarse las grandes sequías de 1920-1930, cuando se produjo el desecamiento de las Lagunas Encadenadas del Oeste.



*Florentino Ameghino*

En contraposición, en la década del 70 del siglo pasado se instaló un período húmedo con algunas interrupciones y se produjeron grandes inundaciones en la Cuenca del Salado. Durante la inundación de 1980, precipitaron 60 km<sup>3</sup> de agua en un mes y se evaporaron o escurrieron sólo 5 km<sup>3</sup> en tres meses, por lo que quedó el territorio inundado un largo tiempo.



*El puente ferroviario sobre el río Salado en Parada Río Salado (Ramal Altamirano Las Flores, FCG Mitre), en 1980 (Museo Ferroviario de Ranchos, [http://flavam.com/museo\\_ferroviano\\_ranchos/galparadariosalado.htm](http://flavam.com/museo_ferroviano_ranchos/galparadariosalado.htm)), A la izquierda, en la actualidad. A la derecha, en 1980.*

La Llanura pampeana tiene una superficie aproximada de 600.000 km<sup>2</sup>, una exigua pendiente 10 – 30 cm / km y escaso desarrollo de red de drenaje. Por lo tanto, prevalecen los movimientos verticales de agua sobre los horizontales. La transferencia horizontal, en la cual se moviliza por arroyos, ríos y canales hasta llegar al mar, se dificulta por su escasa pendiente. La transferencia vertical está dominada por la evapotranspiración y la infiltración.

(Fernández Cirelli, 2011)

Para más información sobre la química del agua en sistemas naturales, se puede consultar esta obra.

### ■ BIBLIOGRAFÍA

Benjamin, M. M. (2001) *Water Chemistry*, McGraw-Hill Science Engineering.

Blesa, M.A., Apella, M.C., dos Santos, A. (2012) *Agua y Ambiente. Un Enfoque desde la Química*, EUDEBA.

Chaplin, M. (2008) *Water structure and Behavior*, London Southbank University, <http://www.lsbu.ac.uk/water/index2.html>.

Fernández Cirelli, A. (2011) Los ciclos del agua: su función y protagonismo en el agrosistema argentino. *Encrucijadas* N° 50, 54-59.

Morel, F.M.M., Hering, J. (1993) *Principles and Applications of Aquatic Chemistry*, Wiley-Interscience.

Schwarzenbach, R., Gschwend, P., Imboden, D. (2003), *Environmental Organic Chemistry*. John Wiley and Sons.

Stumm, W., Morgan, J. (1996) *Aquatic Chemistry*, Tercera Edición, Wiley-Interscience.

Stumm, W. (1992) *Chemistry of the Solid – Water Interface*, Wiley-Interscience.

World water balance and water resources of the Earth (1999), UNESCO.

### ■ NOTAS

1 En Termodinámica Química, es usual llamar medio ambiente (o medioambiente) al medio que rodea al sistema. El uso de dicho término se ha extendido a las Ciencias Ambientales, pero para la palabra inglesa *environment* es preferible usar simplemente el término *ambiente*.

2  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ . El angstrom ( $\text{\AA}$ ) no es una unidad del sistema SI empleado internacionalmente, pero todavía se usa para describir distancias interatómicas.

3 La capacidad calorífica es la energía que se requiere para calentar un gramo un grado. Esta capacidad es mucho mayor para el agua líquida que para el amoníaco o el metano.

## Recuperación de tecnologías ancestrales y sustentables en Jujuy

### La vicuña como modelo de producción sustentable

*Ciencia e historia se unen para preservar a la vicuña*

*Cazando vicuñas anduve en los cerros  
Heridas de bala se escaparon dos.*

*- No caces vicuñas con armas de fuego;  
Coquena se enoja, - me dijo un pastor.*

*- ¿Por qué no pillarlas a la usanza vieja,  
cercando la hoyada con hilo punzó ?*

*- ¿Para qué matarlas, si sólo codicias  
para tus vestidos el fino vellón ?*

*Juan Carlos Dávalos, Coquena*

Lo primero es pedir permiso a la Pachamama. Porque a ella, en la cosmovisión andina, pertenecen las vicuñas que se extienden por el altiplano de Perú, Bolivia, Chile y Argentina. Una ceremonia ancestral, unida a la ciencia moderna, permite que comunidades y científicos argentinos exploten de manera sustentable un recurso de alto valor económico y social.

La vicuña es una especie silvestre de camélido sudamericano que habita en la puna. Hasta 1950-1960 estuvo en serio riesgo de extinción debido a la ausencia de planes de manejo y conservación. Desde la llegada de los españoles se comenzó con la caza y exportación de los cueros para la obtención de la fibra, que puede llegar a valer U\$600 por kilo, lo que llevo a la casi desaparición de estos animales. Por ese entonces, la población de vicuñas en América era cercana a los 4 millones de ejemplares, en 1950 no eran más de 10.000.

A fines de la década del 70 Argentina, Bolivia, Chile, Perú y Ecuador firmaron un Convenio para la conservación y manejo de la vicuña que permitió recuperar su población hasta contar en la actualidad con más de 76 mil ejemplares en nuestro país.

En Santa Catalina, Jujuy, a 3.800 metros sobre el nivel del mar, investigadores de CONICET, junto a comunidades y productores locales, han logrado recuperar una tecnología prehispánica sustentable para la obtención de la fibra de vicuña. Se trata de una ceremonia ancestral y captura mediante la cual se arrean y esquilan las vicuñas silvestres para obtener su fibra. Se denomina chaku y se realizaba en la región antes de la llegada de los conquistadores españoles. Según Bibiana Vilá, investigadora independiente de CONICET y directora del grupo Vicuñas, Camélidos y Ambiente (VICAM) *"Hoy podemos pensar en volver a hacer ese chaku prehispánico sumado a técnicas que los científicos aportamos para que las vicuñas pasen por toda esa situación sufriendo el menor stress posible. Las vicuñas vuelven a la naturaleza, la fibra queda en la comunidad, y nosotros tomamos un montón de datos científicos."*

### El chaku

El chaku es una práctica ritual y productiva para la esquila de las vicuñas. Durante el imperio inca, las cacerías reales o chaku eran planificadas por el inca en persona. En esta ceremonia se esquilaba a las vicuñas y se las liberaba nuevamente a la vida silvestre. La fibra obtenida era utilizada para la confección de prendas de la elite y su obtención estaba regulada por mecanismos políticos, sociales, religiosos y culturales. Se trata de un claro ejemplo de uso sustentable de un recurso natural. Hugo Jacobaccio, zoarqueólogo e investigador principal de CONICET, explica que *"actualmente el chaku concentra hasta 80 personas, pero durante el imperio inca participaban de a miles. Hoy las comunidades venden esa fibra a acopiadores textiles y obtienen un ingreso que complementa su actividad económica principal, el pastoreo de llamas y ovejas"*.

El proceso comienza con la reunión de todos los participantes, luego toman una soga con cintas de colores reunidos en semicírculo y arrean lentamente a las vicuñas guiándolas hacia un embudo de red de 1 km de largo que desemboca en un corral. Cuando los animales están calmados se los esquila manipulándolos con sumo cuidado para reducir el stress y se los libera. Hoy, 1500 años después del primer registro que se tiene de esta ceremonia, la ciencia argentina suma como valor agregado: el bienestar animal y la investigación científica. En tiempo del imperio Inca, el chaku se realizaba cada cuatro años, actualmente se realiza anualmente sin esquila a los mismos animales *"se van rotando las zonas de captura para que los animales renueven la fibra"* explica Jacobaccio. Según Vilá *"es un proyecto que requiere mucho trabajo pero que demuestra que la sustentabilidad es posible, tenemos un animal vivo al cual esquilamos y al cual devolvemos vivo a la naturaleza. Tiene una cuestión asociada que es la sustentabilidad social ya que la fibra queda en la comunidad para el desarrollo económico de los pobladores locales."*

Yanina Arzamendia, bióloga, investigadora asistente de CONICET y miembro del equipo de VICAM, explica que se

esquilan sólo ejemplares adultos, se las revisa, se toman datos científicos y se las devuelve a su hábitat natural. Además destaca la importancia de que el chaku se realice como una actividad comunitaria *“en este caso fue impulsada por una cooperativa de productores locales que tenían vicuñas en sus campos y querían comercializar la fibra. Además participaron miembros del pueblo originario, estudiantes universitarios y científicos de distintas disciplinas. Lo ideal es que estas experiencias con orientación productiva tengan una base científica.”*

### **Paradojas del éxito.**

La recuperación de la población de vicuñas produjo cierto malestar entre productores ganaderos de la zona. Muchos empezaron a percibir a la vicuña como competencia para su ganado en un lugar donde las pasturas no son tan abundantes. En este aspecto el trabajo de los investigadores de CONICET fue fundamental, según Arzamendia *“el chaku trae un cambio de percepción que es ventajoso para las personas y para la conservación de la especie. Generalmente el productor ve a las vicuñas como otro herbívoro que compite con su ganado por el alimento y esto causa prejuicios. Hoy comienzan a ver que es un recurso valioso y ya evalúan tener más vicuñas que ovejas y llamas. Nuestro objetivo es desterrar esos mitos”,* concluye.

Pedro Navarro es el director de la Cooperativa Agroganadera de Santa Catalina y reconoce los temores que les produjo la recuperación de la especie: *“Hace 20 años nosotros teníamos diez, veinte vicuñas y era una fiesta verlas porque habían prácticamente desaparecido. En los últimos años se empezó a notar un incremento y más próximamente en el último tiempo ya ese incremento nos empezó a asustar porque en estas fincas tenemos ovejas y tenemos llamas”. Navarro identifica la resolución de estos problemas con el trabajo del grupo VICAM: “Yo creo que como me ha tocado a mí tener que ceder en parte y aprender de la vicuña y de VICAM, se puede contagiar al resto de la gente y que deje de ser el bicho malo que nos perjudica y poder ser una fuente más productiva.”*

### **La fibra de camélido**

Además de camélidos silvestres como la vicuña o el guanaco, existen otros domesticados como la llama cuyo manejo es similar al ganado, para impulsar la producción de estos animales y su fibra, el Estado ha desarrollado dos instrumentos de fomento. En la actualidad se encuentran en evaluación varios proyectos para generar mejoras en el sector productor de fibra fina de camélidos que serán financiados por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva. Se trata de dos Fondos de Innovación Tecnológica Sectorial destinados a la agroindustria y al desarrollo social que otorgarán hasta \$35.000.000 y \$8.000.000 respectivamente. Los proyectos destinados a la Agroindustria son asociaciones entre empresas y organismos del sector público con el objetivo de mejorar la calidad de la fibra de camélido doméstico a partir del desarrollo de técnicas reproductivas, mejoramiento genético e innovaciones en el manejo de rebaños; incorporar valor a las fibras a partir de mejoras en la materia prima o el producto final; permitir la trazabilidad de los productos para lograr su ingreso en los mercados internacionales y fortalecer la cadena de proveedores y generar empleos calificados.

La convocatoria Desarrollo Social tiene como fin atender problemas sociales mediante la incorporación de innovación en acciones productivas, en organización social, en el desarrollo de tecnologías para mejorar la calidad de vida de manera sostenible y fomentar la inclusión social de todos los sectores. Otorgará hasta \$8.000.000 por proyecto que mejore las actividades del ciclo productivo de los camélidos domésticos, la obtención y/o el procesamiento de la fibra, el acopio, el diseño y el tejido, el fieltro y la confección de productos.

