

# EL AGUA

**Autor:** MANUEL GUERRERO LEGARRETA

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [PRELUDIO](#)
- [I. EL AGUA, ¿QUÉ COSA ES?](#)
- [II. EL AGUA EN NUESTRO PLANETA](#)
- [III. EL AGUA Y LA VIDA](#)
- [IV. EL AGUA Y LAS CIUDADES](#)
- [AGRADECIMIENTOS](#)
- [COLOFÓN](#)
- [CONTRAPORTADA](#)



# COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

**Coordinadora Fundadora:**

Física Alejandra Jaidar †

**Coordinadora:**

María del Carmen Farías



Primera edición, 1991

La Ciencia desde México es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D. R. © 1991, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S.A. DE C.V.

Av. de la Universidad 975; 03100 México, D.F.

ISBN 968-16-3634-1

Impreso en México



# PRELUDIO

Escribir un libro constituye toda una aventura que no podría yo poner en palabras (como no sean las del libro mismo).

Primero, se escoge un tema, algo que tenga uno que decir, se medita sobre él y se recoge la información para exponerlo.

El agua: es todo un tema.

De pronto se descubre que existen montañas de ideas y libros y artículos y cosas que uno mismo ha pensado. Luego viene escribirlo, ponerlo en unas páginas blancas que lo miran a uno en forma aterradora.

Pasado el tiempo —mucho tiempo— los escritos una y otra vez borroneados empiezan a tomar forma. Como la tierra, que al moverse arroja de su seno las piedras, el escrito va adquiriendo figura; sale lo inútil, lo que sobra.

Al terminar —todo debe en algún momento terminarse— quedan muchas cosas que todavía se antoja decir, pero si no se termina sería cosa de no acabar nunca.

Conocer el agua es amarla; más que de tierra somos de agua, así que conocerla es saber de qué formamos parte. El agua está ahí para nuestro uso, que más bien es abuso por unos y falta de uso por otros.

De lo que trata este trabajo es de la ciencia del agua, un poco más de dónde está y cuánta hay y, finalmente, cómo llega y cómo se va de las ciudades.

Mi ciudad, la de México, tiene su historia llena de agua; termino con ella por esto. El libro está escrito para leerse en el Metro, así que me he preocupado más por las descripciones y las ilustraciones que por otra cosa: ni es completo ni es profundo; es exacto en sus afirmaciones, al menos no hay errores de mala fe.

Empiezo pues con el agua.



# I. EL AGUA, ¿QUÉ COSA ES?

**agua** (del latín *aqua*); femenino.

1. Cuerpo formado por la combinación de un volumen de oxígeno y dos de hidrógeno, líquido inodoro e insípido; en pequeña cantidad incoloro y verdoso en grandes masas, que refracta la luz, disuelve muchas sustancias, se solidifica por el frío, se evapora por el calor y, más o menos puro, forma la lluvia, las fuentes, los ríos y los mares.

2. Cualquiera de los licores que se obtienen por infusión, disolución o emulsión de flores, plantas o frutas que se usan en medicina y perfumería (agua de azahar, de colonia, de heliotropo, de la reina de Hungría, de rosas). (*Diccionario de la Lengua Española*, Real Academia Española.)

SIGUEN 52 referencias a otros tantos vocablos del diccionario que aparecen en conjunción con la palabra agua.

También varios matices idiomáticos relacionados con el agua y expresiones que la invocan, por ejemplo "¡agua va!" (o, más recientemente, "aguas"), con la que se avisaba a los transeúntes cuando desde alguna casa iban a echar a la calle agua o inmundicias.

Otras expresiones, divertidas y sabias, son "ahogarse en un vaso de agua" (afligirse por motivos triviales), "coger el agua en un cesto" (trabajar en vano), "caer como el agua de mayo" (ser bien recibido), "echar agua al vino" (dulcificar la actitud), o "más agua a los frijoles" (para que alcancen), "echar un jarro de agua fría" (desalentar), "estar con el agua al cuello" (sumamente apurado), "hacersele a uno agua la boca" (ante algo delicioso), "llevar toda el agua a su molinito" (una persona que todo lo usufructúa en su provecho), "más claro que el agua" (algo evidente), "nadar (o navegar) entre dos aguas" (contemporizar con dos opiniones o tendencias opuestas), "parecerse como dos gotas de agua" (ser idénticos), etcétera.

Aquí no se trata de ampliar el conocimiento lexicográfico arriba resumido, cosa por otro lado para mí imposible de hacer, pues pocos temas me vienen a la cabeza sobre los que más pueda escribirse. Además no soy un experto ni con ese espíritu emprendí este trabajo. Mi propósito es poner al alcance del lector una información que se antoja comunicar: el agua es el elemento más maravilloso que conozco y con un poco de las varias cosas que diré espero despertar su curiosidad para investigar aún más sobre este fascinante campo.

Tales de Mileto, el filósofo griego del siglo V a.C., afirmó que el agua era la sustancia original, de la cual todas las demás (tierra, aire y fuego) estaban formadas. Anaximandro, unos años más tarde, y otros filósofos después, concluyeron que más bien hay una cierta proporción de fuego, aire, tierra y agua en el mundo, que cada uno lucha por extender su imperio y que se presenta la necesidad natural de restablecer el equilibrio. La consideración de Tales lleva mucha verdad en el sentido de que en todo hay agua; de hecho, Isaac Newton, en el siglo XVII, escribió su tratado *De Natura Acidorum*, en donde sostenía que todo cuerpo podría ser reducido a agua.

En el agua se originó la vida y de ella sigue dependiendo. Esto, por cierto, sucede porque el agua es una sustancia completamente fuera de lo común: es líquida en condiciones normales, cuando "debería" ser gaseosa, y su forma sólida flota sobre su forma líquida, cuando "debería" ser al revés; su forma líquida semeja más un sólido que un líquido ordinario. Cuando se congela se forma el hielo, o mejor dicho, alguno de los hielos, pues hay nueve distintos. ¡Vaya lío!

Con la excepción de productos exóticos, el agua es el mejor disolvente que existe (de sólidos, de líquidos y de gases). Si el agua no fuere así no podría sustentar la vida, pues gracias a esta propiedad conduce los nutrientes a los seres vivos y elimina sus desechos; además, lleva el oxígeno a los seres acuáticos.

El 71 por ciento de la superficie de nuestro planeta está cubierto por ella; millones de toneladas, en forma de vapor, flotan en la atmósfera y sin embargo grandes regiones terrestres carecen de ella.

Los seres vivos moran inmersos en el agua o en el aire. En su interior son, en gran medida, agua: en el agua se originó la vida y de ella sigue dependiendo.

La enorme presión de la actividad humana sobre la disponibilidad de este recurso en los asentamientos humanos, los centros industriales y los turísticos, y en las zonas agrícolas, exige de un gran esfuerzo para proveerla en la cantidad y con la calidad adecuada. El consecuente problema de las aguas residuales es de magnitud comparable.

¿Qué es el agua?, ¿cómo existe en la naturaleza y cómo es utilizada por los seres vivos? ¿Cómo llega y cómo sale de las ciudades? Conocer este elemento es necesario para apreciarlo, conservarlo y no deteriorarlo.

Es por las propiedades del agua, en particular por su gran capacidad de disolver otras sustancias, que es tan fácil maltratarla... hacerla inservible para la vida.

Para iniciar nuestra exploración y descubrir sus curiosidades debemos tomar un poco de agua y jugar con ella.

### I.1. ALGUNOS EXPERIMENTOS PARA CONOCERLA

El agua existe en nuestro mundo en tres formas, sólida, líquida y gaseosa. Un elemento tan importante para la vida merece un nombre para cada presentación: el sólido es el "hielo"; el líquido es "agua", así, nada más; y el gas es "vapor", aunque las tres formas son químicamente la misma cosa.





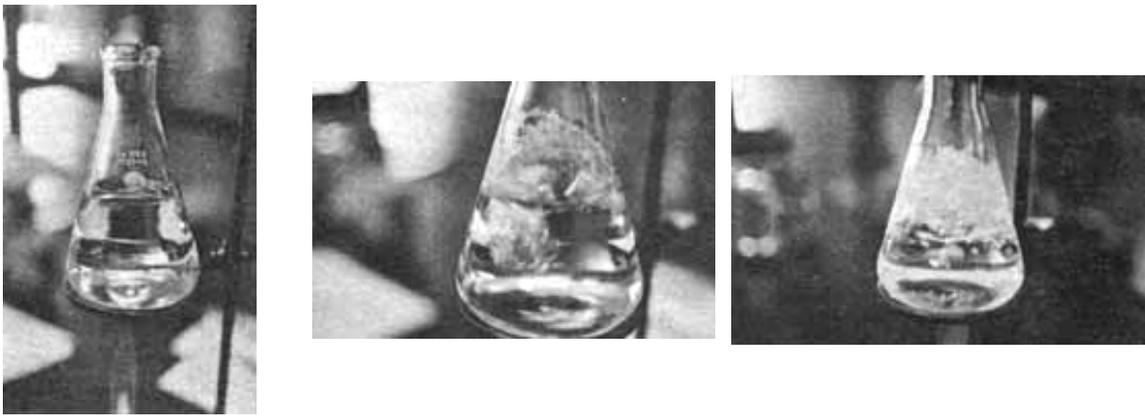
**Figura 1. El hielo exhibe las líneas trazadas por el gas que escapa en el proceso de solidificación (a). El vapor atmosférico se condensa en las mañanas sobre las superficies frías, como el cristal de un automóvil (b). El líquido se evapora al dar los rayos del Sol sobre el tejabán húmedo (c). Las tres formas del agua están presentes en nuestra vida diaria.**

En la naturaleza existe un cambio continuo entre cada forma (o "fase", como se le llama científicamente) del agua. Cuando llueve, el vapor se precipita en forma de líquido y cuando graniza el líquido, en su descenso a la Tierra, toma la fase sólida. Cuando nieva privan unas condiciones de humedad y de temperatura del aire tales que el vapor se precipita como sólido, en un proceso que los físicos llaman sublimación (en este caso inversa). Cuando hace mucho calor el agua líquida se evapora. En la naturaleza este continuo cambio es llamado el ciclo hidrológico, al que seguiremos un poco más tarde.

El primer experimento que podemos hacer con el agua es hervirla; observemos con atención: el recipiente ideal es uno de vidrio (cuide que sea resistente al fuego) pues así se podrá observar el fenómeno por todos los lados. Al poco rato de puesta en el fuego, la masa cristalina del agua empieza a enturbiarse, debido a que las capas inferiores al calentarse se deslizan hacia arriba y dejan caer a las superiores, que son más frías y pesadas. El movimiento, de tipo circular, se llama convectivo y sucede también en la atmósfera; por el mismo motivo las luces distantes parecen parpadear.

Más tarde empiezan a formarse burbujas, producto del desprendimiento de los gases disueltos en el agua (principalmente aire). El proceso se conoce como desgasificación.

Ya a punto de entrar en ebullición se forman borbotones, combinación de uno y otro efecto (convección y desgasificación). Si dejamos hervir el agua por un buen rato, ésta se enturbia, pues las sales que contiene disueltas se concentran en el líquido que queda. En resumen, el agua se mueve verticalmente por efecto del calentamiento, contiene gases disueltos, que son evidentes al desprenderse por causa del aumento de temperatura y, como también contiene sales que al hervir quedan disueltas en el líquido, es de suponer que el vapor estará libre de ellas. Esto último tiene gran importancia tecnológica, pues es una manera simple de obtener agua potable de la salada (que no lo es). Que el agua tiene movimientos convectivos y, sobre todo, que contiene oxígeno disuelto, es muy importante para la sustentación de la vida acuática. La capacidad del agua de disolver y transportar sales es lo que la hace indispensable para todo tipo de vida; el contenido de sales, sin embargo, debe estar comprendido dentro de ciertos límites, pues en exceso rompe el equilibrio celular y puede extraer las sales de las células y llegar a matarlas, paradójicamente deshidratándolas.



**Figura 2. El fenómeno tan frecuente de "hacer hervir el agua", visto con detenimiento muestra todos los procesos que suceden: las turbulencias por el calentamiento, el desprendimiento de los gases disueltos y, finalmente, la ebullición.**

Ahora juguemos con el hielo. Esta fase tiene interesantes propiedades; la más espectacular es que el líquido aumenta su volumen al congelarse. La prueba más sencilla es observar cómo el hielo desborda el nivel en una hielera (de las que hacen "cubitos" en el refrigerador). El aumento de volumen es tan grande y la presión ejercida es tan intensa que una botella cerrada dejada en el congelador puede estallar (experimento peligroso y no recomendable). Al aumentar el volumen del agua congelada su densidad disminuye y por esto el hielo flota; si ello no sucediese, los lagos y estanques se congelarían del fondo a la superficie eliminando toda la vida acuática. La presión ejercida por el hielo al expandirse puede romper un barco atrapado en los hielos del Ártico.



**Figura 3. Cuando el agua líquida se solidifica aumenta su volumen debido a la manera como se conglomeran las moléculas. Esto se puede notar en una hielera.**

Otro fenómeno interesante es el del rehielo. Tomemos un cubo de hielo y coloquémoslo en la boca de una botella. Por medio de un alambre delgado (lo más posible) suspendamos dos objetos pesados, por ejemplo dos tuercas, colgando de uno y otro lado del cubo. La presión que ejerce el alambre sobre el hielo hará que éste se hunda, pero al ir pasando, el hielo se congelará de nuevo de suerte que el alambre atravesará el cubo y éste al final quedará intacto. Aunque al pasar, el alambre funde al hielo, como la temperatura se mantiene constante, el líquido se

vuelve a solidificar.

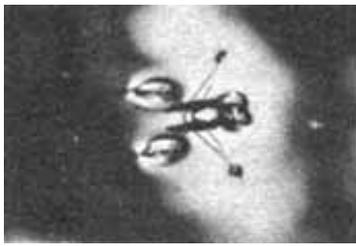
El agua tiene una curiosa estructura microscópica: a diferencia de un líquido normal, las moléculas poseen una particular tendencia a agruparse en una especie de "redes". El siguiente experimento pone esto en evidencia: tomemos un vaso y llenémoslo hasta el borde, cuidando de no derramar una gota. Con sumo cuidado dejemos caer clips en el seno del agua. La superficie empezará a crecer, rebasando el nivel de la boca sin derramarse mostrando cómo el agua se adhiere al vaso. La explicación es la fuerte cohesión de las moléculas del agua. Ahora tomemos el vaso, esta vez sin llenar y ,con cuidado, depositemos el clip en la superficie: a pesar de su peso, flotará. La razón es la misma. Una variedad interesante de este experimento es realizarlo con agua caliente; entre mayor sea la temperatura más difícil será el experimento debido a que la cohesión molecular disminuye. Otra forma de disminuirla es por la adición de un detergente: hay insectos que pueden caminar por el agua aprovechando el efecto de cohesión. Si capturamos uno de estos bichos, lo ponemos a caminar en la superficie del agua dentro de un frasco y añadimos detergente, llega un momento en que la pobre criatura se hundirá como una piedra.



**Figura 4. El clip puede flotar libremente en la superficie debido a la tensión superficial del líquido. En la antigüedad las brújulas se construían con una aguja imantada que flotaba sobre una palangana con agua, aprovechando este fenómeno.**

Si tratamos de repetir los anteriores experimentos con otro líquido, por ejemplo alcohol, encontraremos que no es tan fácil: la cohesión de las moléculas es mucho menor.

Si tomamos dos pedazos de vidrio, mojamos sus caras interiores y luego los unimos, será virtualmente imposible separarlos sin deslizarlos, pues la fuerza que se requeriría para retirarlos si jalamos perpendicularmente es muy grande; si se dejan secar podrán separarse sin dificultad: la cohesión de las moléculas del agua actúa como fuerza sujetadora.



**Figura 5. La tensión superficial se manifiesta en el soporte que ofrece la superficie del agua a los insectos.**

Si introducimos un tubo delgado en un recipiente con agua, ésta "trepará" por dentro de él; ¿la razón? una combinación de la cohesión de las moléculas con su adhesión a las paredes del tubo: las fuerzas de adhesión entre las moléculas del tubo y las del agua atraen a éstas a las paredes del tubo y ello da una curvatura a la superficie del agua. Pero esta forma requiere más energía que una superficie plana, así que la tensión superficial se encarga de contraer la superficie. El proceso se repite hasta que el peso de la columna de líquido impide que siga ascendiendo (por ello el experimento es más fácil cuanto más delgado sea el tubo).

Las anteriores experiencias ponen de manifiesto algunas de las peculiares propiedades del agua que, más adelante, veremos con mayor detalle. El mensaje de este capítulo es que el agua no es tan común y corriente como a veces parece.

## I.2. LO QUE SE HAN PREGUNTADO LOS CIENTÍFICOS

Los primeros pensadores reconocieron pronto que el agua es única. Aristóteles lo incluyó entre los cuatro *elementos básicos*, junto con la tierra, el aire y el fuego. Así, como *elemento*, fue considerada hasta el siglo XVIII, cuando la tierra y el aire también *dejaron de ser* "elementos" y la humanidad reconoció que estaban compuestos de complejas mezclas de especies químicas. Por su parte, el fuego, es una manifestación de la actividad química, no es otro elemento. Cupo el honor, en 1781, al científico británico José Priestley de sintetizar al último de los elementos aristotélicos, demostrando que, al igual que los dos primeros, también era una mezcla de especies químicas. Antonio Lorenzo de Lavoisier en Francia y Enrique Cavendish en Inglaterra, lograron descomponer el agua en sus dos componentes: "aire ordinario" (oxígeno) y "aire inflamable" (hidrógeno), estableciendo así los primeros pasos para su estudio científico.

Desafortunadamente la curiosidad científica, como todo en esta vida, tiene sus límites y, siendo el agua un elemento omnipresente, se concluyó que poco más había que conocerle, así, el tema pasó prácticamente al olvido para los grandes científicos del siglo XIX y los de principios del XX. Por ejemplo, en la clásica teoría de Debye y Huckel para interpretar las observaciones sobre las soluciones electrolíticas, es decir, aquellas en donde los sólidos disueltos adquieren cargas eléctricas, casi nada del esfuerzo teórico se dirige al agua, a la que se trata meramente como un medio en el que sucede la disolución y se la caracteriza por una constante; esta teoría, no obstante, está casi completamente basada en datos de soluciones acuosas.

La realidad física es otra: el agua es un líquido extremadamente complejo, tanto así que mucha de la dificultad para el estudio de las soluciones deriva de que el disolvente más accesible es precisamente el agua, que, lejos de ser un simple medio que pueda caracterizarse por una constante, interactúa tan fuertemente con los solutos que sus características deben necesariamente ser tomadas en cuenta.

Las propiedades del agua difieren mucho de las de los demás líquidos; es demasiado "sólida", para ser un líquido ordinario. En 1891, H. H. V. Vernon postuló que las moléculas de agua se adherían unas a otras, confirmando al líquido altas densidades. Guillermo Roentgen, descubridor de los rayos X, investigó las propiedades del agua, y aventuró en 1892 explicaciones cualitativas basadas en suposiciones moleculares. No obstante, ninguno de estos intentos despertó mayor interés en la comunidad científica. En 1933 dos grandes investigadores de los líquidos, Juan Bernal y Roberto Fowler publicaron un interesante y hoy clásico artículo proponiendo el primer modelo plausible del agua líquida, en el que se sientan las bases de los modernos estudios sobre el tema. En años subsecuentes se empezaron a medir con mayor sistematicidad sus propiedades. En 1940, N. E. Dorsey publicó

una monografía intitulada *Propiedades de la substancia agua ordinaria* en la que describe los trabajos de los anteriores 50 años y registra todas las anomalías que exhibe este líquido.

Por el resto de esta década hubo mayor actividad científica alrededor del "agua ordinaria": se investigaron sus propiedades estructurales por medio de rayos X y luz infrarroja, así como por la transmisión de ondas sonoras. Se reconoció que las interacciones entre el medio acuoso y los solutos son fuertes y se inició la interpretación en términos de las ligaduras entre los hidrógenos y el oxígeno que forman la molécula del agua. La década de los años cincuenta vio surgir un gran número de modelos fisicoquímicos; por fin en los sesenta el estudio del agua empezó a ser un campo aparte: se reconocieron estructuras extrañas, como asociaciones de moléculas en cúmulos dentro del seno del líquido; se investigaron con mayor profundidad las fuerzas moleculares que generan los hidrógenos del agua y cómo afectan éstas las propiedades observables.

Fue también en esta década cuando se formalizaron los estudios fisicoquímicos del agua, especialmente en el campo de la teoría de las soluciones. Así se empezaron a relacionar las observaciones macroscópicas con la interpretación basada en las teorías microscópicas. Ello condujo a W. Kauzmann a sugerir un nuevo enfoque al estudiar el papel del agua en la conformación de las proteínas, lo que llamó la atención de los bioquímicos al peculiar líquido en el cual se produce la vida.

En 1962, G. Nemethy y H. A. Scharega publicaron tres artículos en los que intentaron desarrollar un modelo basado en las consideraciones microscópicas de la mecánica estadística. Sus métodos y sobre todo la gran cantidad de parámetros que utilizaron han sido objeto de crítica, pero estos trabajos, aparte de mostrar la complejidad de la tarea, constituyen el primer intento de fincar una base cuantitativa en lo que hasta entonces había sido un camino lleno de empirismo.

El advenimiento de las modernas computadoras permitió abordar el estudio de la materia siguiendo nuevas rutas. Por medio de complejos programas de cómputo basados en la mecánica cuántica, llamados métodos *ab initio* (de principio), se han estudiado las interacciones entre las moléculas de agua, investigando pares y tríos de moléculas. Con ello se espera una mejor comprensión de la forma en que se conglomeran las moléculas y especialmente cómo influye la fuerte interacción entre los hidrógenos.

En la década de los sesenta el agua era ya un tema firmemente arraigado en la investigación científica, pero no se pasaba mucho de ahí. A la mitad de esa década el agua saltó a los encabezados de los periódicos: sucedió que el profesor B. V. Deryagin, del Instituto Karpof de Fisicoquímica de Moscú, sorprendió a la comunidad científica al publicar un hallazgo de una nueva y extraña forma de agua que fue dada a llamar poliagua. Esta variedad se suponía que llegaba a tener hasta 40% más densidad que el agua ordinaria y que congelaba a -40 grados centígrados y seguía siendo estable a los 500 grados. El descubrimiento fue recibido con escepticismo, pero la "comprobación" por instituciones en EUA desató gran entusiasmo por este compuesto, pues el hecho de permanecer líquida a altas temperaturas la haría un magnífico lubricante; además, por su alta densidad podría servir como moderador en reactores nucleares.

Todo esto, según se demostró más tarde, fue una mala interpretación de las observaciones y la poliagua, pasó a ser una anécdota científica más.

### I.3. ESE EXTRAÑO ELEMENTO, TAN COMÚN Y POCO CORRIENTE

El agua es la sustancia más extraordinaria. Casi todas sus propiedades parecen encontrarse al revés: es un líquido a temperatura ambiente cuando debería ser un gas; su forma sólida (hielo) flota en su forma líquida; lejos de parecerse a un líquido normal en el que sus moléculas se mueven con mucha independencia, en el agua existe un cierto orden colectivo, es decir, las moléculas se "pegan" unas a otras y ello le confiere valores extremadamente altos en su viscosidad, tensión superficial y calores latentes de evaporación y solidificación. El agua disuelve una gran variedad de sólidos, pero no reacciona químicamente con ellos; por eso pueden purificarse las aguas contaminadas, aunque a expensas de mucha energía.

En realidad poco se pone uno a meditar sobre estas discrepancias entre lo que es y lo que "debería" ser el agua, quizá por lo común de esta sustancia. Adentrándose un poco en la ciencia del agua, uno descubre que las sutiles interacciones moleculares son las responsables de tan curioso comportamiento; resulta que es la particular asociación de dos átomos de hidrógeno con uno de oxígeno lo que se traduce en las peculiaridades del agua; tal cosa no sucede con la molécula de ácido sulfhídrico, dos átomos de hidrógeno y uno de azufre, que, desde el

punto de vista químico podríamos considerar una molécula "hermana" de la del agua.

En efecto, el ácido sulfhídrico es perfectamente "normal" desde todos los mismos puntos de vista por los que llamamos "anormal" al agua: 1  es gas a temperatura ambiente, su forma sólida es más densa que su forma líquida y el líquido posee muy poca estructura.

Existen muchas y muy refinadas teorías para explicar sus propiedades: algunas pueden hacerlo con muchas de ellas pero ninguna con todas.

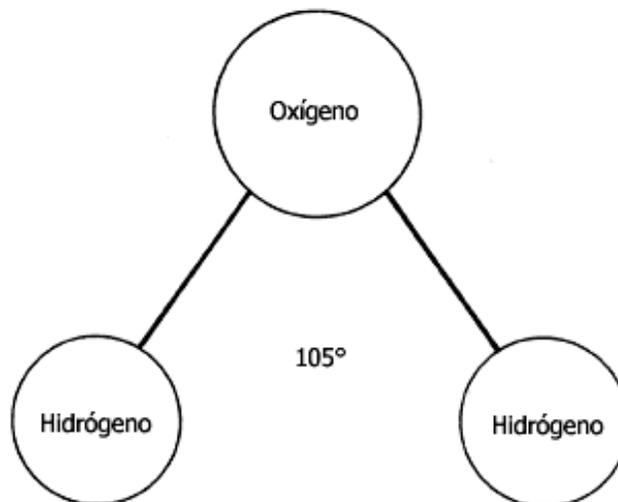
Hay dos grandes caminos para investigar la materia: la teoría microscópica y la teoría macroscópica, llamada también fenomenológica. La teoría microscópica da alguna explicación sobre el comportamiento de la materia, pero requiere de conceptos y matemáticas complicadas. La termodinámica macroscópica ayuda mucho pero, aunque muy elegante, no permite realizar cálculos detallados, así que para entender todas las propiedades hay que echar mano de una y de otra.

El estudio de las propiedades fisicoquímicas es importante porque esclarece muchos de los misterios sobre el comportamiento de esta nada común sustancia. La investigación sobre la naturaleza molecular ha mostrado que una de las principales claves, quizás la más importante, es la *ligadura de hidrógeno*.

El agua está formada por tres átomos, dos de hidrógeno (el elemento más ligero) y uno de oxígeno, dispuestos en un ángulo de 105 grados, con el oxígeno en el vértice; el ángulo no varía, ya esté la molécula formando parte de un sólido, un líquido o un gas. La distancia entre el átomo de oxígeno y uno de los de hidrógeno es de 0.96 angstrom (1 angstrom es igual a un cien millonésimo de centímetro).

Los átomos están formados por un núcleo que lleva prácticamente toda la masa del átomo, posee carga eléctrica positiva y está rodeado por una nube de electrones de carga negativa. Para asociarse, los átomos forman o ceden electrones hasta que adquieren la configuración más estable.

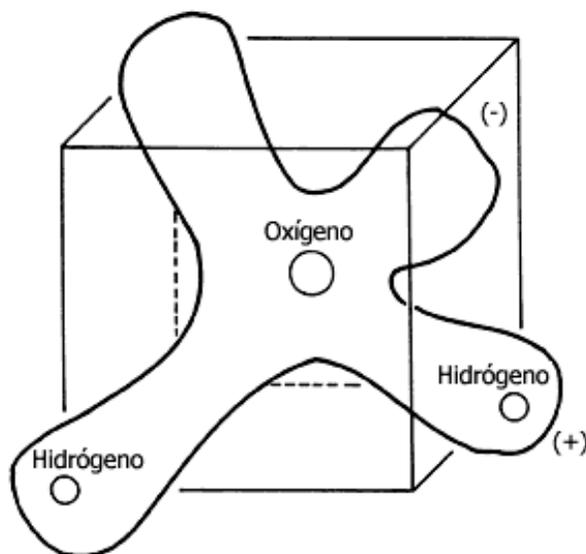
En una molécula de agua el oxígeno se liga con dos hidrógenos. El hidrógeno es el elemento más ligero; se halla formado por una sola partícula en el centro (un protón) y un electrón que lo rodea, así que al unirse el oxígeno a los hidrógenos pasan dos cosas: los electrones forman una nube alrededor de los tres núcleos, uniéndolos, pero los dos núcleos de hidrógeno se repelen. El resultado es que se forma el ángulo referido de 105 grados con el cual la molécula completa alcanza la máxima estabilidad.



**Figura 6.** La fórmula química del agua es H<sub>2</sub>O, que quiere decir que dos átomos de hidrógeno se ligan a

uno de oxígeno formando un ángulo de  $105^\circ$ , como se muestra en la figura.

La nube electrónica, por su parte, adquiere la forma que se muestra en la figura, que puede imaginarse contenida dentro de un cubo, con el oxígeno en el centro, los hidrógenos en los vértices opuestos de una cara y unas protuberancias que se proyectan en la cara opuesta, que son las nubes electrónicas. Estas nubes atraen a los átomos de hidrógeno de otra molécula de agua y dan lugar a lo que se conoce como una *ligadura de hidrógeno*.



**Figura 7.** Los átomos tienen unas *nubes* de electrones que los rodean; al formarse la molécula de agua estas nubes engloban los tres átomos dando lugar a la forma caprichosa que se muestra en la figura. Éste es el origen de la *ligadura de hidrógeno*, responsable de las propiedades del agua.

No es el agua la única molécula que tiene ligaduras de hidrógeno: el amoníaco, el ácido fluorhídrico y los alcoholes también la tienen. Lo que parece ser único en la estructura del agua es que las moléculas fácilmente se aglomeran en redes tridimensionales, con muchos huecos, cuya geometría depende del ángulo que forman los tres átomos componentes. Esto le confiere gran cohesión.

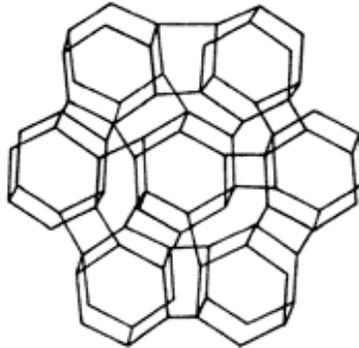
Esta estructura, por cierto, se mantiene en las fases líquida y sólida. Para un físico tal información es muy importante, pues puede relacionarla con las propiedades que observamos del agua. Por ejemplo, si en vez de estar los átomos dispuestos en un ángulo de  $105$  grados estuvieran alineados, el agua no sería tan buen solvente como en realidad lo es, y si así fuera, entre otras cosas no podría acarrear los nutrientes en los seres vivos. Si no tuviera la estructura que tiene no podría almacenar el calor en tan grandes cantidades como lo hace (la propiedad se llama capacidad calorífica) y así no serviría para regular la temperatura de los seres que vivimos inmersos en un medio de aire, en donde las variaciones externas de temperatura son tan altas.

Los átomos de los extremos (los hidrógenos) interactúan fuertemente con las moléculas de agua vecinas. En su fase gaseosa las moléculas están muy separadas para sentir entre ellas un efecto muy importante; así, encontramos normalmente moléculas aisladas y ocasionalmente dos moléculas unidas, pero en la fase líquida y en la sólida estas interacciones son muy importantes.

Al congelarse, las moléculas de agua forman rápidamente estructuras ordenadas. A la presión atmosférica

ordinaria, cuatro moléculas se asocian en la forma de un tetraedro, las que a su vez conforman una estructura de anillos hexagonales.

Ésta, por cierto, es una estructura muy poco empacada (con muchos huecos); es por ello que el agua sólida es menos densa que el agua líquida y por eso el hielo flota en el agua ordinaria.



**Figura 8. El hielo tiene una estructura cristalina muy ordenada en donde cuatro moléculas de agua forman tetraedros que se unen entre sí. Las cavidades de esta estructura explican por qué la fase sólida es menos densa que la líquida.**

Esta peculiar estructura tan *fofa* rige la variación que tiene la densidad del agua. Como en cualquier sustancia, ésta cambia con la temperatura, pero de una manera singular. A cuatro grados centígrados, muy cerca del punto de congelación, la densidad del agua alcanza su máximo valor. Esto no se observa en ningún otro líquido común, ni tampoco en los sólidos comunes. Sucede en sustancias de estructura elástica semejantes al hule.

Por esta misma razón, las masas de agua se congelan de la superficie hacia abajo. No quisiera dejar pasar esta observación sin reflexionar un poco sobre ella. Si el agua no fuese así, los océanos se congelarían en las zonas frías del fondo hacia arriba. Ello haría que durante el verano se deshelaran solamente las capas superficiales del mar; el fondo seguiría congelado y frío. Con el tiempo cada vez menos agua fluiría hacia los climas templados e iría perdiendo calor. Al fin todos los mares se convertirían en hielo.

La expansión del agua al congelarse tiene otro papel muy interesante en la naturaleza. En su forma líquida, penetra en los pequeños intersticios de las rocas por un efecto que discutimos en el capítulo de experimentos con el agua cuando se mencionó que asciende por un tubo pequeño introducido en ella y que se llama presión capilar y es consecuencia de su alta tensión superficial. Cuando se congela ejerce presiones tan altas que llega a fracturar las rocas, y de esta manera las convierte en tierra.



**Figura 9. El agua penetra a través de las fisuras de las rocas; al solidificar y aumentar su volumen ejerce una gran presión sobre la roca hasta que la desmorona.**

En su fase líquida, la tenaz interacción entre las ligaduras de los hidrógenos hace que se preserve un poco de la estructura del sólido; a ello me refería con la idea del "orden colectivo". Siendo así, "romper" la superficie del líquido es difícil, como cualquiera que haya caído en una alberca podrá haberse dado cuenta: ésta es una manifestación de la tensión superficial.

La estructura del agua líquida es tan extremadamente ordenada que la energía que se le suministra al calentarla se "absorbe" por las vibraciones moleculares, aceptando grandes cantidades de calor antes de elevar su temperatura (que representa el movimiento molecular). Inversamente, al perder energía su temperatura disminuye lentamente. Esta propiedad se llama calor latente, que para el agua es muy grande. Las implicaciones de este hecho son muchas y muy importantes.

Por ejemplo, para disipar la gran cantidad de calor que genera el motor de un automóvil se utiliza agua que circula por unos conductos dentro de él. El calor se transmite al agua y es después liberado en el radiador, que está construido de tal manera que el agua lo ceda rápidamente. Si el calor latente no fuese tan grande, el agua se evaporaría y no serviría para controlar la temperatura del motor.

En la naturaleza, los mares, y lagos atenuan los cambios de temperatura y favorecen la vida en su seno.

La enorme capacidad del agua para transportar calor puede exhibirse mediante un cálculo sencillo: si un kilómetro cúbico de agua en un océano fluye de una región caliente a otra muy distante que se halla 20 grados centígrados más fría, la transferencia de calor es de diez billones (10 con trece ceros) de kilocalorías que es equivalente al calor generado por la combustión de 2 millones de toneladas de carbón.

José Black fue un científico británico del siglo XVIII, el primero que se detuvo con gran cuidado a meditar acerca de esta importante propiedad; la llamó "calor latente". Puesto que una masa de hielo en un ambiente cálido se derrite, ¿cómo es así que no lo hacen los glaciares y las nieves perpetuas? Aunque de hecho hay transformación de hielo (o nieve) en agua, ella no es súbita, menos aún cuando existen grandes masas de uno u otra. Más aún, Black analizó cómo en el verano puede guardarse un cubo de hielo en "las estructuras denominadas casas de hielo" (los primeros refrigeradores o "hieleras") en donde se impide la entrada del aire exterior y por consiguiente el calor penetra con lentitud. La clave, pues, está en que el hielo tiene la capacidad de absorber grandes cantidades de calor y que éste pasa a las vibraciones moleculares; al derretirse al fin el hielo va a la fase líquida, pero con una temperatura cercana (aunque un poco más alta) a la del hielo.

Black, en lenguaje claro e intuitivo lo resume:

Salta a la vista, pues, que el hielo, al derretirse, recibe calor con mucha celeridad; pero el único efecto de dicho calor es mudarlo en agua, la cual no es sensiblemente más caliente de lo que era el hielo antes. Si, en seguida de derretido el hielo, se aplica un termómetro a las gotas o chorrillos de agua, éste marcará la misma temperatura que cuando se aplica al hielo

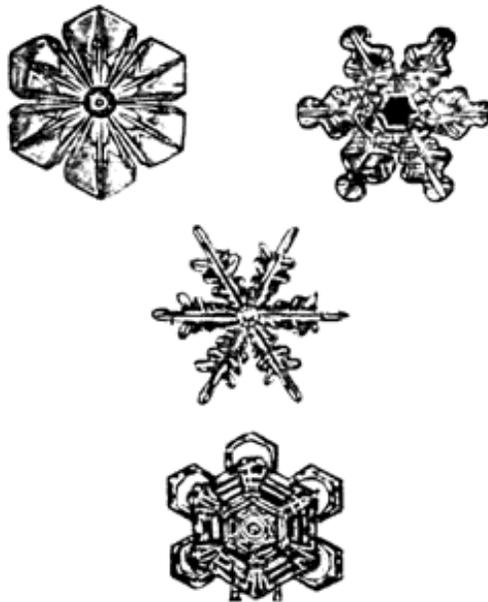
mismo, o de haber alguna diferencia, ella es de tan poca monta que no merece notarse.

Black prosiguió sus experimentos con el agua en ebullición y pudo observar un fenómeno semejante, de manera que:

[...] el calor absorbido no calienta los cuerpos circundantes, sino que convierte el agua en vapor. En ninguno de los dos casos nos percatamos de la presencia del calor como causa del calentamiento. El calor está oculto o latente; y yo lo denomino *calor latente*.

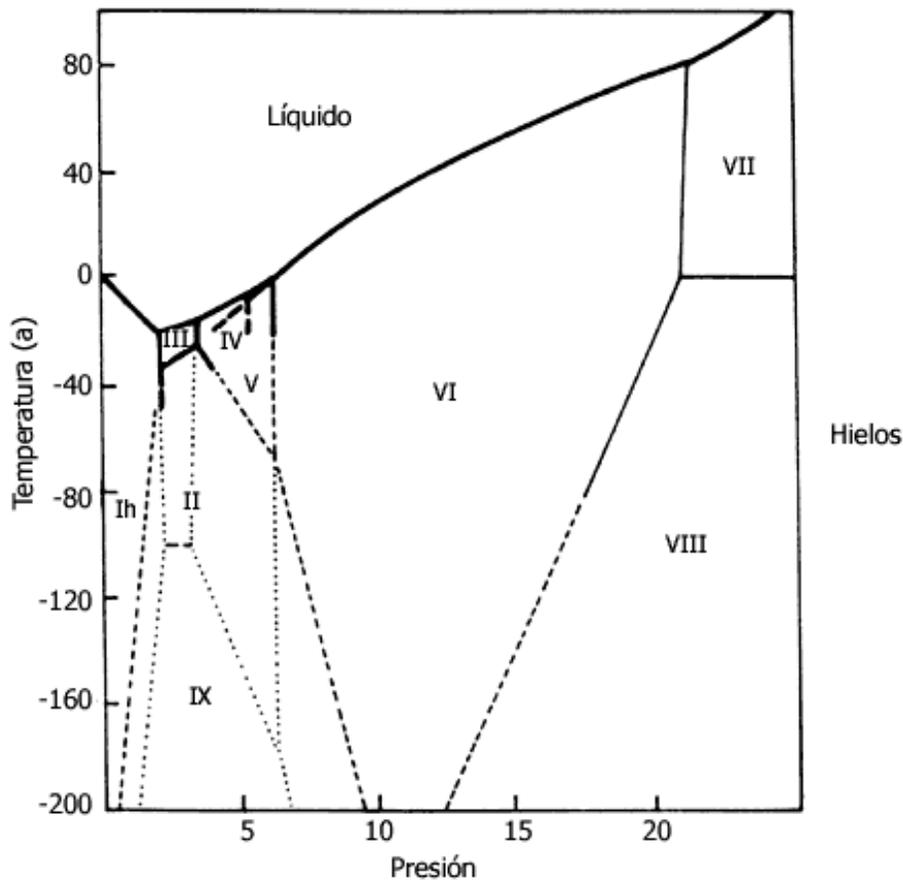
Los estudios sistemáticos del hielo fueron iniciados en la primera mitad de este siglo por el británico Percivaldo Bridgman y el alemán Jorge Tamman. Sus experimentos mostraron que el hielo es una compleja estructura que tiene formas estables y metaestables que pueden cambiar de unas a otras.

La mayor parte de la gente habla del hielo refiriéndose a la forma sólida que toma el agua cuando se congela en las condiciones normales de un refrigerador doméstico. Empero, en el laboratorio se producen otras variedades de hielos, aparte de los tradicionales "cubitos".



**Figura 10. La estructura hexagonal de las moléculas de agua se manifiesta en las formas con la misma simetría hexagonal de los copos de nieve.**

En la figura se muestra un mapa, o un diagrama de fases del hielo, del que existen *nueve* formas distintas, cada una de ellas con una cristalización peculiar. La razón por la que no observamos frecuentemente estos hielos es que existen a temperaturas muy bajas.



**Figura 11.** Para representar las transformaciones entre los distintos tipos de hielo, los científicos elaboran estos diagramas. Cada región representa las condiciones de temperatura y presión en donde se presenta cada uno de ellos. La línea gruesa marca la frontera entre el líquido (parte superior) y los hielos (parte inferior).

El hielo normal, denominado Ih, tiene una estructura hexagonal, y de él hay una variedad que se llama hielo cúbico o Ic que es una especie metaestable <sup>[No]</sup> que ocurre entre los -80 y -120 grados centígrados. Este hielo cúbico no puede producirse solamente bajando la temperatura a un hielo normal Ih, pues su misma metaestabilidad lo impide; hay que llegar por otro camino: condensando vapor a -80 grados centígrados. Del hielo IV se sabe muy poco, salvo que es una forma metaestable que puede coexistir con el hielo V.

Otra forma de hielo parece surgir al enfriar agua líquida al vacío (es decir, en ausencia de aire). Lo que se obtiene es hielo más pesado que el agua aunque su existencia todavía está por demostrarse.

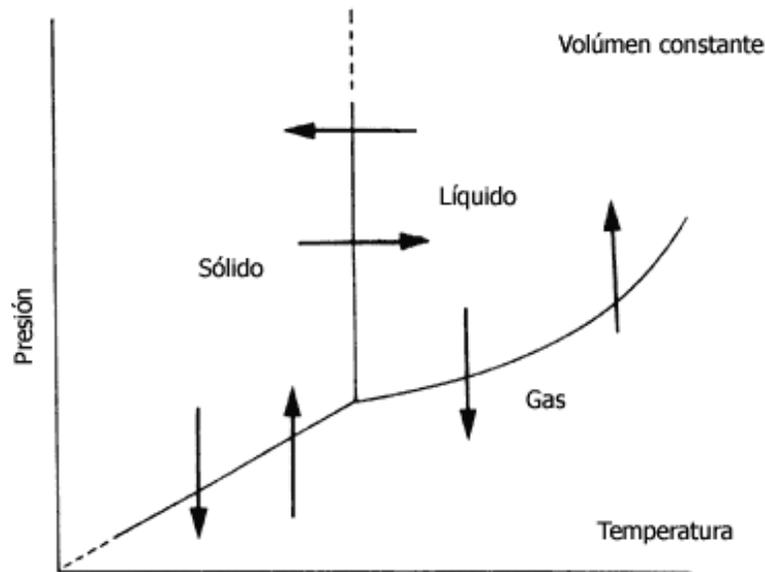
Como puede observarse del diagrama, los hielos II, VIII y IX no se encuentran próximos al líquido y por tanto no pueden producirse de él; han de obtenerse enfriando los hielos III, V, VI o VII a presión, o descomprimiendo a temperatura constante uno de ellos. Así, el hielo II normalmente se prepara a partir del hielo V por descompresión a -35 grados centígrados y el hielo IX enfriando el hielo III a -100 grados centígrados.

Una característica de todos los hielos es su arreglo cristalino en el que cada oxígeno se liga por hidrógenos a cuatro oxígenos vecinos. En el hielo I la estructura es tetraédrica pero, a medida que se eleva la presión, el ángulo entre el hidrógeno y el oxígeno se distorsiona, acercando a los oxígenos vecinos.

Aun cuando la anterior descripción puede pasar por una simple curiosidad científica, el estudio de los cambios en los arreglos de estructura es más fácil de tener en un sólido que en el líquido. El agua, recordemos, tiene una estructura muy ordenada, de modo que las observaciones del hielo han servido grandemente para estudiar al

líquido, para el cual han heredado parte de los términos.

Normalmente pensamos en las tres formas físicas del agua, hielo, líquido y vapor, como si fueran tres cosas distintas, aunque de hecho no nos es desconocido que son lo mismo. Para conocerla un poquito más caminemos por el mundo de los cambios de fase, con un mapa llamado *diagrama de fases* en la mano.



**Figura 12. Un *diagrama de fases* es una representación matemática de lo que sucede en la naturaleza. Los científicos lo utilizan para describir los procesos de transformación entre las fases, como los que se describen en el texto.**

Las direcciones en las que nos podemos mover son tres, como en el mundo que vivimos: en este caso, en vez de largo, ancho y alto hay presión, volumen y temperatura. En este mundo, sin embargo, cuando se dan valores a dos dimensiones la tercera queda fija automáticamente.

El gas, al que llamamos comúnmente vapor, es una fase en donde las moléculas están muy distantes unas de otras. Prácticamente son ajenas a las interacciones moleculares y no existe orden. Esta fase, sin embargo, comienza a adquirir propiedades nuevas cuando se disminuyen la presión o la temperatura, lo que resulta en una contracción, haciendo que las moléculas "sientan" la influencia de otras. Esta puede llevar al líquido, en cuyo caso se presenta una *condensación*, o al sólido, que es una *sublimación inversa*.

El sólido es la otra cara de la moneda: reina el orden. Las moléculas de agua se agrupan en estructuras bien definidas, normalmente hexagonales. Existe una limitada agitación molecular que disminuye con la temperatura aunque nunca cesa por completo, ni en el cero absoluto.

Si se calienta el hielo se derrite en un proceso llamado *fusión*, y llega al líquido. Los líquidos son estructuras intermedias entre el orden del sólido y el total desorden del gas. Normalmente el orden persiste tan sólo localmente, pero el agua es la gran excepción: su líquido tiene la mayor estructura de todas las sustancias normales. El líquido se *evapora* constantemente, es decir, las moléculas en su seno tienden a escapar al gas, en donde hay menores atracciones entre ellas (más desorden), aunque las moléculas vecinas intentan por lo contrario retener a las prófugas.

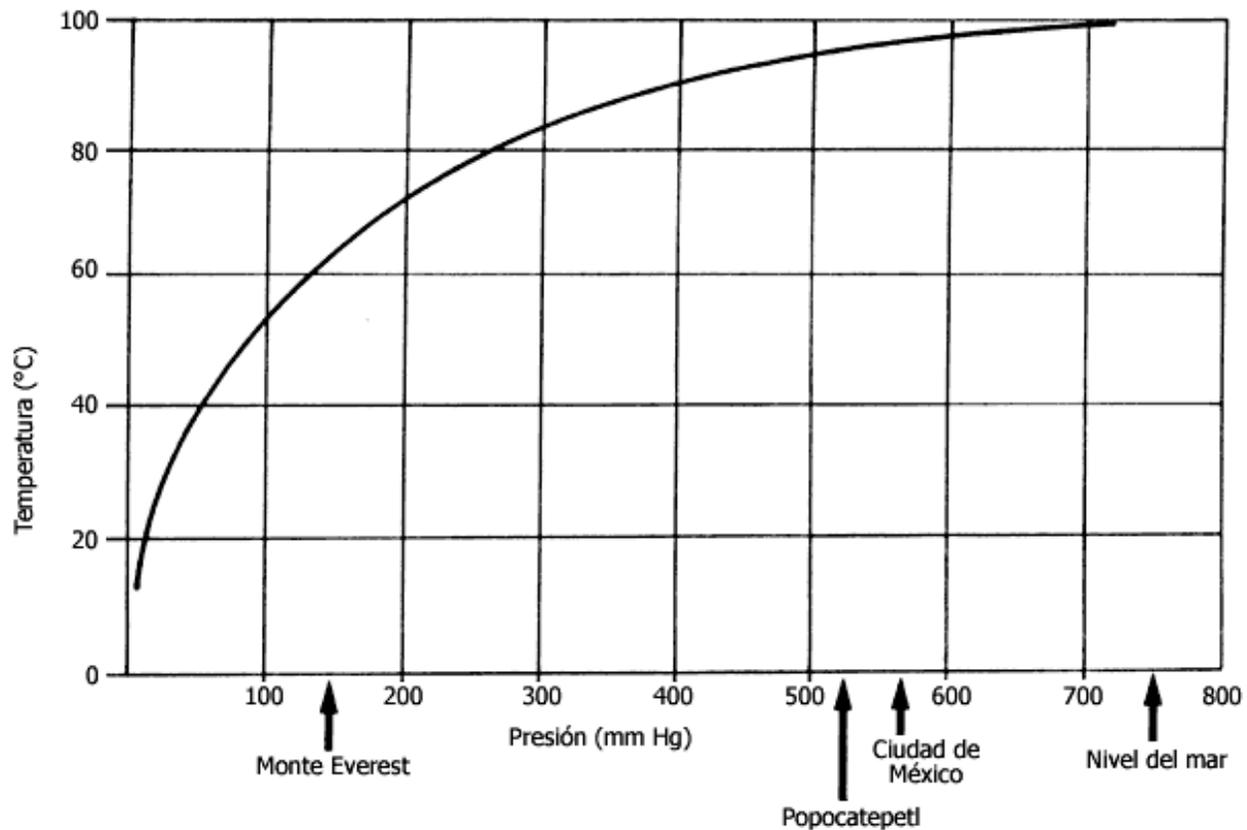
La retención se llama *cohesión*, su medida es la *tensión superficial* y requiere de energía para romperse. Por consiguiente, cuando una molécula al fin consigue incorporarse al gas se lleva consigo parte de la energía del

líquido, enfriándolo ligeramente. Esto puede acelerarse si se agita el agua, pues ello rompe la tensión superficial y se forman burbujas llenas de vapor. Este fenómeno se llama *cavitación* (del latín *cavitas* = hueco).

La evaporación del agua brinda la humedad al aire. Si el aire está muy seco el proceso será rápido, hasta llegar a saturar la humedad ambiental, en cuyo momento se detiene. Por eso si se disipa la humedad superficial continúa evaporando el líquido y disminuyendo su temperatura, razón por la que es más baja cuando sopla viento.

En el momento en que la temperatura llega a 100° C (al nivel del mar) el líquido *ebulle* hasta convertirse íntegramente en vapor. Para poner en ebullición un litro de agua se requieren 539 kilocalorías (abreviado kcal); en tanto no se suministre esa energía el agua se irá calentando pero no hervirá.

La temperatura de ebullición depende de la presión atmosférica. Por ejemplo, al nivel del mar el agua hierve a 100 grados centígrados, en la ciudad de México (2 km de altitud) a 92.6, en la cumbre del Popocatepetl a 82 y en la del monte Everest a poco menos de 70. Se puede tener agua hirviendo a 0 grados centígrados, pero habría para ello que bajar la presión a 4.6 mm Hg.



**Figura 13.** La temperatura de ebullición del agua (y de cualquier otra sustancia) depende de la presión, como se ilustra en la figura.

Los líquidos pueden aceptar ciertas cantidades de gases y sólidos en su seno: esto se conoce como *disolución*: no todo sólido o gas puede incorporarse a un líquido, ni en cualquier cantidad. Al límite de concentración de un soluto (la sustancia que se agrega) en un solvente (la que recibe) se llama solubilidad. Esta propiedad puede modificarse por la temperatura y por la presión.

La propiedad de disolución se conoce desde la antigüedad. Los alquimistas buscaron una sustancia que disolviese todas las demás. Esta sustancia no existe, pero lo más cercano a ella es el agua. Además, el agua es extremadamente corrosiva, una de las más corrosivas... y no obstante es fisiológicamente inocua.

Los gases se disuelven en los líquidos en distintas cantidades. Por ejemplo el agua disuelve inmensas cantidades de ácido sulfhídrico y bióxido de carbono. El amoníaco es también muy aceptado (100 gramos en medio vaso de agua). Aunque el oxígeno y el nitrógeno se disuelven con mucha menos facilidad (0.07 y 0.03 gramos por litro, respectivamente), ello es muy importante para la vida acuática, pues aunque hay un centésimo de gramo de aire por litro, éste es suficiente para los peces.

El agua, dentro de sus particularidades, parece haber sido pensada como el líquido de la vida: disuelve los nutrientes que necesitan los seres vivos (mejor que cualquier otro líquido), regula la temperatura tanto del medio ambiente como del interior de los organismos, favorece el crecimiento y da cuerpo a las estructuras vivas: la turgencia de las plantas se debe a su contenido de agua. Es el elemento más común y, sin embargo, no siempre se encuentra en el sitio requerido y con la pureza adecuada.

Invito ahora al lector a recorrer nuestro planeta en busca de agua.



[Nota 1] [

1 En realidad, el agua solamente es anómala a temperaturas y presiones bajas, pero puesto que en esas condiciones vivimos, para efectos prácticos no haré distinción.

---

**Inicio** |

---

[Nota 2] [

2 Metaestable = que puede existir pero cualquier cambio pequeño destruye esta estructura; en contraposición, si fuese estable no se alteraría fácilmente. Una estructura inestable está prohibida por las leyes de la física.

---

**Inicio** |

---

## II. EL AGUA EN NUESTRO PLANETA

### II.1 ¿DE CUÁNTA AGUA ESTAMOS HABLANDO?

DESDE el espacio sideral a 160 000 km, nuestro planeta destaca en el fondo negro del vacío como una esfera azul, cruzada por las manchas blancas de las nubes. Tres cuartas partes de su superficie la cubren los mares y los océanos y de las tierras emergidas una décima parte la cubren los glaciares y las nieves perpetuas.

El agua conforma todo el paisaje del planeta: aparente en ríos, lagos, mares, nubes y hielos; sutil en la humedad superficial; notada sólo en el rocío de la madrugada; oculta dentro de la corteza terrestre misma en donde hay una gran cantidad, hasta cinco kilómetros de profundidad. En esta sección daremos una idea de la magnitud de los recursos acuáticos.

El volumen de agua en nuestro planeta se estima en unos 1 460 millones de kilómetros cúbicos. Un kilómetro cúbico es un volumen muy grande: mil millones de metros cúbicos, es decir aproximadamente toda el agua que llega a la ciudad de México durante nueve horas; así que, si pudiese bombearse toda el agua de la Tierra por nuestra ciudad tendrían que pasar un millón quinientos mil años.

Noventa y cuatro por ciento del volumen total del agua existente en la Tierra está en los mares y océanos, cuatro por ciento dentro de la corteza terrestre, hasta una profundidad de 5 km. El resto en los glaciares y nieves eternas, en lagos, humedad superficial, vapor atmosférico y ríos.



**Figura 14. La presencia del agua realza la belleza del paisaje.**

En cantidades absolutas, sin embargo, las cifras son enormes. En la tabla se resumen éstas:

Por supuesto estas cifras sólo tienen el propósito de dar una idea de la ma

---

En los océanos y los mares	1 370 000 000	Km <sup>3</sup>
En la corteza terrestre	60 000 000	"
En los glaciares y nieves perpetuas	29 170 000	"
En los lagos	750 000	"
En la humedad del suelo	65 000	"
En el vapor atmosférico	14 000	"
En los ríos	1 000	"
<hr/>		
TOTAL	1 460 000 000	Km <sup>3</sup>
<hr/>		

gitud del recurso. De hecho, los científicos que las han estudiado consideran que sus cálculos fácilmente tienen un error de 10 a 15% o más. Ello se debe principalmente a que las aguas están en continuo movimiento: se evaporan, se condensan, se filtran por la tierra o son arrastradas por los ríos al mar, los hielos de los polos se rompen, migran y se funden...

Por ejemplo, refiriéndonos tan sólo a la evaporación, anualmente de los océanos se van a la atmósfera 449,000 km<sup>3</sup> (que si pasaran en forma de agua líquida a través del suministro a la ciudad de México tardarían en hacerlo 461 años con 4 meses y unos cuantos días).

¿De dónde salió tanta agua?

La Tierra se formó hace unos 5 000 millones de años por la conglomeración de partículas sólidas. La desintegración de las especies radiactivas y la conversión en calor de la energía cinética y potencial del polvo que formó al planeta elevó la temperatura hasta formar un núcleo líquido de metales que se enfrió liberando gases volátiles que formaron una atmósfera de agua, gases de carbón y de azufre y halógenos (flúor, cloro, bromo y yodo). Se calcula que este proceso tomó 500 millones de años.

Cuando la temperatura era de 600 grados centígrados, casi todos esos compuestos estaban en la atmósfera, pero al descender por debajo de 100 grados centígrados, el agua y los gases ácidos se condensaron, reaccionando con la corteza terrestre y formando los primeros océanos.

Los mecanismos por los que esto sucedió son todavía un gran misterio, aunque se han sugerido dos caminos: un enfriamiento rápido por el cual el agua y el ácido clorhídrico se condensaron formando océanos calientes y ácidos que reaccionaron vivamente con la corteza, o un enfriamiento lento en el que el agua fue atrapada de la atmósfera por las rocas: en este segundo caso la atmósfera habría sido rica en bióxido de carbono y no habría habido océanos, siendo nuestro planeta como ahora es Venus; los océanos en este caso se habrían formado más tarde.

En todo caso la presencia de bacterias y posiblemente algas en rocas de hace 3 000 millones de años indica que para ese tiempo la temperatura era ya inferior a 100 grados centígrados y ya se habían formado los océanos.

Además, es muy probable que los gases ácidos originales hubiesen sido ya neutralizados por las reacciones con los minerales de la corteza y que ya no hubo más liberación de ellos. Así que la composición de los océanos muy probablemente ha sido la misma desde entonces. Los principales compuestos disueltos en el agua de mar se muestran en la siguiente tabla:

### Principales constituyentes en un kilogramo de agua de mar

<i>Compuesto</i>	<i>Peso (gramos)</i>	<i>Proporción en el contenido</i>
------------------	----------------------	-----------------------------------

*total de sales (%)*

---

Cloro	18.980	55.044
Sodio	10.556	30.613
Sulfatos	2.649	7.682
Magnesio	1.272	3.689
Calcio	0.400	1.160
Potasio	0.380	1.102
Bicarbonatos	0.140	0.406
Bromo	0.065	0.189
Acido bórico	0.026	0.075
Estroncio	0.013	0.038
Flúor	0.001	0.003
Agua	965.518	0.000
	<hr/>	<hr/>
	1 000.000	100 000

---

El único compuesto que faltaba en aquel entonces era el oxígeno, pues este gas no provino del enfriamiento de la corteza. Las primeras cantidades de oxígeno se formaron por la fotodisociación del agua, es decir, por el rompimiento de moléculas de agua por la acción de los rayos ultravioleta del Sol.<sup>3</sup> [No] Más tarde, cuando hubo organismos capaces de efectuar la fotosíntesis, se enriqueció la atmósfera en este compuesto.

El volumen total del agua en el planeta ha permanecido estable desde ese entonces.

El balance local entre tierra y mar es otra cosa: de hecho, en los últimos dos y medio millones de años los cambios han sido grandes, incluyendo destacadamente varios avances y retrocesos de los glaciares. La principal causa de estos cambios se ha debido al clima. Hasta ahora la climatología ha sido dictada fundamentalmente por las fuerzas naturales, pero la creciente actividad industrial humana caracteriza el régimen de balance de agua y calor con una gran inestabilidad. Por ejemplo, las observaciones del nivel promedio del mar en los últimos 60 a 80 años muestran un incremento promedio anual de 1.2 milímetros: ello implica que 430 km<sup>3</sup> de reservas acuáticas de la Tierra están pasando al mar cada año.

Este proceso podría verse acelerado por la creciente generación de energía y su consecuente descarga de calor a la atmósfera en la región de tierra, pues podrían provocarse redistribuciones de precipitaciones pluviales y movimientos de las capas de hielo.

Finalmente, un comentario sobre la composición del agua en nuestro planeta. El agua "incolora, inodora e insípida" es aquella químicamente pura. En la naturaleza no hay tal: justamente por la gran capacidad de disolución de este líquido.

Su "presentación" en los anaqueles del planeta varía, desde agua con un enorme contenido de sólidos (como el agua salada de los mares) hasta otra potable, sin contar la contaminada a la que me referiré más adelante.

Y algo sobre la composición del agua. El agua de mar tiene en promedio 3.5% de sales disueltas, cuyos extremos se encuentran en el Mar Muerto, que tiene 30%, y en el Golfo de Finlandia que tiene 0.3%. Los hielos que se forman del agua marina tienen un proceso natural de desalación: cuando se forma, puesto que es agua de mar congelada, incorpora el 3.5% de sales, pero para el verano la salinidad baja a 0.4%; y si el hielo subsiste un año, su salinidad puede llegar a 0.1%.

Al evaporarse, el agua pierde sus sales, de modo que el agua atmosférica es dulce (sin sales). Al precipitarse y fluir por la tierra y los ríos corre como agua dulce, aunque su capacidad de disolución hace que incorpore las sales que encuentra a su paso, así que puede tornarse muy salada.

La salinidad de un río (que varía grandemente) es, sin embargo, aproximadamente 300 veces menor que la del mar. De cualquier suerte, hay un movimiento natural de agua entre tierra y mares que se llama ciclo hidrológico.

## II.2. CÓMO CIRCULA EL AGUA EN EL PLANETA: LA EVAPORACIÓN

El agua en nuestro planeta está en continua transformación: se evapora, cae en forma de lluvia, se filtra por la tierra y fluye en los caudales de los ríos. A grandes altitudes o en las latitudes altas se halla presente en forma de hielo o nieve y éstos, a su vez, se transforman también. La ciencia de la hidrología estudia todos estos movimientos y sus observaciones conforman lo que se conoce como el ciclo hidrológico. Este comprende todos los desplazamientos del agua que forman varias trayectorias que alcanzan 15 kilómetros de altitud, en las nubes más altas y hasta profundidades de 1 kilómetro, en las infiltraciones más profundas.

En el ciclo hidrológico están presentes muchos fenómenos físicos: el agua se evapora de la tierra y los océanos; el vapor de agua flota por su baja densidad y es arrastrado por las corrientes de circulación de aire atmosférico hasta que finalmente se precipita como lluvia, granizo o nieve. El agua que cae puede ser interceptada y asimilada por las plantas y de ellas ser transpirada y devuelta a la atmósfera; puede fluir por la tierra hacia corrientes o ríos o filtrarse a depósitos subterráneos o bien llenar las depresiones formando lagos, de donde más tarde se evaporará de nuevo. La figura muestra esquemáticamente todos estos procesos.



**Figura 15. El agua en la naturaleza está en constante transformación. El ciclo hidrológico es la representación de este cambio.**

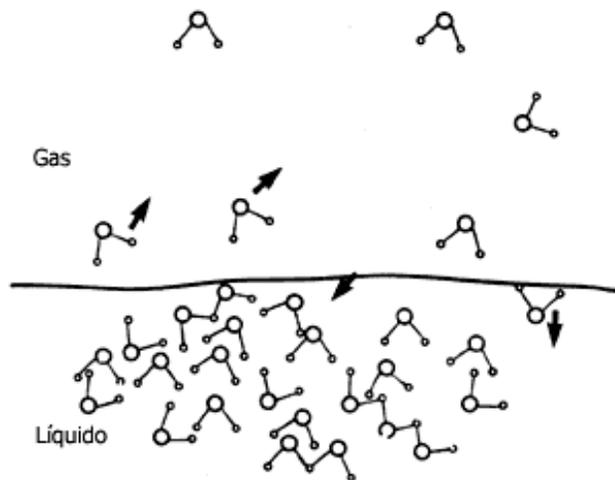
La cantidad de agua comprendida en el ciclo hidrológico permanece esencialmente constante, aunque localmente cambia y mucho. El comportamiento del ciclo hidrológico lo dicta fundamentalmente el clima y éste varía de

lugar a lugar y también en el tiempo. Más aún, existen factores locales, como el cambio de vegetación o la ocurrencia de fenómenos geológicos (como la actividad de un volcán) que pueden afectar grandemente al ciclo hidrológico. La actividad humana, por su parte, tiene una gran influencia: el crecimiento de las ciudades y la interrupción de ríos por presas o sistemas de riego afecta también el movimiento natural del agua.

El ciclo hidrológico evidentemente no tiene principio ni fin puesto que los muchos procesos que lo componen están interconectados. Así que, para empezar, cualquier lugar es bueno y podemos hacerlo por el proceso de evaporación, que es el que lleva la humedad de la superficie del planeta a la atmósfera.

La *evaporación* es un intercambio de moléculas entre un líquido y un gas; el fenómeno inverso se llama condensación. El balance entre la evaporación y la condensación depende de la temperatura del líquido, de su pureza, de la humedad del aire (es decir de cuánta agua disuelta hay en él) del viento y de otros factores.

Para comprender el proceso de evaporación podemos imaginar lo que sucede en el ámbito microscópico: en todos los cuerpos las moléculas se hallan en movimiento continuo, tanto más vivo cuanto mayor sea la temperatura del cuerpo. Cuando un líquido y un gas están en contacto a través de una superficie, algunas de las moléculas del líquido consiguen escapar hacia el gas en tanto que otras de éste son atrapadas por el líquido, las moléculas que consiguen escapar constituyen la evaporación y las que son atrapadas por el líquido forman la condensación. Fenómenos semejantes suceden entre el hielo y el aire.



**Figura 16. Las moléculas están en continuo movimiento, en el gas se hallan más libres y su movimiento es más agitado, en tanto que en el líquido experimentan mayores atracciones entre ellas: mientras unas "caen" al líquido, otras "escapan" al gas, manteniendo el número constante en uno y otro.**

En general las atracciones son más intensas en el líquido que en el gas: en éste las moléculas se encuentran prácticamente libres de manera que las moléculas del líquido deben adquirir la energía suficiente para pasar de un medio más "pegajoso" a otro libre; además, al escapar la molécula se lleva consigo la energía de movimiento que adquirió, reduciendo la energía total del líquido.

Así que, para que se produzca y mantenga el fenómeno de evaporación, es necesario que una fuente externa de calor suministre la energía necesaria que será menor en la medida que las moléculas tengan ya de por sí mayor movimiento, es decir, mayor temperatura. La fuente principal de calor para evaporar el agua en la naturaleza es el Sol.

Los procesos de evaporación y condensación compiten entre sí estableciendo un cierto equilibrio, aunque el

proceso de evaporación se produce con mayor celeridad y, en general, hay una transferencia neta de moléculas del líquido al gas.

La capacidad del aire para recibir más de las moléculas que escapan del líquido varía de acuerdo con su saturación de humedad: la evaporación predomina sobre la condensación mientras la humedad relativa del aire es baja y el proceso esencialmente se detiene cuando llega al 100%. Cuando esto ocurre, el número de moléculas que escapan del líquido es esencialmente igual al que regresa por lo que el proceso de evaporación y el de condensación se equilibran.

En una situación real, un lago por ejemplo, existen varios fenómenos entrelazados que gobiernan la evaporación del agua. Desde luego, la temperatura del líquido constituye un factor muy importante, pero la evaporación se verá afectada por otras causas.

El viento actuará de varias maneras: al eliminar las moléculas que acaban de escapar del líquido impedirá que regresen por condensación y habrá otras que ocupen su lugar. Si el viento es caliente proveerá mayor energía para acelerar el proceso de evaporación, pero si es frío detendrá el proceso quizás hasta invertirlo, favoreciendo la condensación. Este fenómeno se conoce como *advección*.

Los sólidos disueltos en el agua también afectan la evaporación pues introducen atracciones adicionales en el seno del líquido que hacen que las moléculas se "peguen" más. Aproximadamente, en el agua por cada 1% de salinidad, se reducirá en 1% la evaporación; así, el agua marina con 3.5% de sales disueltas se evapora 3% menos que el agua dulce. Otro efecto de la materia disuelta en el agua es que refleja la radiación solar y por consiguiente reduce la cantidad de energía transferida a ella. El resultado es una menor evaporación.

El agua no solamente se evapora de las superficies líquidas libres, como las de lagos y mares. Todo cuerpo húmedo intercambia su contenido de agua con el aire de los alrededores de forma esencialmente idéntica a la descrita, salvo que existen fuerzas adicionales que modifican este proceso.

En un suelo húmedo, por ejemplo, las moléculas de agua están sometidas, además de a la atracción entre sí, a la atracción de las moléculas de la Tierra, lo que reduce la velocidad de evaporación. Además existe menor cantidad de agua en contacto con el aire que en una superficie líquida, de manera que para mantener una evaporación constante es necesario que de capas más profundas de la Tierra salga agua en mayor cantidad que la que haya en el aire que la recibe. Cuando baja mucho el contenido de humedad de la Tierra o sube mucho el del aire la evaporación cesa.

Los primeros cinco centímetros de la capa de tierra ejercen un control definitivo en el ritmo de la evaporación, pues cuando la tierra está completamente seca no produce evaporación ya que la superficie actúa como aislante. El subsuelo puede estar completamente húmedo, pero el movimiento vertical del agua no se produce.

La textura del suelo afecta también la evaporación. Un suelo rugoso induce un movimiento capilar de desplazamiento del agua. Las fuerzas capilares se deben a las fuerzas atractivas que existen entre las moléculas del agua y las moléculas de la tierra. Estas fuerzas contrarrestan la fuerza de gravedad y causan un ascenso del agua por los pequeños conductos que forman el suelo rugoso: entre más pequeños sean los conductos es menor la masa de agua dentro de ellos y por lo tanto puede ascender más fácilmente. Así que la rugosidad del suelo puede en cierta medida suplir la falta de humedad de las capas superiores para dejar escapar el agua.

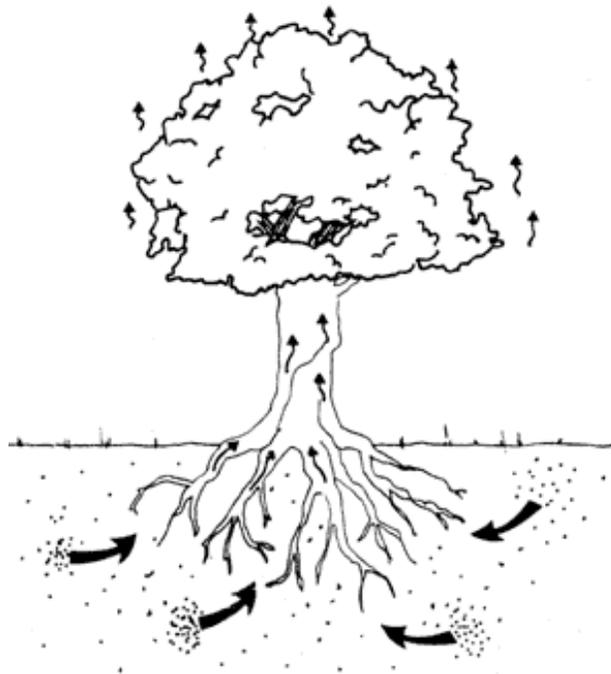
El color del suelo modula también la evaporación. De él depende qué tanto se reflejan los rayos solares y, en consecuencia, el tanto de energía que se suministre al proceso. Los suelos claros reflejan más la luz del Sol y tienen menor evaporación que los suelos oscuros.

La presencia de vegetación reduce la evaporación directa del suelo, pues crea una capa aislante, protege el suelo de los rayos solares e impide que el viento arrastre la humedad superficial. En estos suelos el proceso de evaporación del agua superficial se lleva a cabo por medio de las plantas, a través de su *transpiración*.



**Figura 17. El rocío que aparece en las mañanas sobre las hojas es una manifestación del proceso de respiración.**

La transpiración de las plantas se efectúa a través de las hojas, al absorber éstas la radiación solar necesaria para la fotosíntesis. Las hojas se calientan y pierden el agua contenida en sus espacios intercelulares a través de unas pequeñas válvulas llamadas estomas que poros formados por dos células en forma de media luna que aumentan su volumen al fluir agua hacia ellas y, al hacerlo, el poro se abre. Cuando han dejado pasar el agua se contraen y cierran el poro. Así la hoja controla la pérdida de agua. Al perder agua por evaporación se descompensa el equilibrio en la planta, así que hay fuerzas capilares semejantes a las que se inducen en los suelos rugosos y de la misma manera se provoca un ascenso del agua, de las raíces hacia el tallo, arrastrando nutrientes y así alimentando a la planta; el exceso se observa en forma de rocío por las mañanas.



**Figura 18. El agua disuelve los nutrientes que son absorbidos por capilaridad a través de las raíces y distribuidos a la planta. Por los estomas se evapora en las hojas, proporcionando la fuerza motriz para**

**arrastrar más agua.**

### II.3. CÓMO CIRCULA EL AGUA EN EL PLANETA: EL VAPOR ATMOSFÉRICO

Una vez que el agua se ha evaporado se incorpora a la atmósfera en forma de vapor. Fundamentalmente toda el agua de la atmósfera se encuentra en esta forma; el líquido que hay en la precipitación pluvial y en las gotitas de agua de las nubes, o el sólido de la nieve y el granizo, ocurren temporalmente y en zonas muy localizadas.

La cantidad de agua en la atmósfera es relativamente pequeña: constituye un cienmilésimo de toda el agua del ciclo hidrológico, y si toda ella se precipitara, formaría una capa de apenas 2.5 cm de espesor en la superficie del planeta.

Sin embargo, a pesar de constituir una parte modesta del ciclo hidrológico, el vapor atmosférico tiene un papel muy importante, pues lo cierra al precipitarse en forma de lluvia, nieve o granizo y así contribuye a distribuir el agua en el planeta. Además, las nubes forman una capa que permite pasar la radiación solar que llega a la Tierra, pero impide que la radiación reflejada por la superficie de la Tierra escape de nuevo al espacio. Esto tiene una función reguladora sobre la temperatura de nuestro planeta, que descendería drásticamente si no hubiese vapor atmosférico. Entre paréntesis, por esto los desiertos son muy calientes en el día y muy fríos en la noche.

La cantidad de vapor atmosférico depende no sólo de la evaporación local, sino también de desplazamientos horizontales de éste. Entre menor sea la temperatura del aire habrá menos vapor y como ella desciende con la altitud, el contenido de vapor atmosférico disminuye a grandes alturas. A más de 8 kilómetros de altura ya no hay vapor de agua.

La humedad del aire disminuye con la altitud, así como la presión y la temperatura; es por eso que los aviones requieren de equipo especial que conserve tales factores. En la siguiente tabla se muestran algunos valores indicativos.

<i>Altitud en metros</i>	<i>Presión en mm Hg</i>	<i>Temperatura °C</i>	<i>Humedad relativa (%)</i>
8 000	266.9	-37.0	0
6 000	353.8	-24.0	5
5 000	405.1	-17.5	10
4 000	462.3	-11.0	20
3 000	525.8	- 4.5	30
2 000	596.2	2.0	40
1 000	674.1	8.5	60
0	760	15	80*

\* Al nivel del mar

Estos datos, por cierto, han sido calculados para distancias medidas verticalmente sobre el nivel del mar. Por supuesto que la temperatura en la ciudad de México no es de 2 grados, pues el suelo por un lado y las nubes, por el otro, regulan la temperatura.

El aire experimenta desplazamientos horizontales y verticales. Los primeros arrastran el vapor y contribuyen a distribuir la humedad en la atmósfera. Los segundos llevan el vapor de agua a capas más altas de la atmósfera

que, por ser más frías, provocan su condensación. Los vientos son resultados del calentamiento de la atmósfera por el Sol. Durante el día, la tierra se calienta y el aire sobre ella asciende, lo que provoca un desplazamiento del aire más frío del mar hacia tierra (brisa marina). En la noche el proceso se invierte, acarreado la humedad terrestre al mar. Esto mismo sucede a mayor escala y en "cámara lenta" con la humedad de las masas continentales: se mueve hacia el mar en la estación fría y en sentido inverso en la estación caliente.



**Figura 19. La diferencia de temperaturas entre el día y la noche invierte el sentido del desplazamiento de la humedad superficial del mar a tierra.**

El vapor atmosférico es arrastrado por las corrientes de aire, atravesando capas de distinta temperatura. En algún momento sufre el proceso de condensación, el proceso inverso a la evaporación. El agua pasa de la fase gaseosa a la fase líquida, en la cual las moléculas se agrupan por efecto de su atracción. Por efecto de la condensación el

agua se desprende de la atmósfera y finalmente cae a tierra. Si la temperatura del medio es superior a 0°C el vapor se condensa en gotitas de agua líquida, si es inferior se solidifican formando cristalitas de hielo, conocidos como granizo. En determinadas condiciones, cuando tanto la temperatura como la presión es baja y la densidad del vapor es alta, puede suceder otro fenómeno que es el paso directo del vapor a la fase sólida; el proceso se llama *sublimación inversa* y da lugar a la formación de copos de nieve.

En su primera formación, las gotitas de agua o los cristalitas de hielo son muy pequeños, de 5 milésimas a 5 centésimas de milímetro. Estas gotitas o cristalitas son tan pequeños que flotan libremente en el aire y forman las nubes. Si la densidad de las gotitas aumenta se conglomeran en gotas más grandes, de una a cinco décimas de milímetro, dando lugar a la lluvia.

Las nubes se forman porque el vapor de agua atmosférico se enfría y pasa de la fase gaseosa a la fase líquida. La temperatura a la que esto sucede se llama *temperatura de rocío* y dependerá de la presión atmosférica y la densidad del vapor.

En algunas condiciones, particularmente cuando no hay gotitas de agua en el aire, la temperatura puede descender por debajo de la temperatura de rocío sin producirse el fenómeno de la condensación, dando lugar a la llamada *atmósfera supersaturada*. Ésta es muy inestable y a la menor perturbación varias moléculas de agua se agrupan y forman una gota que se llama *núcleo de condensación*. Puede también suceder que haya partículas sólidas flotando que atraigan a las moléculas de agua y actúen como núcleos de condensación. La sal es un excelente núcleo de condensación pues tiene gran atracción para el agua, de manera que cerca de los suelos fríos o en el mar, donde hay un alto contenido de sal en la atmósfera, es relativamente frecuente que esto que describimos suceda: es el fenómeno de la *niebla*.

Cuando cae la lluvia puede pasar una de cuatro cosas:

- 1) volver a evaporarse al caer o poco después de hacerlo;
- 2) ser interceptada por la vegetación y más tarde evaporarse por las hojas;
- 3) infiltrarse y formar parte de la humedad del subsuelo o de capas más profundas y,
- 4) incorporarse al flujo de un caudal que la lleve a los lagos o al mar.

Las grandes manchas urbanas provocan principalmente el primer fenómeno, la reevaporación, pues las superficies pavimentadas o construidas son impermeables y no pueden retener el agua que reciben. El alcantarillado, por su parte, conduce al exceso de agua por lo general lejos de las ciudades. Así se provoca una seria interferencia local con el ciclo hidrológico. La única salvedad se da en los parques, donde penetra una poca de agua al subsuelo. Ésta será menor cuanto más pequeñas sean las áreas verdes en las zonas construidas.

Es por eso que en la actualidad el gobierno de la ciudad de México está perforando pozos de absorción de aguas pluviales, en el esfuerzo por volver a llenar los mantos subterráneos y contrarrestar la seria perturbación al ecosistema del valle.

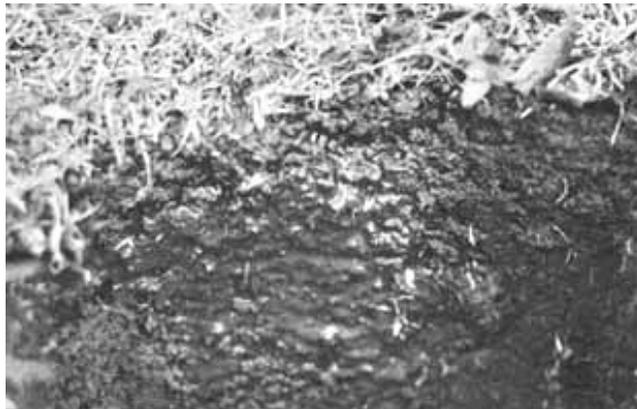


**Figura 20. Las áreas verdes, además de servir de esparcimiento, permiten la absorción de la lluvia.**

Cuando el agua penetra al subsuelo es gradualmente conducida a capas más profundas y puede penetrar a través de los mantos rocosos subterráneos pasando a través de sus pequeñas hendiduras por el fenómeno conocido como *percolación*. De esta manera, el agua adquiere parte de las sales del suelo que se disuelven en ella. La infiltración depende de las características del suelo: en ausencia de vegetación la tierra puede compactarse por el impacto de las gotas de lluvia y formarse una capa impermeable que impida que el agua penetre a zonas más profundas. Esto es particularmente notable en terrenos arcillosos. Por el contrario, no sucede en terrenos areniscos que son más difíciles de compactar. A la velocidad con la que el agua penetra un suelo se le llama *ritmo de infiltración* y la máxima velocidad a la que sucede es la *capacidad de infiltración*.

La vegetación aumenta el ritmo de infiltración, pues por una parte protege el suelo de la evaporación y por otra las raíces conducen el agua a capas más profundas del subsuelo de donde puede empezar a percolarse.

Cuando la tierra está seca, las fuerzas capilares que dependen de las atracciones entre las moléculas de agua y las de los poros de la tierra, actúan para acelerar el proceso de infiltración, más que la propia gravedad.



**Figura 21. El agua de lluvia penetra el interior del suelo primeramente por la acción de su propio peso, pero las fuerzas capilares actúan también: cuando el suelo está húmedo aceleran la infiltración, pero cuando está seco la llevan a ascender y escapar.**



Figura 22. Nuestro país no tiene grandes extensiones de lagos y lagunas; la figura muestra los principales.



### Figura 23. Los principales ríos de México.



**Figura 24. Grabado de 1886 que muestra la entrada a las grutas de Cacahuamilpa. Al fondo puede apreciarse un río subterráneo.**

El fenómeno que dicta la absorción cuando empieza a llover es la infiltración pero, a medida que la tierra se satura, el agua comienza a llenar las cavidades hasta formar corrientes que la arrastran siguiendo la pendiente del suelo. Esto forma una parte muy importante del ciclo hidrológico y constituye el drenaje natural de las cuencas. En valles naturalmente cerrados como el de México la cuenca no puede drenar y se forman grandes depósitos en lagos. Cuando la actividad humana interfiere con estas funciones se pueden provocar inundaciones que, como veremos más adelante, llegan a alcanzar efectos devastadores.

El agua que penetra por percolación en las capas más profundas forma mantos subterráneos, algunos de los cuales quedan atrapados por rocas superiores y están sometidos a grandes presiones. Los mantos subterráneos, en algún momento, pueden llegar a una depresión superficial y entonces el agua aflora; aunque pueden no hacerlo y quedar bajo tierra formando los llamados mantos fósiles.

El agua subterránea es mucho más difícil de observar y medir que la superficial, de manera que los científicos han tenido que idear métodos refinados para determinar su movimiento. Un método muy estudiado consiste en medir las relaciones de los isótopos de los átomos constituyentes del agua, el hidrógeno y el oxígeno. Los isótopos son variedades de un átomo que son químicamente idénticas pero difieren en su composición nuclear. En la naturaleza hay isótopos más abundantes que otros, y sus proporciones son bien conocidas, de manera que cualquier desviación de las proporciones naturales puede servir de "marca" para identificar el agua, y relacionarla con su origen.

En su fase sólida, hielo o nieve, el agua recorre el ciclo hidrológico de manera semejante al agua líquida. Lo equivalente a los ríos, para el hielo, son los glaciares, masas de hielo en movimiento que cubren las tierras emergidas. Los glaciares se originan en la llamada línea de las nieves, que es el límite inferior de la zona en donde hay nieve todo el año. Este límite varía con la latitud, desde el nivel del mar en los polos hasta una altitud de 5 000 metros en el ecuador. En todos los continentes, excepto en Australia, hay glaciares; en los polos son un elemento normal del paisaje, pero a medida que nos acercamos al ecuador son más infrecuentes, pues solamente se les localiza en las montañas más altas.



**Figura 25. El Matterhorn, en los Alpes suizos, muestra los efectos característicos de la erosión glacial. La forma puntiada de su cima se debe a la erosión de los glaciares.**



[Nota 3] [

3 Hoy día esta radiación, sumamente energética, se atenúa por la capa de ozono que es una especie molecular formada por tres átomos de oxígeno.

---

**Inicio** |

---

## III. EL AGUA Y LA VIDA

### III.1. LA CALIDAD DEL AGUA

EL AGUA no se encuentra en la naturaleza en su forma químicamente pura, compuesta solamente por moléculas H<sub>2</sub>O, que sólo se da en el laboratorio. Puesto que disuelve ávidamente a la mayoría de los compuestos sólidos, líquidos o gaseosos, en su forma natural se encuentra normalmente impregnada de ellos. Esto en sí es bueno, pues es precisamente el oxígeno disuelto el que permite la vida acuática; los sólidos en solución modulan su actividad química y son aprovechados por los seres vivos. Es interesante hacer notar que el agua químicamente pura no es apropiada para la vida.

Pero esta propiedad de disolver compuestos extraños a ella es la que provoca serios problemas de contaminación: los desechos domésticos o industriales incorporados a las masas de agua llegan a hacerla inadecuada y hasta peligrosa para la vida. Conocer los límites de impurezas que para cada uso pueden aceptarse y estudiar la manera de eliminarlas es una tarea de higiene extremadamente importante para conservar los recursos acuáticos. En este capítulo veremos los peligros que se ocultan en el manejo descuidado del agua. Tomar conciencia del daño que podemos causar es muy importante pues una vez contaminada, el costo de purificación del agua es muy alto.

Tiempo atrás, cuando la cantidad de agua parecía ser ilimitada o su costo de abastecimiento muy bajo, poco importaba tirar un poco de agua sucia al mar. Hoy en día la amenaza de la escasez y la conciencia de los altos costos de suministro han llevado a establecer reglamentos estrictos de control para las descargas a ríos, mantos y mares. El problema no es lejano ni la responsabilidad es solamente del vecino: todos debemos participar.

Los contaminantes del agua pueden ser de muy diversa índole: residuos sólidos, líquidos o gaseosos; sólidos en suspensión; materia tóxica; microorganismos infecciosos; desechos radiactivos... Estas sustancias dan al agua propiedades indeseables, como corrosividad, incrustabilidad, toxicidad, mal olor, mal sabor y mala apariencia.

Los sólidos en suspensión, cuando son excesivos, reducen la penetración de la luz y por consiguiente limitan la fotosíntesis de las plantas marinas, ocasionando su degradación, lo que a su vez disminuye la aportación que hacen de nutrientes al medio acuático. Cuando el daño es excesivo, las plantas mueren y se provoca la corrupción del medio; el oxígeno disuelto prácticamente desaparece y con ello la posibilidad de sustentar vida. Estas son las "aguas estancadas", de mal olor y apariencia.



**Figura 26. El crecimiento excesivo de la vegetación acuática provoca la reducción del oxígeno disuelto.**

Los productos químicos causan alteraciones que pueden llegar a alcanzar gran peligrosidad. Por ejemplo, los plaguicidas tienen componentes de gran agresividad química cuya función es precisamente eliminar formas de vida nocivas. Sin embargo, al ser arrastrados por la lluvia o por las aguas de riego, indirectamente también los resienten otras formas de vida aunque, originalmente, no estuvieran dirigidos a ellas. Incluso pueden ser asimilados por los peces a los que causan daño, como también a los animales que los consumen, incluido el hombre.

Los fertilizantes contienen fósforo, nitrógeno y potasio, todos ellos necesarios para el crecimiento sano de las cosechas. Pero al ser arrastrados a esteros y lagunas provocan un crecimiento desmedido de las especies acuáticas, alterando el equilibrio ecológico. El medio acuático, al no poder soportar un excesivo crecimiento, se deteriora, mueren muchas plantas y causan descomposición, consumo de oxígeno disuelto en la putrefacción y afectan al ecosistema.

Los detergentes son unos de los peores enemigos del agua, pues en su estructura química contienen compuestos que no se degradan fácilmente. Los fosfatos que los forman generan verdaderas montañas de espuma que interfieren seriamente con la vida acuática, arruinan el valor estético de los cuerpos de agua y son un verdadero dolor de cabeza en los sistemas de tratamiento para su purificación.

Otros contaminantes dañinos son los metales pesados, como el mercurio, el cadmio, el plomo, el arsénico, el cromo, etc. que provocan graves anomalías en la salud. El cadmio, por ejemplo, trae consigo enfermedades cardiovasculares; el mercurio, que por asimilación de los peces, se transforma en metilmercurio o mercurio orgánico, provoca la pérdida de control en los movimientos, ceguera y finalmente, la muerte. El arsénico es cancerígeno en pequeñas cantidades y letal en dosis medias, como lo son también el plomo y el cromo.

Hay que destacar la contaminación por microorganismos patógenos (nocivos) que producen cólera, hepatitis, fiebre tifoidea y diarreas que fácilmente pueden llegar a ser fatales, sobre todo en niños. Microorganismos mayores como las amibas y la triquina también habitan en las aguas contaminadas. Cierta vez, un amigo biólogo, tomó una muestra de agua de una fuente de esta ciudad y por curiosidad la observó al microscopio: ¡tenía ante sus ojos una colección de bichos digna del mejor microzoológico!

La humanidad depende del agua para su sustentación, pero también somos cada uno de nosotros, el principal causante de la inhabilitación de este recurso, ya sea por ignorancia o por negligencia.

Las aguas contaminadas pueden restaurarse a una condición de reuso. Al respecto es necesario identificar cuál ha sido el daño y poder así dar el tratamiento adecuado para la eliminación de cada una de las características indeseables del agua, según el destino que se pretenda darle. Estos tratamientos suelen ser muy complejos y costosos. Así, actualmente se ayuda en la economía del reuso del agua, destinando aguas de diferente calidad según vayan a ser empleadas: en riego, industria o consumo humana. Ciertamente la complejidad y el costo serían mucho menor si tratáramos aguas menos deterioradas.

Para comprender mejor el problema de contaminación y tratamientos de agua, veamos qué calidad de ésta puede aceptarse para diferentes destinos: con fines recreativos, para la agricultura, la industria y el consumo humano. Será necesario introducir parámetros a estos criterios con el objeto de dar medidas cuantitativas de la "calidad del agua"; quizá pueda parecer un poco árido aunque confío que el esfuerzo por comprenderlos dará al lector una mejor sensibilidad de la magnitud del problema.

#### *El agua que se usa con fines recreativos:*

La vida humana se ha mantenido muy ligada al agua. Los artistas de las distintas civilizaciones han reflejado en la literatura y en el arte su fascinación por este elemento.

La contemplación del agua añade un placer estético a las experiencias humanas: es agradable oír-la, observarla, caminar o descansar junto a ella, tocarla y entrar en su contacto. Aumenta la belleza del paisaje del que forma parte en las ciudades o en el campo.



**Figura 27. No hay razón alguna para que la actividad humana deteriore el medio ambiente. En la fotografía se aprecia la armonía entre el riachuelo corriendo por la cañada y el acueducto al fondo, obra del siglo XVII, en el lugar llamado El Sitio, Estado de México.**



**Figura 28. En los acueductos se construían cajas de agua para que la gente pudiese aprovechar la obra de conducción. Esta caja de agua es parte del acueducto de Zempoala. (siglo XVI).**

La presencia de contaminantes reduce el valor estético del agua hasta casi hacerlo desaparecer. Más aún, la conciencia del daño que puede causar el agua sucia hace que el hombre la rehuya, perdiendo así su valor recreativo. Esta contaminación puede observarse cuando los desechos la tornan desagradable a la vista, o estar oculta y sólo saber que contiene elementos químicos o bacteriológicos peligrosos para la salud.

Un objetivo fundamental de los programas de conservación de los recursos acuáticos es la preservación de sus valores estéticos y de la calidad del agua, así como el reconocimiento e identificación de los niveles de contaminación que pueden deteriorarla. El agua que no es adecuada para la recreación no lo es para ningún otro fin.

Para que el agua alcance valor estético debe estar libre de sustancias ajenas (basura, espuma), malos olores y exceso de vegetación acuática. Como al ver ésta agua uno desea tocarla, entrar en su contacto, entonces, cuando se persiguan fines recreativos, deberá ser adecuada, al menos, para lo que se llama un *contacto secundario*, esto es, que puedan realizarse con ella actividades que no signifiquen un riesgo alto de ingestión: pescar, mojarse los pies, etc. En el caso de especies marinas, el criterio establecido dicta que deben ser adecuadas para el consumo

humano y que además haya un límite máximo de microorganismos de 400 bacterias coliformes fecales por 100 mililitros de agua. 4 [Nota 4]

Para un *contacto primario*, por ejemplo al pasear en bote que existe la posibilidad de inmersión y por tanto de ingestión accidental, el contenido de bacterias coliformes, cuando mucho, debe ser la mitad de lo anterior (200 bacterias por 100 mililitros) de modo que no exista riesgo para la salud. Para actividades de natación, en las que es prácticamente inevitable la ingestión, la norma dicta que el contenido de bacterias coliformes sea a lo sumo de 100 en cada 100 mililitros (ml).

Pero no es éste el único factor: la acidez es importante también. Los líquidos tienen esta propiedad que se mide en una escala llamada pH y varía de 0 en los líquidos extremadamente ácidos hasta 14 en los más básicos; el valor de 7 corresponde a un líquido neutral, como la saliva. Las lágrimas sirven para reducir el efecto del contacto de partículas extrañas al ojo y tienen un valor de pH de 7.4. Aun cuando las lágrimas tienen asombrosa capacidad de amortiguamiento, una variación de pH de tan sólo 0.1 unidades causa molestias, así que para el contacto prolongado se recomienda que el pH del agua no sea inferior a 6.3 ni menor que 8.3.

Otro parámetro importante es la temperatura. El agua caliente es más peligrosa que la fría por ser más agradable al contacto; así, se ha encontrado que para un nadador corriente, que no gasta mucha energía, la máxima temperatura recomendable es de 30 grados Celsius. En las aguas termales, más calientes que este valor, deben controlarse cuidadosamente los movimientos y el tiempo de inmersión y por ningún motivo realizar ejercicios vigorosos.

#### *El agua para la agricultura:*

El agua empleada en el campo para la producción de buenas cosechas y como bebida del ganado, debe ser de tal calidad que no provoque daño o enfermedades y en esto, la presencia de sustancias extrañas tiene mucho que ver.

Aparte de las lluvias, las tres cuartas partes del abastecimiento del agua en el campo provienen de corrientes y la otra cuarta parte de pozos, por lo que el hombre, para hacer un mejor uso del recurso, ha construido presas y sistemas de distribución. Así es posible establecer un proceso productivo continuo a lo largo del año sin depender exclusivamente de las lluvias de temporal. Los costos, no obstante, son grandes, por lo cual todavía la mayor parte de la población agrícola queda a expensas de las lluvias.

En cualquier caso, para el adecuado funcionamiento de las labores del campo es necesario vigilar la calidad del agua; al respecto se han establecido criterios que rigen los principales factores que deben controlarse, especialmente el contenido de sales (salinidad) incrementado por la irrigación río arriba o los lavados de terrenos y, por supuesto, los microorganismos presentes introducidos a las aguas de riego por las descargas de los drenajes.

Desde tiempos remotos los agricultores han sabido que las aguas con gran contenido de sales son inadecuadas para plantas y animales. La *salinidad* afecta el crecimiento de las cosechas y el desarrollo del ganado, pues en grado excesivo los envenena. Cada tipo de planta y de animal tiene un grado de tolerancia, aunque el de las plantas es de hasta 5 000 miligramos por litro (mg/l) y para los animales de 10 000 mg/l.

En las tablas siguientes se muestran los límites de tolerancia en plantas y animales:

#### **Efecto de la salinidad en las plantas**

<i>Salinidad (mg/l)</i>	<i>Efecto</i>
<500	Ningún efecto apreciable
500 a 1 000	Efectos adversos en cultivos sensibles
1 000 a 2 000	Efectos adversos en la mayoría de los cultivos

### Tolerancia de contaminantes por los animales

<i>Características</i>	<i>Recomendaciones</i>
Salinidad	<10 000 mg/l, dependiendo del animal y del contenido de sales en el agua
Elementos peligrosos	
arsénico	<0.05 mg/l
cadmio	<0.01 mg/l
chromo	<0.05 mg/l
flúor	<2.40 mg/l
plomo	<0.05 mg/l
selenio	<0.01 mg/l

La salinidad del agua es más agresiva en las regiones áridas y semiáridas que en las húmedas, pues en éstas no suele haber acumulación de sales y los efectos nocivos normalmente desaparecen.

Hay dos compuestos que deben tomarse en cuenta: el *sodio* y los *cloruros*. El primero puede ser un elemento perjudicial sobre todo en los terrenos arcillosos, pues reduce su permeabilidad; aguas con poca salinidad pero ricas en bicarbonatos pueden acarrear este problema. Los cloruros son particularmente malos para los plántulos de frutales, aunque inocuos para las demás cosechas.

La contaminación por microorganismos puede acarrear graves problemas no solamente a la salud de las plantas y animales sino también a la del hombre, consumidor de ellos. Las descargas de drenajes en aguas de riego o mantos freáticos ha causado la inhabilitación de extensas zonas para la agricultura.

La presencia de microorganismos debe vigilarse particularmente en los cultivos en que las raíces o las extremidades de los vegetales son consumidas por el hombre o los animales. Un límite aceptable parece ser de 5 000 coliformes por 100 ml (de los cuales hasta 1000 sean coliformes fecales) en un promedio mensual.

Debe mencionarse que hay otros parámetros que es recomendable vigilar, por ejemplo la acidez del agua cuyo pH debe estar entre 4.5 y 9.0; los pesticidas que frecuentemente se emplean para controlar las plagas son arrastrados a las corrientes de aguas de riego; en el uso normal no causan problemas, aunque deben controlarse los derrames. El problema de las aguas contaminadas por residuos industriales es materia de consideración aparte, pues normalmente estas descargas son extremadamente agresivas y por tanto deben eliminarse por completo.

#### *El agua para la industria:*

El agua es también en la industria uno de los insumos más importantes. Interviene en un sinnúmero de procesos: para enfriar, para diluir o para lavar otros ingredientes en la transformación de los productos. La pureza del agua requiere cuidado especial, cuando interviene directa o indirectamente. La limpieza del agua industrial ha dado lugar a una importante industria de productos: en 1988 la industria de productos para el tratamiento de aguas tuvo ventas en los Estados Unidos por más de 2 400 millones de dólares, y la tendencia en los siguientes años fue

marcadamente creciente.



**Figura 29. La industria es una gran consumidora de agua; en algunos procesos la calidad del agua debe ser controlada cuidadosamente.**

Por ejemplo, muchos procesos industriales generan una gran cantidad de calor que es necesario eliminar para proteger los productos que se manufacturan; el agua, con su gran capacidad calorífica, es un refrigerante ideal, fácilmente accesible y barato. En estos casos se ponen en contacto el producto que se pretende enfriar con un serpentín dentro del que circula agua. Esta, a su vez, es llevada a unos dispositivos que son, en esencia, equivalentes a los radiadores de los automóviles (aunque no necesariamente tengan la misma forma) donde el agua cede su calor a la atmósfera. En estos casos el agua debe estar libre de sales disueltas, pues por efecto de la temperatura éstas se desprenden del líquido y se depositan en las paredes de los tubos provocando oclusiones.

En su fase vapor, el agua se utiliza con diversos fines: generar electricidad, aprovechando su poca compresibilidad, para mover turbinas generadoras; para calentar procesos que requieren operación a temperaturas de hasta 100 grados centígrados (y un poco más si se "sobrecalienta" el vapor manteniéndolo a presión); o en la extracción de productos, pues el vapor es un buen disolvente. En estos casos, el agua para la formación de vapor, suele primero limpiarse de sales, en particular bicarbonatos y dársele una acidez moderada (entre 8.0 y 10.0 de pH) para reducir el efecto de ataque a los metales.

El agua para dilución es muy importante en la industria textil que la emplea como excipiente en los tintes, uso que requiere agua extremadamente limpia, prácticamente agua destilada (menos de 150 mg/l de sólidos totales disueltos) pues de lo contrario, pueden estropearse los tintes.

En los procesos químicos el costo del agua es mucho menor que el de los demás insumos, por lo que se le da un especial cuidado a su tratamiento sin costos significativos. Lo malo, en opinión de muchos industriales, es que cuando el agua se descarga, ya contaminada, el costo de estos tratamiento sí resulta exagerado. Vale decir que la legislación actual ha puesto particular énfasis en controlar el renglón de la contaminación, aunque el daño hecho hasta ahora ya es enorme y tomará muchos años de esfuerzo sostenido para poder eliminarlo.

En la industria enlatadora de alimentos, la primera operación importante es el lavado de los productos que serán enlatados, para eliminar cualquier traza de tierra, insectos y otras impurezas, lo que se hace con un lavado a fondo con chorros de agua o de vapor, ambos de calidad potable (sin bacterias patógenas y un contenido de sales no superior a 1 500 mg/l). Esta industria utiliza muchos sistemas de tratamiento, incluyendo la desinfección y la filtración.

*El agua para el abastecimiento público:*

El agua interviene tan íntimamente en los procesos vitales que los contaminantes que contiene son incorporados

de manera profunda por los seres vivos. Un caso espectacular y bien conocido es el del mercurio, que los peces asimilan y transforman en el temible metilmercurio o mercurio orgánico. Cualquier ser que consuma tales peces lo incorpora fácilmente a su cuerpo, provocándose un daño progresivo y letal.

Las autoridades sanitarias cuidan que el tratamiento de las aguas para abastecimiento público pase por diferentes procesos de limpieza que aseguren un consumo seguro. Al respecto se han establecido parámetros que deben vigilarse; enseguida describiré los más representativos. Existen procesos de tratamiento específico que serán tratados en el capítulo IV.

El *color* indica la presencia de materia disuelta, ya sea orgánica o inorgánica, que puede ser nociva; el *olor* se debe a la materia orgánica. Uno y otro pueden y deben eliminarse por completo. Relacionada con estos parámetros está la *turbidez* o medida de la cantidad de partículas sólidas disueltas; un contenido de sólidos totales disueltos mayor que 500 mg/l, especialmente de cloruros y de sulfatos, da un sabor desagradable y hace aguas corrosivas. Es muy importante que el agua destinada al consumo público esté libre de *aceites* y *grasas*, pues estas sustancias son muy aromáticas y le confieren pésimo olor y sabor. El remedio a estos problemas lo ofrecen los procesos de coagulación, sedimentación y filtración.

La *temperatura* del agua varía según la región geográfica y el clima. En general, mientras no exceda los 30°C no representa un problema mayor.

Los *organismos coliformes* y los *coliformes fecales*, que ya han sido mencionados, constituyen malas especies. De hecho éste fue el primer parámetro sobre el que se puso atención (en 1880) para dictaminar la calidad sanitaria del agua. Aquellos bichos son habitantes normales de las descargas fecales de los animales de sangre caliente (los coliformes fecales) o de materia orgánica en descomposición (los coliformes a secas) y responsables de las enfermedades que se asocian con el agua. En general, la presencia de organismos coliformes fecales indica contaminación reciente y potencialmente peligrosa. Otros coliformes indican focos más distantes de contaminación o menos recientes de origen no fecal (insectos, plantas o drenajes lejanos). Los límites fueron explicados al principio de este capítulo y se recordará que 400 coliformes por 100 ml es la máxima cantidad permisible. Este contaminante se elimina por desinfección con cloro.

La *alcalinidad* del agua se debe a los bicarbonatos, carbonatos y otros iones en ella disueltos. La alta alcalinidad causa corrosión e incrustaciones, dentro de los límites tolerables. Puede eliminarse por coagulación. El contenido aceptable de estas especies químicas debe ser menos de 30 mg/l.

Un producto de cuidado es el *amoníaco*, pues reacciona vivamente con el cloro que se añade para desinfectar el agua y reduce por lo mismo su eficiencia. Además, indica la probable contaminación por descargas de drenaje en la fuente de agua (el amoníaco es componente de la orina).

Los *metales pesados* (arsénico, bario, cadmio, cobre, fierro, plomo y mercurio entre otros) son extremadamente venenosos y por desgracia poco puede hacerse en las plantas normales de tratamiento de aguas para eliminarlos. Lo mismo puede decirse de especies químicas como los fenoles, cianuros, metilos o sustancias radiactivas. El control de estos efluentes debe realizarse en las plantas industriales donde se generan.

La *dureza* del agua se la confiere su paso por las distintas formaciones geológicas que le ceden sales, especialmente carbonato de calcio. La tolerancia que a ella tienen los humanos es muy variable: más de 500 mg/l de carbonato de calcio es una cantidad excesiva y un valor deseable es de menos de 150 mg/l. En regiones como Zacatecas la dureza es muy alta y causa una desagradable coloración en la dentadura además de un excesivo consumo de jabón y costosas incrustaciones en las tuberías. Hay otros parámetros que deben vigilarse, como el *oxígeno disuelto*: éste en sí, no tiene mayor efecto en la potabilidad del agua, pero una sustancial reducción de él puede indicar fuentes de contaminación por desechos orgánicos.

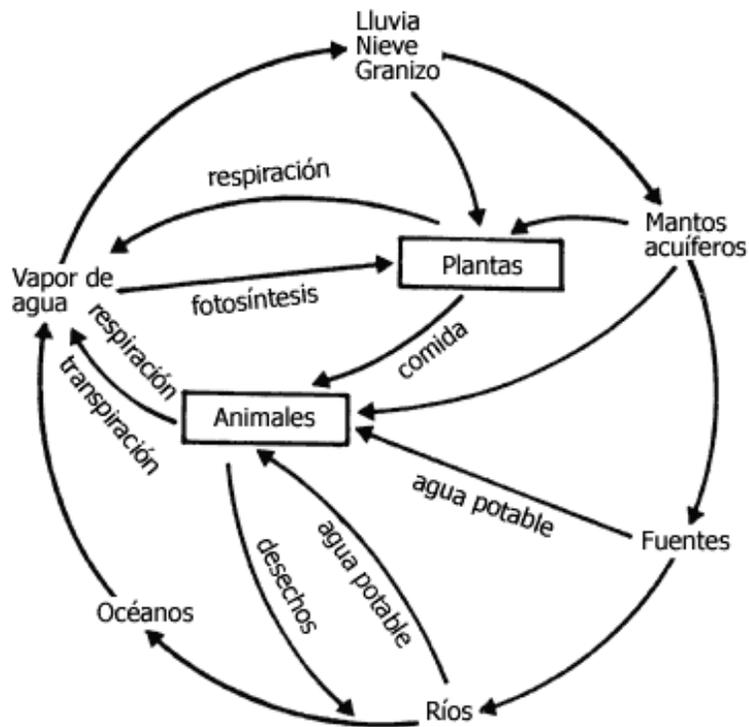
### III.2. EL AGUA Y LA VIDA

El agua es constituyente necesario de todas las células, animales y vegetales y la vida no puede existir en su ausencia ni siquiera por un periodo limitado. El agua que contienen los organismos vivos varía entre los extremos de 97% en los invertebrados marinos hasta 50% en las esporas.

El hombre adulto contiene en su organismo 70% en promedio, distribuido de la siguiente manera:

tejido nervioso	84%
hígado	73%
músculos	77%
piel	71%
tejido conectivo	60%
tejido adiposo	30%

En los fluidos biológicos, tales como la saliva, plasma y jugos gástricos, el contenido de agua es hasta de 99.5 por ciento.



**Figura 30. Los seres vivos participan en el ciclo hidrológico global del planeta. En la figura se ilustra de qué manera las plantas y los animales contribuyen al movimiento del agua.**

Aproximadamente el 50% del contenido de agua en los organismos se encuentra en las células, 35% en materia no acuosa, 5% en el plasma y el 10% restante distribuido en el cuerpo. Es el agua la que da la turgencia a las células.

El agua es el solvente que promueve la digestión, en la que se rompen los carbohidratos y las proteínas. Los lípidos, aunque no cambian químicamente, se solubilizan en el medio acuoso para su asimilación.

Otro papel muy importante que desempeña el agua es el control de la temperatura del cuerpo mediante el

aprovechamiento del calor latente del agua. Este proceso impide que existan zonas demasiado calientes o demasiado frías. La reserva de un humano adulto es de unos 45 kg, de los que se pierden entre 300 y 400 gramos por la respiración y entre 600 y 800 gramos por la evaporación cutánea. Ello disipa un 20% del calor producido por el cuerpo.

Los organismos vivos no pueden sobrevivir sin una alimentación mínima de agua, aunque ésta varía grandemente en los reinos animal y vegetal. Un humano adulto ingiere aproximadamente 2.5 litros de agua diariamente por medio de los líquidos y sólidos que toma. En la tabla se muestra la cantidad de agua que adquiere un adulto por cada 1.5 kg de comida "sólida" (que contiene 57% de agua).

	<i>Peso ( en g )</i>	<i>Cantidad de agua ( en g )</i>
Pan	300	100
Leche	200	175
Carne	100	76
Papas	300	225
Verduras	150	133
Fruta	50	40
Queso	60	21
Pescado	60	49
Embutidos	80	9.5
Grasa	40	0
Azúcar	40	0

Además, un adulto genera diariamente cerca de 350 gramos de agua acompañados por la liberación de 1.31 kilocalorías de energía por la combustión de la comida. Esta combustión se produce por medio de una serie de reacciones químicas en las que se forman proteínas de los aminoácidos y glicógeno de la glucosa y en las que resultan hidrógeno y oxígeno que se recombinan en agua.

El agua sirve para irrigar, distribuir nutrientes y remover desechos. La circulación del agua procede por la absorción intestinal, el flujo de la sangre y la diuresis. Las enfermedades relacionadas con el agua están conectadas con las irregularidades en la distribución sanguínea, la composición del agua intracelular y extracelular y la deshidratación.

La ingestión de agua y su generación interna por medio de reacciones químicas se acopla con la pérdida del agua por la excreción, transpiración y pérdida de vapor por la respiración para dar lugar al ciclo hidrológico propio de los organismos. Este, a su vez, se acopla al ciclo hidrológico de la naturaleza.

El subciclo relacionado con las plantas se completa con el proceso de la fotosíntesis, en el cual se asimilan el vapor de agua y el bióxido de carbono. Los estudios que se han hecho con isótopos trazadores han demostrado que el oxígeno liberado se reconvierte en agua.

Esta breve descripción muestra las diferentes formas en las que el agua se liga con la vida, actuando como solvente, dispersante y lubricante. Es además un insumo y producto de las reacciones bioquímicas.

Por lo tanto no es de sorprender que un cambio en las propiedades del agua afecte, en algunos casos fatalmente, a los seres vivos. Por ejemplo, cada especie tiene un límite de temperatura del agua arriba del cual le es peligrosa. En los mamíferos, esta temperatura es de aproximadamente 40 grados centígrados.

La pureza del agua es fundamental: algunas especies químicas son nocivas, y la tolerancia varía según su efecto sobre la vida. Puesto que el agua es tan buen solvente, los contaminantes fácilmente se incorporan a ella y por tanto son llevados a los organismos y asimilados por ellos.

El agua químicamente pura es inadecuada para la vida por varios motivos. En primer lugar, es extremadamente reactiva y ataca los delicados procesos vitales. Existe además un equilibrio de sales en las células que el agua químicamente pura rompería con consecuencias fatales, pues tendería a asimilar los sólidos disueltos, robándolos a las células. En el otro extremo, un agua con demasiadas sales tiene un efecto similar por la misma razón. Así, el Mar Muerto tiene una salinidad tan alta que no existe la vida en su seno.

Serían necesarios muchos estudios más para conocer con mayor precisión el papel del agua en la vida. Por ejemplo, sobre la manera como el agua participa en la organización de las estructuras moleculares biológicas, estabilizando los biopolímeros. Se sabe que se requiere 30% de agua para mantener la estructura de estas cadenas moleculares, que se derrumban por la deshidratación. Se supone que las fuertes interacciones eléctricas que provocan las ligaduras de hidrógeno contribuyen a esta estabilización e inclusive se han caracterizado algunas de ellas en los elementos constituyentes. Empero, el panorama para los científicos es todavía incompleto.



[Nota 4] 

4 De los microorganismos llamados coliformes, los fecales (provenientes de los excrementos) son los que significan un mayor riesgo para la salud, pues llevan consigo la presencia de virus. Un agua con 400 coliformes por 100 ml contiene el mayor límite aceptable.

---

**Inicio** |

---

## IV. EL AGUA Y LAS CIUDADES

### IV. 1. CÓMO LLEGA EL AGUA A LAS CIUDADES

LA POSESIÓN de las fuentes de agua ha sido de extremada importancia para los asentamientos humanos. En un cuadro muy vívido, Stanley Kubrick, en su célebre película *2001: odisea del espacio*, muestra la lucha entre dos tribus de homínidos por la posesión de un ojo de agua; la tribu que logra concebir el uso de un hueso como arma ofensiva adquiere ventaja sobre la otra y por tanto puede desplazarla de la fuente del vital elemento. Las luchas hace millones de años deben haber sido en grande.

Ya en épocas históricas, las tribus continuaban disputando por asegurar su suministro de agua. En el primer libro de la Biblia se narra cómo los pastores de Isaac lucharon en contra de los habitantes del valle de Gerar por la posesión de pozos. Más tarde, en el Libro de los Reyes se habla de las obras para el suministro de agua a la ciudad de Jerusalén.

En el mundo antiguo, posiblemente Roma haya sido el pueblo que desplegó la más impresionante actividad en ingeniería hidráulica. Grandes acueductos surcaron los valles del mundo romano: a la capital del Imperio más de seiscientos kilómetros de acueductos llevaban el agua pues el Tíber estaba sumamente contaminado. Igualmente grandiosas eran las obras de drenaje de la Cloaca Máxima, que se extendía por toda la ciudad. Pompeya poseía una red de suministros de agua potable que llegaba a numerosas fuentes dispersas por toda la ciudad.

Los habitantes del México prehispánico construyeron grandes e interesantes obras hidráulicas. Se dice que el palacio de Netzahualcóyotl incluía un sistema de distribución de agua fría y caliente, así como de drenaje.

En el México de la Colonia se construyeron obras de gran envergadura, como el acueducto de Otumba, del siglo XVII, obra de un humilde franciscano, el padre Francisco Tembleque. Para salvar el problema que presentaba una cañada, el padre Tembleque dirigió la construcción de una arquería cuyo arco mayor alcanza una altura de 38.75 m, bajo el que pasa holgadamente el tren y es 14 m más alto que la catedral de México. El acueducto distribuye agua a los pobladores vecinosa lo largo de sus 16 km de longitud a través de cajas de agua, lo que convierte al padre Tembleque no sólo en un gran ingeniero de la Colonia, sino también en el primer higienista.



**Figura 31. El acueducto de Zempoala, cerca de Otumba, Estado de Hidalgo, fue una de las primeras obras de acarreo de agua en la Colonia. El padre Francisco Tembleque dirigió la construcción en el siglo XVI.**

Pero la distribución de agua por red municipal a los hogares requería de avances tecnológicos que sólo fueron

posibles hasta entrado el siglo *XIX*: sistemas de bombeo y tuberías que resistieran presiones elevadas para llevar un caudal suficientemente grande.

Con anterioridad el acarreo de agua se efectuaba por medio de acueductos a cielo abierto. Para surtir los hogares era necesario ir a las fuentes públicas, donde el agua con frecuencia estaba contaminada, así que se tuvo que descubrir cómo purificarla para evitar enfermedades. Desde épocas muy antiguas (probablemente 200 años a.C.) se sabía que es higiénico conservar el agua en vasijas de cobre, exponerla a la luz del Sol y filtrarla con carbón. En 1829 el inglés Juan Simpson desarrolló un filtro de arena que marcó el inicio de los modernos sistemas de tratamiento de agua.



**Figura 32. Entre los monumentos coloniales más importantes se encuentra esta fuente pública en Tepeapulco, Hidalgo, construida en 1527 por Juan de Entreambas Aguas.**

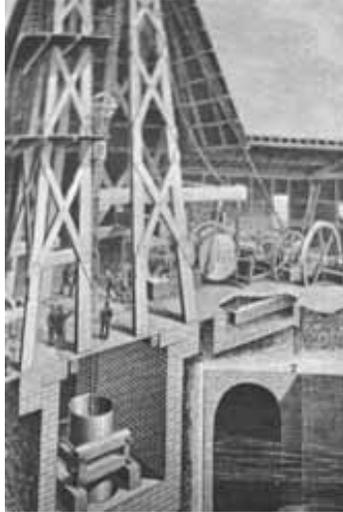
El agua, como vimos en capítulos anteriores, está sujeta al ciclo hidrológico. Es de este ciclo de donde se obtiene para llevarla a las ciudades o centros de consumo, fundamentalmente de los ríos, los lagos o los pozos que la atrapan en el subsuelo, agua a la que se llame dulce porque tiene un contenido tolerable de sales. Un agua con demasiadas sales disueltas no es apta para el consumo humano y sólo puede beberse después de un proceso que se llama desalación.

Cuando el agua se toma de un río, el ingeniero debe decidir si éste en su mínimo caudal puede satisfacer los requerimientos de la comunidad. El calor del verano reducirá la corriente por evaporación y al mismo tiempo incrementará la demanda. Así, un cálculo cuidadoso indicará la necesidad de presas o vasos reguladores. Éstos requieren de la consideración de muchos factores importantes: que no haya escurrimientos por debajo de la cortina; que las pendientes de la presa sean moderadas para que no se produzcan derrumbes, aun en el caso de que se sature de humedad la tierra, etc. La cortina debe ser lo suficientemente pesada para que no ceda por la presión del agua y deberá haber vertederos que conduzcan el exceso de agua en caso de avenidas.

El agua fluye al sistema de suministro a través de tomas en las que se coloca filtros gruesos para impedir la entrada de objetos flotantes y que, en su interior, tienen filtros más finos que detienen las hojas, vegetación acuática y peces. Los filtros requieren de mantenimiento frecuente que en los grandes sistemas lo proporciona un artefacto mecánico.

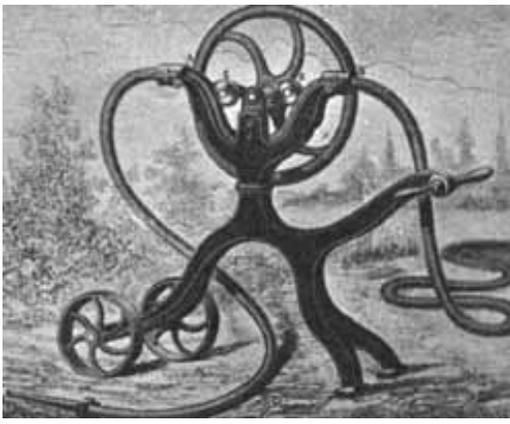
Parte considerable del agua para suministro proviene de fuentes subterráneas cuya extracción requiere la perforación de pozos. Ésta se hace por medio de una broca que se deja caer desde una torre montada en la

plataforma de un camión, a la que se da movimiento rítmico ascendente y descendente, dejando ir el cable poco a poco a medida que progresa la perforación. En terrenos poco firmes los pozos se refuerzan con tubos concéntricos que van extendiéndose hacia abajo como un telescopio. Existen varias técnicas para incrementar el rendimiento de un pozo, incluyendo la perforación de ramas radiales en el acuífero que pueden penetrarlo hasta varias decenas de metros.



**Figura 33. Las aguas subterráneas han sido aprovechadas por medio de la excavación de pozos. En algunos pozos profundos las aguas ascienden por su propia presión: son los *pozos artesianos*; llamados así porque fueron construidos por primera vez en Artois, Francia. La figura muestra un grabado de 1886 de un pozo artesiano en París.**

Normalmente el agua se extrae con una bomba centrífuga. Esta consiste en un conjunto de paletas montadas en un eje largo que llega de la boca del pozo, en donde está el motor, hasta el acuífero. Una variedad es sumergir el motor sellado que impulsa las paletas. Otra forma de extracción se efectúa mediante la inyección de aire comprimido al fondo del pozo por medio de una tubería llamada eductor, lo que provoca que se forme una mezcla de aire y agua, más ligera que el agua, y que por lo tanto flota hacia arriba; tiene las ventajas de no requerir partes móviles y de oxigenar el agua. Su principal desventaja es la baja eficiencia.



**Figura 34. El siglo pasado se construyeron ingeniosos dispositivos para extraer agua del subsuelo, como las bombas que aquí se muestran.**

En general los acueductos continuaban construyéndose aprovechando las pendientes, que deben ser lo suficientemente marcadas de modo que el agua fluya, mas no demasiado para evitar presión excesiva. Para salvar montañas se incluyen sifones y, si esto no es suficiente, el agua se bombea.

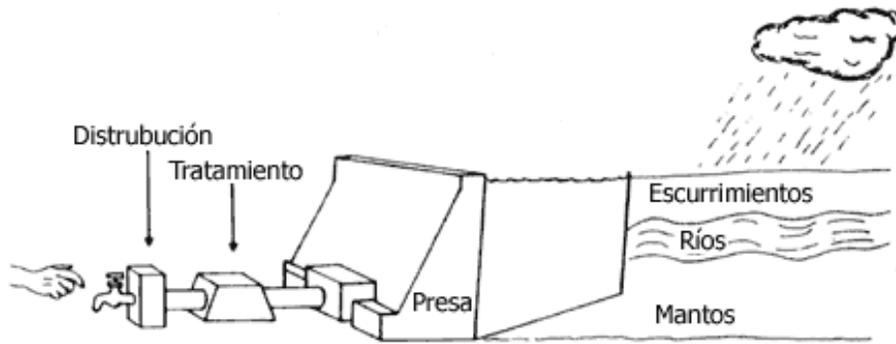
Normalmente estas vías de agua las conforman tubos cerrados, aunque hay tramos que pueden estar al descubierto. A fin de llevar el agua con eficiencia la línea debe tener la mínima superficie para el volumen transportado; geométricamente la mejor solución es un tubo de sección circular, aunque en el caso de grandes volúmenes no es práctico en cuestión de la resistencia de los materiales y se construyen canales de sección transversal en forma de herradura, lo que brinda mayor simplicidad en la construcción.

El concreto preesforzado es un magnífico material de construcción. Otro buen elemento es el hierro fundido que puede fabricarse de modo que resista grandes presiones; el principal problema es que si el contenido de sales del agua es muy alto la corrosión también lo es. Esto puede corregirse por medio de recubrimientos. Los tubos de asbesto son fáciles de moldear e instalar y ofrecen una solución muy práctica.

Los acueductos terminan en los sistemas de purificación y tratamiento de aguas. Una vez conducida el agua a su destino de uso es tratada para hacerla agradable, de buen sabor y dejarla libre de sustancias peligrosas para la salud o inadecuadas para su uso industrial o doméstico.

Existe una variedad de procesos para darle este tratamiento. Los más importantes son el almacenamiento, la aereación, la coagulación, la sedimentación, el ablandamiento, la filtración y la desinfección.

Otros procesos físicos y químicos se emplean con el fin de tratar aguas contaminadas con sustancias más difíciles de eliminar, pero con la descripción de los anteriores se puede tener una buena idea del esfuerzo que significa disponer de agua fresca pura y cristalina.



**Figura 35. Las obras hidráulicas aprovechan las fuentes de agua de la naturaleza para su consumo en las ciudades.**

El agua se *almacena* por periodos largos (más de un mes) antes de entrar a las plantas de tratamiento con el objeto de que sedimente la mayor cantidad posible de partículas sólidas suspendidas. Esto, además, reduce el contenido de bacterias.

Después empieza el tratamiento. Primero se *aerea* el agua, esto es, se mezcla con aire por medio de agitadores, cascadas en charolas o por aspersion a través de boquillas. El propósito de este proceso es suprimir el bióxido de carbono disuelto, que causa corrosión, y eliminar malos olores y sabores.



**Figura 36. Entre 1943 y 1951 se introdujo el agua del río Lerma para abastecer la ciudad de México. En las fotografías se muestran las obras de conducción y tratamiento que están en la segunda sección del Bosque de Chapultepec. La fuente es obra de Diego Rivera.**

El siguiente paso es someter el agua a la *coagulación*, es decir, a un proceso en el que se provoca que las partículas mayores que forman coloides sedimenten. Esto se logra por la adición de productos químicos como aluminato de sodio, sulfatos de hierro y de cobre y otras. La coagulación y sedimentación reducen el contenido de bacterias, eliminan el color y la turbiedad e indirectamente también reducen los olores y sabores.

El calcio, magnesio y otros metales normalmente presentes en el agua debido a su incorporación en su paso por

las rocas son perjudiciales en exceso. Para reducir estos minerales el agua se somete a un *ablandamiento*, que opera por precipitación al añadir productos químicos o por un filtrado a través de unas membranas llamadas de intercambio iónico, que atrapan estos minerales.

Después el agua se *filtra* en recipientes con arena que eliminan la materia suspendida. La arena está compuesta de sílice, cuarzo molido o antracita (carbón). Las algas, cuando se encuentran en grandes cantidades, se suprimen con un filtro de esponja de metal.

En lo que toca a *desinfectar* el agua, el compuesto más común que se emplea es el cloro, aunque puede también recurrirse al ozono o a la radiación ultravioleta.

El cloro se aplica antes del filtrado (preclorinación) así como antes de la distribución (posclorinación). La mayor parte de las plantas de tratamiento emplean cloro líquido que asegura la cantidad suficiente de cloro libre para actuar sobre las bacterias, a las que mata, y los virus, a los que inactiva. Sin embargo, cuando el agua tiene olores intensos el cloro puede reaccionar con la materia orgánica disuelta causando un sabor desagradable.

Otros procesos adicionales se emplean en casos especiales, como la adición de sulfato de cobre que elimina el exceso de algas, la filtración con carbón activado para suprimir los olores penetrantes y el uso de amoníaco y cloro (cloroamina) con los que se obtiene la desinfección profunda y el control del olor.

Algunas industrias dan al agua tratamientos posteriores, porque la que requieren debe ser muy pura. Emplean membranas especiales que prácticamente reducen a cero la materia suspendida.

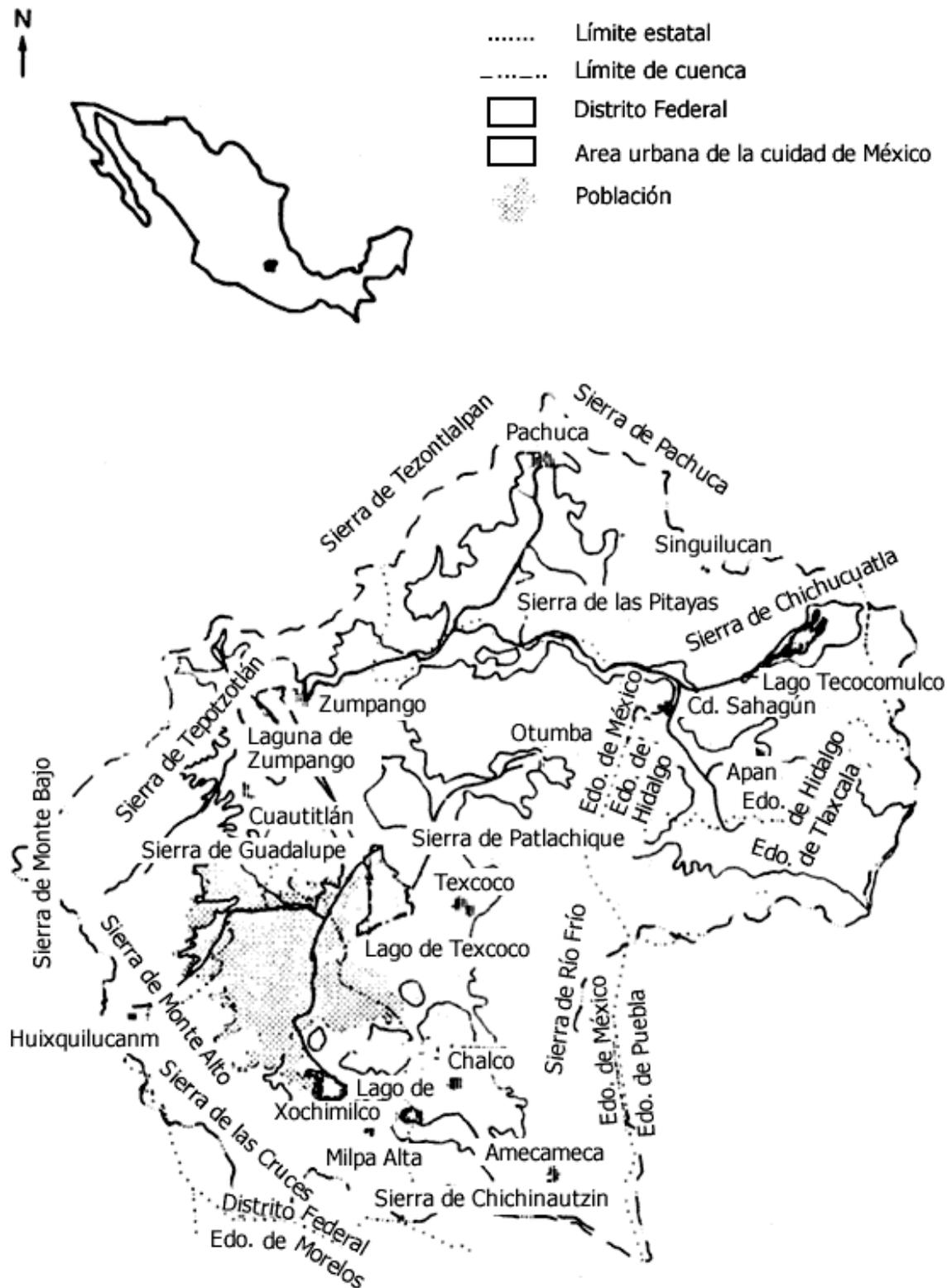
## IV.2. EL SISTEMA HIDRÁULICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO:

### 1) EL VALLE DE MÉXICO

El valle de México está situado al sur de la Mesa Central. Tiene una extensión de 9 600 km<sup>2</sup>, su forma es elíptica, con el eje mayor orientado de noreste a suroeste y longitud de 110 km; el eje menor va de este a oeste con una longitud de 80 km. El valle se encuentra completamente rodeado de montañas y las altitudes de su planicie central oscilan entre 2 240 y 2 390 m sobre el nivel del mar. Un hecho característico que ha acarreado sinnúmero de problemas a sus habitantes es que forma una cuenca cerrada, sin salida natural a los escurrimientos generados dentro de él. En la actualidad, de los grandes lagos que cubrían su superficie quedan solamente dos, que además son someros: el de Texcoco, que es el mayor y el de Zumpango, que le sigue en importancia. El de Chalco, en su tiempo el tercero en importancia, se extinguió por completo a principios de este siglo.

El clima del valle de México es subtropical de altura, templado, semiseco, con temperatura media anual de 18 grados centígrados. La época de lluvias abarca de mayo a octubre y la precipitación media anual equivale a una lámina de 700 milímetros.

Corren por la cuenca pocos ríos y no son aprovechables. Los manantiales y acuíferos —ligados entre sí— han desempeñado importante papel en saciar a la sed de la ciudad.



**Figura 37. El valle de México ha perdido sus fuentes propias de agua, quedan solamente dos lagos y además ya someros: el de Texcoco y el de Zumpango.**

Pero los manantiales fueron desapareciendo al aumentarse el bombeo: la extracción de agua del subsuelo se inició a mediados del siglo pasado, lo que ocasionó el hundimiento del terreno.

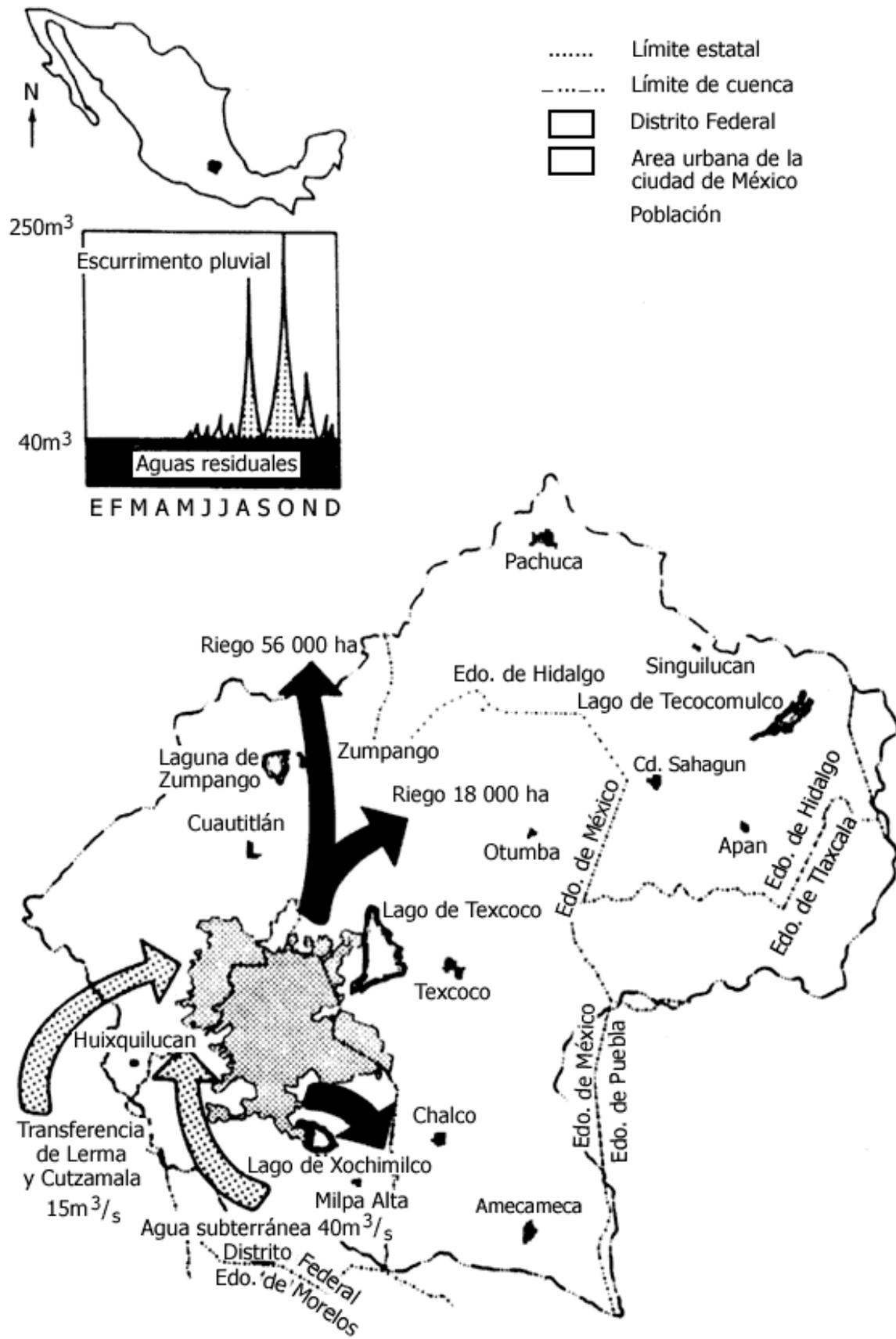


Figura 38. En la figura se muestra la utilización y el desalojo de las aguas del valle de México. Es de notar que prácticamente toda el agua que se suministra se desecha ya contaminada.

En la época en que fue fundada la Gran Tenochtitlan, el valle de México estaba cubierto por grandes lagos y las laderas de las montañas de bosques que fijaban la tierra y los depósitos acuíferos estaban llenos a su capacidad. El equilibrio hidrológico era estable y el clima también lo era y muy confortable.



**Figura 39. La Gran Tenochtitlán era una de las urbes más grandes y mejor organizadas de su tiempo. En las fotografías se muestran los centros ceremoniales de Tenochtitlán y Tlatelolco según la maqueta instalada en el centro de la ciudad de México.**

Para tener una idea de lo hermoso que era nuestro valle antes de que se iniciara su sistemático deterioro ecológico, es muy interesante leer las descripciones de Bernal Díaz del Castillo, quien vino con los primeros europeos a nuestro país, y las de Alejandro de Humboldt, uno de los europeos más universales que han existido.

Bernal Díaz del Castillo, en su *Historia verdadera de la conquista de la Nueva España*, narra sus primeras impresiones de la ciudad de México:

Y de que vimos cosas tan admirables no sabíamos qué nos decir, o si era verdad lo que por delante parecía, que por una parte en tierra había grandes ciudades, y en la laguna otras muchas, e víamos todo lleno de canoas, y en la calzada muchos puentes de trecho en trecho, y por delante estaba la gran ciudad de Méjico [...]

Y luego le tomó [Moctezuma a Cortés] por la mano y le dijo que mirase su gran ciudad y todas las más que había dentro en el agua, e muchos otros pueblos alrededor de la misma laguna en tierra, y que si no había visto muy bien su plaza, que desde allí [en el Templo Mayor] la podría ver muy mejor, e así lo estuvimos mirando, porque desde aquel grande y maldito templo ésta tan alto que todo lo señoreaba muy bien; y de allí vimos las tres calzadas que entran el Méjico, que la de Istapalapa, que fue por la que entramos cuatro días hacía, y la de Tacuba, que fue por la que después salimos huyendo la noche de nuestro gran desbarate [...] y la de Tepeaquilla. Y víamos el agua dulce que venía de Chapultepec, de que se proveía la ciudad [...] e entre nosotros hubo soldados que habían estado en muchas partes del mundo, e en Constantinopla e en toda Italia y Roma, y dijeron que plaza tan bien compuesta y con tanto concierto y tamaño e llena de tanta gente no la habían visto.

No es menos hermosa la descripción que hizo el naturalista alemán Alejandro de Humboldt a principios del siglo XIX, quien en su *Ensayo político sobre el Reino de la Nueva España* relata que:

Ciertamente no puede darse un espectáculo más rico y variado que el que presenta el valle, cuando en una hermosa mañana de verano, estando el cielo claro y con aquel azul turquí propio del aire seco y enrarecido de las altas montañas, se asoma uno por cualquiera de las torres de la catedral de México, o por lo alto de la colina de Chapultepec. Todo alrededor de esta

colina está cubierto de la más frondosa vegetación. Antiguos troncos de ahuehuetes, de más de 15 o 16 metros de circunferencia, levantan sus copas por encima de los *Suchinus*, que en su parte o traza se parecen a los sauces llorones de Oriente [...] La ciudad se presenta al espectador bañada por las aguas del lago de Texcoco, que rodeado de pueblos y lugarillos, le recuerda los más hermosos lagos de las montañas de la Suiza. Por todas partes conducen a la ciudad grandes calles de olmos y álamos blancos: dos acueductos construidos sobre elevados arcos atraviesan la llanura y presentan una perspectiva tan agradable como embelesadora [...]

En el subsuelo de México se encuentra el agua por todas partes a muy corta profundidad; pero es salobre como la del lago de Texcoco. Los dos acueductos que conducen a la ciudad el agua dulce son monumentos de construcción moderna muy dignos de la atención de los viajeros. Los manantiales de agua potable están al este de la ciudad, uno en el montecillo escueto de Chapultepec y el otro en el cerro de Santa Fe, cerca de la cordillera que separa el valle de Tenochtitlan del de Lerma y de Toluca.

Continúa Humboldt su narración mencionando que el agua que proviene de Chapultepec ya no era muy pura (como lo era en tiempos de los aztecas) y sólo se consumía en los arrabales, en tanto que la que provenía del cerro de Santa Fe (ahora un arrabal) estaba menos cargada de carbonato de cal, "sigue a lo largo (el segundo acueducto) de la Alameda y viene a parar en Tlaxcapana, en el puente de la Mariscal".



**Figura 40.** Esta fuente barroca (1755-1760), de autor anónimo, pertenecía al acueducto de Chapultepec.

Existían, además, dos fuentes de aguas termales, la de Nuestra Señora de Guadalupe y la del Peñón de los Baños. "Estas fuentes contienen ácido carbónico, sulfato de cal y de sosa, y muriato de sosa. En la del Peñón, cuya temperatura es bastante elevada, se han establecido baños muy saludables y bastante cómodos. Cerca de esta fuente es donde los indios fabrican la sal."

Las aguas de los lagos eran ricas en sales:

De los cinco lagos del valle de México, el de Texcoco tiene el agua más cargada de muriatos y carbonatos de sosa. El nitrato de bario prueba que esta agua no tiene en disolución ningún sulfato. El agua más limpia es la del lago de Xochimilco; yo he hallado que su peso específico es de 1.0009, cuando el agua destilada a la temperatura de 18 grados es de 1.000 y cuando el agua del lago de Texcoco es de 1.025. Por consiguiente esta última agua es más pesada que la del mar Báltico y menos que la del océano, la cual a diferentes latitudes se ha encontrado ser de 1.0269 y 1.0285. La cantidad de hidrógeno sulfurado (ácido sulfhídrico) que se desprende de la superficie de todos los lagos mexicanos contribuye sin duda en ciertas situaciones a la insalubridad del aire del valle. Sin embargo, es muy digno de notar que en las orillas de estos mismos lagos, cuya superficie está cubierta en parte por juncos y yerbas acuáticas, son muy raras las fiebres intermitentes.

Con el transcurso del tiempo estas características se han alterado; las formas de recarga han disminuido por la urbanización, se aprovecha una pequeña parte del agua superficial, otra se regula por medio de presas y el resto se desaloja de la cuenca; los acuíferos se explotan más allá de su nivel natural y el agua se contamina. Desde

1951;ha sido necesario traer agua de otras cuencas, que también empiezan a mostrar signos de sobreexplotación.

En las dos tablas siguientes se resume el balance de requerimientos de la cuenca del valle de México y de la distribución de usos en la ciudad de México.

### Requerimiento de servicios de la cuenca

	<i>Cantidad</i>	
	<i>(m<sup>3</sup>/seg)</i>	<i>Porcentaje</i>
Importación:		
de la cuenca del río Lerma	11	18.3
de la cuenca del río Cutzamala	4	6.6
Acuíferos del valle de México	40	66.8
Aguas tratadas	2	3.3
Aguas superficiales reguladas	3	5.0
TOTAL	60	100.0

### DESTINO DEL AGUA DE LA CUENCA

	<i>Cantidad</i>	
	<i>(m<sup>3</sup>/seg)</i>	<i>Porcentaje</i>
Uso urbano	52	86.7
Agrícola	8	13.3
	60	100.0

### ORIGEN DE LOS ACUÍFEROS DEL VALLE

	<i>Cantidad</i>	
	<i>(m<sup>3</sup>/seg)</i>	<i>Porcentaje</i>
Infiltración	23	38.4
Manos fósiles	17	28.4
	60	66.8

### Distribución de los usos del agua en la ciudad de México

<i>Uso</i>	<i>(40 m<sup>3</sup>/seg)</i>	<i>Cantidad</i>	
	<i>Número de usuarios</i>	<i>(m<sup>3</sup>/seg)</i>	<i>Porcentaje</i>
Doméstico	1 900 000 viviendas	22	55
Industrial	30 000 industrias	5	12.5
Servicios	60 000 establecimientos	4	10
Comercial	120 000 comercios	1	2.5
Usos no contabilizados (públicos y fugas)		8	20
TOTAL	2 110 000 usuarios	40	100

#### IV.3. EL SISTEMA HIDRÁULICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO:

##### 2) HISTORIA DE UN PROBLEMA

La historia del suministro y desalojo del agua en el valle de México es muy interesante. En 1325, los aztecas fundaron lo que sería la Gran Tenochtitlan. Este es el episodio más característico de la historia de este pueblo: revela íntimamente su modo de ser; una combinación de inteligencia práctica, habilidad política, fanatismo y estoicismo. El sitio, un islote rodeado de cañaverales, era tan poco atractivo que los anteriores habitantes del valle lo habían despreciado (De acuerdo con las tradiciones, el hallazgo de un águila sobre un nopal devorando una serpiente, determinó el lugar al que el caudillo Tenoch llevó a los aztecas por indicaciones de los dioses, mas ésta fue una justificación posterior a la elección del sitio en donde se asentaron; en los primeros tiempos *mexica* era sinónimo de "el que come yerbas".) Pero el lugar constituía un sitio estratégico, de fácil defensa, que estaba en los confines de tres reinos, pero no pertenecía a ninguno de ellos; además, en poco tiempo la ubicación resultó de un valor comercial nada despreciable.

El crecimiento de la gran urbe que describen Bernal Díaz del Castillo y Alejandro de Humboldt estuvo plagado de calamidades. La ciudad creció sobre una laguna y hubo que construir grandes calzadas que la conectaran con tierra firme.

La amenaza de un embate de las aguas estaba siempre presente; bastaban veranos muy lluviosos para que el nivel del lago desbordase a la ciudad. El problema se contuvo con bardas y diques: Netzahualcóyotl en 1450, construyó uno muy extenso, de 16 km de longitud y, el gran conquistador Ahuizotl mandó realizar una colosal obra de suministro de agua que en la inundación de 1502 se rompió, causando la muerte del emperador y constructor.

El abastecimiento de agua inició poco después la explotación de los manantiales vecinos. Netzahualcóyotl construyó el primer acueducto de Chapultepec a la ciudad.

Después de la Conquista, en 1521, se prosiguieron las obras de suministro y de contención de las aguas del lago debido a las periódicas inundaciones, como las de los años de 1604 y 1607, causadas por grandes avenidas del río Cuautitlán.

Enrico Martínez (nacido Heinrich Martin, en Hamburgo, Alemania) fue un ilustre hombre de la Colonia. Cosmógrafo real, impresor y escritor científico. Desde 1607 trabajó en la magna obra de desagüe del valle de México. Dirigió la construcción de un tajo que iba desde Nochistongo, al noroeste del valle, hasta encontrarse con el río de Tula. Con esta obra se pretendió dar salida a las crecidas del río Cuautitlán y las de los lagos de México y de Texcoco. Pero el tajo, que en parte era abierto y en parte subterráneo, resultó demasiado estrecho y se derrumbó, dando lugar a los serios daños de la inundación de 1629. El ingeniero Martínez, a pesar de las críticas, reanudó la obra aunque no pudo verla finalizada pues fue hasta 1789 cuando el río Cuautitlán pudo ser controlado por la primera salida artificial del valle de México. También se inició así, sin pretenderlo, el proceso de cambio ecológico.

El tajo de Nochistongo alteró parcialmente las condiciones hidrológicas del valle: los lagos ya no crecían, pero continuaban las inundaciones debidas a las crecidas de los ríos. Hacia 1856 las inundaciones fueron cada vez más alarmantes y hubo que levantar diques de hasta de 3 m de altura. Dos grandes obras más de desagüe se realizaron: el Gran Canal del Desagüe y el Túnel de Tequisquiac; ambos se inauguraron en 1900.



Figura 41. Por cuatro siglos, lagos, canales y acequias fueron rutas de comercio y aprovisionamiento de la ciudad de México. Todavía el siglo pasado existían líneas de navegación en el valle.



Figura 41.(b)

En el siglo XIX empezó la perforación de pozos. En 1847 había 500; en 1886 más de 1 000. La consecuencia fue el inicio del hundimiento de la ciudad. Entre los años de 1891 a 1895 se registró un descenso de 5 cm por año, se redujo la presión de los acuíferos y disminuyó el caudal del manantial de Chapultepec.

Ya en este siglo, y como resultado del gran crecimiento de la ciudad, a partir de 1936 aumentó la explotación del agua del subsuelo. Entre este año y 1944 se perforaron 93 pozos profundos, cuya consecuencia fue acelerar el hundimiento de la ciudad, que entre 1938 y 1948 aumentó a 18 cm por año.

En 1942 se hizo necesario iniciar los trabajos para traer agua del río Lerma con el fin de abastecer las necesidades de la ciudad, aunque por diversas razones las obras se retrasaron hasta 1951. No hubo pues más remedio que continuar perforando pozos.

Para estas fechas ya los estudiosos estaban preocupados por el daño al subsuelo. Así, el doctor Nabor Carrillo dejó bien claro, con demostraciones técnicas, que el hundimiento de la ciudad se debía al abatimiento de la presión del acuífero.

Los permisos de perforación de pozos fueron suspendidos en 1953, aunque en 1954 se tuvo que perforar 10 pozos más, a pesar que estaba en construcción el acueducto de Chiconautla, inaugurado en 1957. Entre 1960 y 1967 se perforaron todavía 50 pozos más que, aunque alejados del centro de la ciudad, la zona más afectada, también causaron hundimientos locales. Al menos los del centro disminuyeron apreciablemente de 1960 a 1970.

Ante el exceso de demanda se empezó a tratar el agua para su reuso. En 1954 se empezó a trabajar la primera planta de tratamiento de aguas residuales en el Bosque de Chapultepec. La calidad, no era muy buena, pero

bastaba para regar áreas verdes y llenar lagos.

El otro gran problema de la época virreinal, relacionado con el suministro de agua, fue la contención de las inundaciones y el desalojo de las aguas pluviales. Este problema persistía en el siglo pasado.

Se tenía también, por supuesto, problemas con las aguas residuales, pero puesto que ello era de menor envergadura debido a lo reducido de la población, las autoridades permitían que los drenajes de las casas desaguaran sus líquidos en acequias y zanjas y los desechos sólidos se recolectaban y eran arrojados en las afueras de la ciudad.

A principios del presente siglo, Roberto Gayol construyó una red de alcantarillado que se extendía de poniente a oriente, siguiendo la pendiente del terreno y que desaguaba en el Gran Canal, pero de 1940 a 1950 hubo varias inundaciones graves en la parte baja de la ciudad.

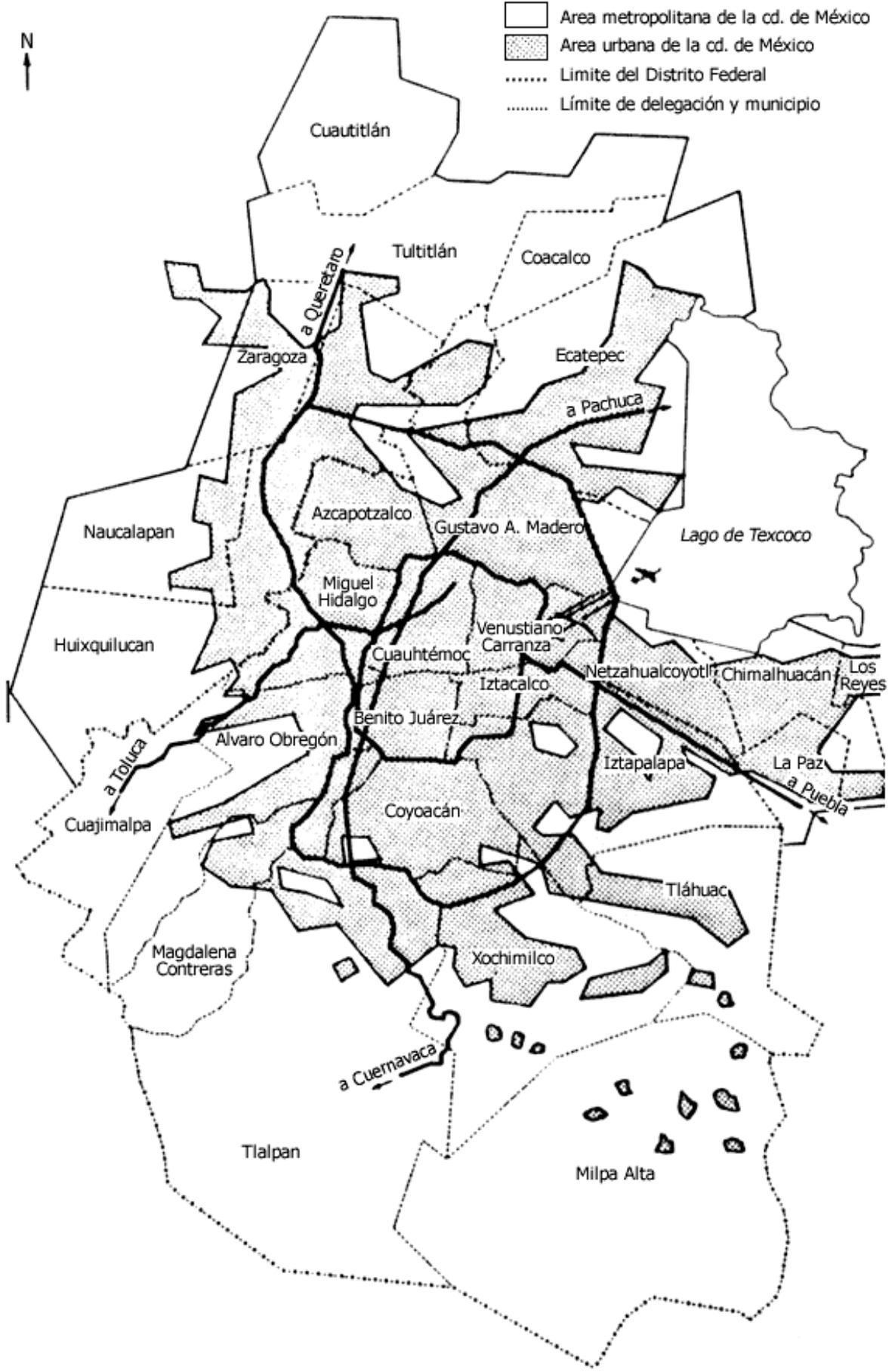
La sobreexplotación del subsuelo deterioró el drenaje y por tanto disminuyó la capacidad de desalojo de aguas, por lo que hubo que ampliar el Gran Canal y construir un segundo túnel en Tequisquiác. El hundimiento de la ciudad ha sido tan grande que a principios de siglo el Gran Canal tenía una pendiente de 19 cm/km y, en la actualidad, es casi horizontal.

En 1910 el lago de Texcoco regulaba las aguas del Gran Canal, pues estaba situado a 1.9 m por debajo del nivel del centro de la ciudad. En 1970 el hundimiento progresivo colocó tal sitio a 5.5 m por *debajo* del lago de Texcoco.

De esta suerte, el Gran Canal que fue proyectado para captar agua por gravedad, quedó en su tramo del centro de la ciudad bajo el nivel de descarga, por lo que hubo necesidad de bombear el agua. De 1952 a 1966 se instalaron 29 plantas de bombeo, lo que implicó un notable aumento en los costos de operación y mantenimiento. En esa época se entubaron total o parcialmente los ríos Consulado, Mixcoac, La Piedad y Churubusco. El río Consulado conducía aguas residuales a cielo abierto con la consiguiente insalubridad.

Tal situación obligó a la construcción del drenaje profundo, cuya primera etapa se terminó en 1975. Se excavó a profundidad calculada para que no se afectaran los canales debido al hundimiento del terreno y el desagüe se produjera sólo por gravedad.

Las grandes inundaciones se han controlado, pero ahora surgen problemas nuevos: las aguas de lluvia no pueden infiltrarse al subsuelo debido a la gran área pavimentada; además, con mayor población debieramos contar con mayor dotación de agua y, a la vez, hay más agua por desechar. Las obras viales, como el Metro, interfieren con el alcantarillado y disminuyen su eficiencia. Hay insalubridad, deterioro de los ríos y peligro de contaminar los acuíferos. La ciudad más grande del orbe incuba problemas congruentes con su tamaño.



**Figura 42. La ciudad de México y sus áreas conurbadas imponen gran demanda de agua y otros servicios.**

IV.4. EL SISTEMA HIDRÁULICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO:

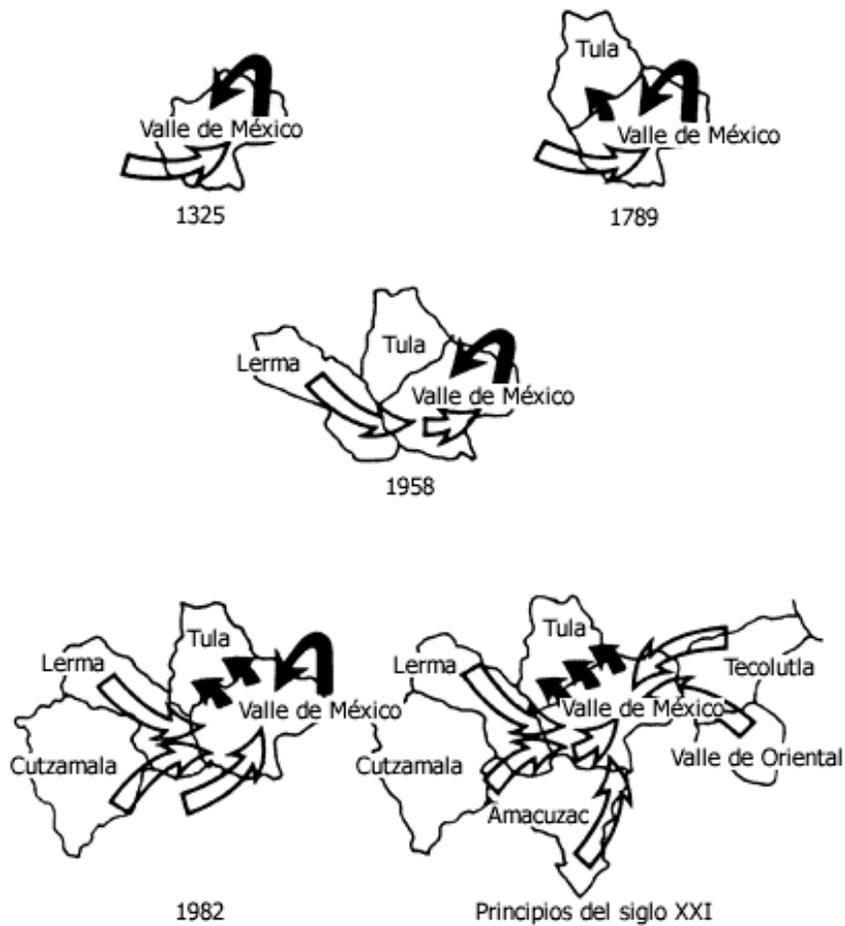
3) LA SITUACIÓN ACTUAL

La ciudad de México ha crecido espectacularmente a partir de los años cincuenta, como puede verse en la tabla.

<i>Año</i>	<i>Población de laudad. de Mex. (miles de habs.)</i>	<i>Población en área metropolitana (miles de habs.) incluye parte Edo. de México</i>	<i>Área interna (hectáreas)</i>
1 524	30		270
1 600	50.5		347
1 700	105		661
1 800	137		1 076
1 845	240		1 412
1 900	541		2 713
1 910	721		4 010
1 921	906		4 637
1 930	1 230		8 608
1 940	1 760		11 753
1 950	3 050		24 058
1 960	4 870	5 186	36 000
1 970	6 847	8 797	56 500
1 980	9 500	14 500	100 000

Y así, en proporción semejante, han crecido los requerimientos de agua de esta población. A partir de 1970 los límites del Distrito Federal fueron rebasados y una proporción grande de la población (30%) vive en los municipios del Estado de México pero trabaja y usa los recursos de la ciudad de México. De esta forma surgió la gran metrópoli.

En materia de agua, la ciudad de México vive grandes paradojas: subsiste el problema del desalojo de las aguas de una cuenca al exterior pero hay escasez de agua fresca. En lo que se refiere a la distribución, parte de la población cuenta con toda el agua que desea, en tanto que otra parte, la mayor, tiene grandes limitaciones de este recurso y recibe dotaciones muy reducidas.



**Figura 43. El crecimiento proyectado de la gran ciudad exigirá el suministro de agua de zonas situadas cada vez más lejos a un gran costo económico y social.**

Quizás uno de los problemas más complejos sea el de suministro, pues cada vez el agua viene de más lejos y, además del costo económico que ello representa, se plantean problemas técnicos, políticos, sociales, administrativos y jurídicos.

En 1982 la ciudad de México requería un caudal promedio de 40 metros cúbicos por segundo para su abastecimiento; 27.4 de ellos (el 68%) provenían de 1132 pozos y los 12.6 restantes (el otro 32%) de cinco sistemas adicionales de pozos y del río Cutzamala. El sistema del río Lerma, que empezó a funcionar en 1951, consta de 234 pozos que en la actualidad aportan una cantidad marginal de un metro cúbico por segundo, pues a partir de 1972 la mayor parte de su caudal se derivó a la zona metropolitana de la ciudad de México fincada en el Estado de México.

El 97% de los domicilios contaba en 1982 con tomas de agua. Empero, existe un déficit por habitante, pues en números reales se dispone de 40 m<sup>3</sup>/seg para 10 millones de habitantes, es decir 346 litros por habitante y por día (1/hab-día), que es inferior a la demanda de 360 l/hab-día, y esto suponiendo que fuese una distribución uniforme, lo que está lejos de ser cierto.

El gobierno capitalino ha hecho esfuerzos enormes para aumentar las tomas domiciliarias en las colonias populares, incluyendo la rehabilitación de pozos de extracción. El costo, sin apelar a ninguna fuente oficial, debe ser enorme.

La calidad de agua es satisfactoria, a pesar de las historias terroríficas que circulan entre algunos visitantes (*Do not drink water*, o bien, *Remember that ice is water*). Normalmente basta con plantas cloradoras y sólo en casos

aislados es necesario dar un tratamiento más complejo al agua con que contamos. En algunos casos se ha observado un incremento en la cantidad de organismos coliformes, fundamentalmente debido a escurrimientos que contaminan las fuentes, pero un seguimiento diario de la calidad del agua asegura que vuelve pronto a la normalidad.

Los parámetros que definen la calidad del agua son cuarenta y dos, siete físicos, treinta y un químicos y cuatro biológicos, que cubren las normas mexicanas e internacionales (Servicio de Salud Pública de EUA, Organización Mundial de la Salud y Comunidad Europea de Naciones) buscando una cobertura de la calidad más conveniente para nuestro medio. Para supervisar la calidad del agua se cuenta con un Laboratorio Central de Control en Xochipantongo y con varios laboratorios móviles y satélites.

Por otro lado, es necesario tratar las aguas residuales tanto para reducir el efecto contaminante de las descargas como para reutilizarlas en la cuenca del valle de México.

Esta actividad ha venido en aumento creciente desde la década de los cincuenta. Para ello se toma en cuenta un conjunto de 152 parámetros y contaminantes que se manejan mediante procesos ambientales así como operaciones y procesos unitarios.

Los procesos ambientales incluyen la volatilización, la sorción, el transporte, la fotólisis, la oxidación, la hidrólisis, la bioacumulación y la biodegradación. Las operaciones y procesos unitarios incluyen la mezcla, la sedimentación, la coagulación/floculación, la filtración, la oxidación química, la transferencia de oxígeno, el intercambio iónico, los sistemas facultativos, la ósmosis inversa y la electrodiálisis.

En la actualidad existen nueve plantas de tratamiento de aguas residuales, incluyendo una experimental en la Ciudad Universitaria. Las plantas y sus capacidades se muestran en la siguiente tabla:

<i>Planta</i>	<i>Capacidad instalada l/s</i>	<i>Capacidad de aprovechamiento l/s</i>	<i>%</i>	<i>Inicio de operaciones, año</i>
Cerro de la estrella	2 000	1 800	90	1971
Xochimilco	1 250	0	0	1959
San Juan de Aragón	500	300	60	1964
Ciudad Deportiva	230	230	100	1958
Chapultepec	160	160	100	1956
Acueducto de Guadalupe	80	0	0	1982
Bosques de las Lomas	55	22	40	1973
Ciudad Universitaria	40	n.d.	n.d.	1982
El Rosario	25	22	88	1981
TOTAL	4 340	2 534	59	

También se evalúan las tecnologías disponibles y se han realizado esfuerzos con resultados muy halagüeños. La mayoría de los procesos tiene escasas restricciones en cuanto a la existencia de equipos y materiales en el mercado nacional, además de que el diseño y puesta en marcha está en manos de técnicos mexicanos. Otras instituciones, con abundantes problemas de tratamiento de agua, como Petróleos Mexicanos y la Comisión Federal de Electricidad, tienen mucha experiencia práctica que debería ser incorporada en un esfuerzo nacional a los logros del Departamento del Distrito Federal. El Instituto Mexicano del Petróleo, por su parte, ha recogido la

urgencia de estos problemas y tiene en desarrollo tecnologías de tratamiento, purificación y desalación de aguas, incluyendo numerosas experiencias de laboratorio y algunas plantas piloto en aereación y desalación.

El agua renovada puede utilizarse en un sinnúmero de destinos, dependiendo de su calidad. Las autoridades mexicanas han definido un índice de calidad de aguas renovadas (ICARen) en función de las concentraciones de compuestos químicos y biológicos presentes en el agua, el criterio de concentración aceptable de los anteriores parámetros y el número de parámetros y contaminantes involucrados en determinado uso; así, un ICARen cercano a cero indica que el agua es perfectamente aceptable para su uso potable, en tanto que superior a 38 la hace totalmente inservible. En la tabla se dan algunos valores típicos:

<i>Uso</i>	<i>ICA Ren</i>
Potable	<3
Industrial: producción de vapor	16
Industrial: enfriamiento	22
Acuacultura: pesca	25
Recreativo con contacto primario: natación	26
Comercio, servicio, industrial (procesos)	26
Ganadería: abrevaderos	27
Agricultura: productos que se consumen crudos	28
Municipal, no potable	30
Agricultura: huertas y viñas	34
Agricultura: forrajes, cultivos, industriales, cultivos que no deben consumirse crudos	35
Ornamental: áreas verdes, industrial, servicios generales	35
Recreativo con contacto secundario: navegación deportiva o lagos de recreo	36
No recomendable	38

Para finalizar unas cuantas líneas sobre el drenaje de la ciudad de México, al cual es muy difícil aplicar los métodos tradicionales de drenaje, pues nuestra ciudad tiene características muy peculiares, entre ellas la enorme extensión de superficie alcantarillada (500 kilómetros cuadrados), la magnitud y rapidez del crecimiento urbano, el asentamiento del subsuelo con la consecuente obsolescencia de los sistemas de drenaje, el cambio de la pendiente natural del terreno y la interconexión con el drenaje profundo, que complica la red de alcantarillado. Los ingenieros del Departamento del Distrito Federal han desarrollado modelos matemáticos rigurosos que simulan, por medio de ecuaciones avanzadas, el movimiento de los flujos de agua de descarga; de esta manera pueden tomarse decisiones sobre el crecimiento que reduzcan la inversión y aumenten el beneficio.

## LO QUE SE QUEDÓ EN EL TINTERO

Y así podrían seguir más capítulos: "El extraño caso del agua trepadora", "Cómo sacar agua sin sal del mar", "Otro tipo de agua, más pesada y mucho más escasa", etcétera.

El primer capítulo no escrito tendría que ver con un hecho curiosísimo que se llama *efecto Coanda*, y que se observa cuando se vierte un líquido lentamente; el líquido, en vez de caer verticalmente, se pega a la superficie externa del recipiente, deslizándose por ella antes de formar una gota y caer. En el agua el efecto Coanda es particularmente notable por la gran cohesión de este líquido, pues se acumula una gran masa antes de formar

gotas.



**Figura 44. El efecto Coanda es una curiosa manifestación de la gran tensión superficial del agua: al escurrir por la boca de una jarra ésta tenderá a adherirse a la superficie externa.**

Cuando se sirve el café en una cena de manteles largos, el efecto Coanda se hace sentir como una de las propiedades más notables del agua, pues es el directamente responsable de las marcadas manchas oscuras que quedan en la mesa. En la boquilla de algunas teteras existe un diseño anticoanda, que es un orificio que hace retroceder a la inoportunas gotitas.

El segundo capítulo no escrito tendría que ver con una aplicación extremadamente importante de los principios físicos para purificar el agua salada. Se recordará que hay un límite de salinidad más allá del cual el agua no es adecuada para el consumo humano. El agua de mar no lo es.

Puesto que hay tal cantidad de agua de mar y salobre y la escasez es una realidad desafortunadamente demasiado cercana, se han desarrollado técnicas para eliminar el exceso de sales y aumentar el caudal de agua potable. Existen varias formas, aunque las más usuales a nivel industrial pertenecen a una de dos clases: evaporación o filtración con membranas.

Estos procesos son fáciles de poner en funcionamiento y, por ejemplo, la capital de Arabia Saudita, Riyad, se surte del agua que es desalada por una enorme planta situada en la costa que, además, toma su energía del calor de desecho de la central eléctrica vecina.

El último capítulo no escrito tendría que ver con una curiosa variedad del agua ordinaria que sirve fundamentalmente para moderar las reacciones en cadena en un reactor nuclear. Esta agua es tan poco abundante que, para fabricarla, hay que descartar 7 000 moléculas del hidrógeno ordinario para encontrar una molécula del tipo pesado que lleva (llamado deuterio), y esto hay que hacerlo muchas veces, pues se necesita una pureza del producto de 99.97 por ciento.

Otra idea que se antoja desarrollar sobre el tema del agua, versaría sobre la formación de las delicadas estructuras de los copos de nieve: una manifestación del orden molecular. O las caprichosas líneas en el interior de un cubito de hielo, producto de la desgasificación que se produce al congelarlo.

En realidad podrían surgir nuevos temas, pero creo que esto es suficiente.

Suficiente para haber pasado un rato hablando, con letras, del agua, tratando de inducir al lector a dedicarle tiempo pues, como le dijo el zorro al Principito en el cuento de Saint-Exupéry, lo importante es el tiempo que le has dedicado a tu rosa; es lo que la hace diferente a todas las demás.

Ya he bebido mi parte, la demás la deajo correr.

---

Inicio |



# AGRADECIMIENTOS

Cuando se tiene un logro siempre hay un equipo detrás.

Todo comenzó en una conversación con Fermín Viniegra sobre esta serie. Alejandra Jaidar con su entusiasmo característico me alentó a escribir este libro; lamento no habérselo podido entregar.

Isaac Schifter me ganó la carrera y su libro va en la segunda edición. Ya lo he perdonado.

El manuscrito fue hecho con paciencia y cariño por Ruth Martínez y Mario Hurtado. Sus preguntas y comentarios trajeron más material y más trabajo para todos.

Mi suegro, Carlos González Camarena, leyó el manuscrito entero y me pidió que no lo dejara. También lamento no haber tenido el tiempo para entregárselo.

El equipo Guerrero, Guadalupe, Alejandro y Ana Carolina me sigue queriendo a pesar de los fines de semana que les robé para acabar el libro.

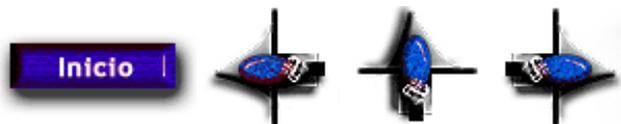
A todos ellos, y a muchos otros que sería difícil enumerar pero no olvidar, muchas gracias.



# COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de noviembre de 1991 en los talleres de Encuadernación Progreso, S. A. de C. V. , Calz. de San Lorenzo, 202; 09830 México, D. F. Se tiraron 10 000 ejemplares.

La Ciencia desde México es coordinada editorialmente por MARCO ANTONIO PULIDO Y MARÍA DEL CARMEN FARÍAS .



# CONTRAPORTADA

El agua constituyó un motivo de reflexión de primordial importancia entre los presocráticos, quienes fundaron las bases del gran edificio del pensamiento y saber occidentales. Junto con los otros tres "elementos" —el aire, la tierra y el fuego— el agua fue estimada como una sustancia generadora del espíritu y la materia. Posteriormente, al establecerse las ciencias particulares, ha seguido siendo tema de interés por varias de ellas y los conocimientos que su estudio arroja aumentan su importancia científica.

Esta obra de Manuel Guerrero constituye un valioso resumen monográfico, al mismo tiempo que una amena introducción al conocimiento actual del H<sub>2</sub>O. El agua, nos recuerda Manuel Guerrero, no sólo es indispensable para los seres vivos, sino, dadas sus propiedades, es también el medio donde se originó la vida. Este líquido, tan común y familiar, en realidad es muy diferente de cualquier otro; de acuerdo con su composición química debería ser un gas y cuando se solidifica, debiera hundirse en lugar de flotar, además de que su cohesión molecular lo asemeja más a un sólido que a otro líquido. Al estudio macroscópico se añade el microscópico, que revela aspectos como el de su estructura molecular en forma de "redes" cuando es líquida y estructuras geométricas cuando es sólida o hielo. Estos datos permiten comprender variados fenómenos del comportamiento en diferentes condiciones de volumen, temperatura y presión.

El conocimiento de la composición, comportamiento y propiedades del agua tiene importancia no sólo científica: la tecnología lo utiliza en diversidad de aplicaciones industriales y, en este aspecto, el buen sentido ecológico nos advierte de su buen uso.

Manuel Guerrero estudió física en la Facultad de Ciencias de la UNAM y su tesis fue desarrollada en los laboratorios Van de Graaff del Instituto de Física. Tiene el doctorado en físico-química del Imperial College of Science and Technology. Ha escrito dos libros sobre la tecnología futura de los combustibles fósiles y publicado numerosos artículos en revistas nacionales y extranjeras. Ha sido maestro en la UNAM y la UAM y actualmente es miembro del Comité Técnico Asesor del Programa Universitario de Energía de la UNAM.

