

Rafael Marín Galvín

**FISICOQUÍMICA
Y MICROBIOLOGÍA
DE LOS MEDIOS ACUÁTICOS**

**Tratamiento y control
de calidad de aguas**

Segunda edición



Madrid • Buenos Aires • México • Bogotá

ÍNDICE

Presentación	XIII
Prefacio	XIX
1. DINÁMICA FISICOQUÍMICA DE AGUAS	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Origen del agua de la Tierra.....	3
1.3. Propiedades físicas y químicas del agua	5
1.4. Temperatura, color, olor-sabor.....	10
1.5. Turbidez-transparencia, residuo seco, conductividad.....	15
1.6. pH, oxígeno disuelto, potencial redox.....	19
1.7. Compuestos de carbono	23
1.8. Compuestos de azufre.....	26
1.9. Compuestos nitrogenados.....	27
1.10. Compuestos fosforados.....	30
1.11. Sílice.....	31
1.12. Halógenos.....	32
1.13. Metales en aguas	34
1.14. Compuestos orgánicos	59
1.14.1. Sustancias húmicas	61
1.14.2. Trihalometanos.....	62
1.14.3. Fenoles.....	64
1.14.4. Detergentes.....	65
1.14.5. Insecticidas, herbicidas	66
1.14.6. Hidrocarburos aromáticos policíclicos.....	71
1.14.7. Acrilamida.....	73
1.14.8. Benceno.....	73

1.14.9. 1,2-dicloroetano	74
1.14.10. Epiclorhidrina.....	75
1.14.11. Tetracloroetano.....	75
1.14.12. Tricloroetano	76
1.14.13. Cloruro de vinilo	77
1.14.14. Radiactividad en aguas	78
2. MICROBIOLOGÍAS DE LAS AGUAS.....	83
2.1. Introducción.....	83
2.2. Microorganismos del medio acuático.....	84
2.2.1. Clasificación de los organismos según sus requerimientos nutricionales.....	84
2.2.2. Bacterias	85
2.2.3. Cianofíceas	89
2.2.4. Hongos.....	92
2.2.5. Protozoos	96
2.2.6. Algas fitoplanctónicas	97
2.2.7. Virus.....	99
2.3. Aspectos microbiológicos de los principales ciclos bioquímicos del agua.....	101
2.3.1. Interconexión entre ciclos bioquímicos.....	109
2.4. Potabilización y depuración de aguas: organismos implicados.....	110
2.4.1. Potabilización de aguas.....	111
2.4.2. Aguas residuales y su depuración.....	111
2.4.3. Digestión anaerobia de aguas residuales y fangos orgánicos	116
2.5. Enfermedades de transmisión hídrica y relacionadas con el agua	117
2.6. Control microbiológico del agua: indicadores fecales.....	125
2.6.1. Enterobacterias	127
2.6.2. Estreptococos	131
2.6.3. Clostridium.....	133
2.6.4. Pseudomonas aeruginosa	133
2.6.5. Estafilococos	134
2.6.6. <i>Legionella spp.</i>	134
3. REGULACIÓN DE SUSTANCIAS QUÍMICAS EN MEDIOS ACUÁTICOS	135
3.1. Introducción.....	135
3.2. Disolución y precipitación de especies químicas en aguas	135
3.2.1. Disolución de gases en aguas	135
3.2.2. Disolución de rocas y minerales.....	137

3.3.	Formación de complejos.....	139
3.3.1.	Los complejos en los medios acuáticos	139
3.3.2.	Iones en disolución y complejación	140
3.3.3.	Complejos inorgánicos de metales traza	143
3.3.4.	Complejos orgánicos de metales traza	144
3.4.	Fenómenos de adsorción.....	152
3.4.1.	Isotermas de adsorción.....	152
3.4.2.	Adsorción sobre partículas acuáticas.....	153
3.4.3.	El efecto hidrofóbico.....	158
3.4.4.	Interacciones electrostáticas superficiales. Sistemas coloidales.....	159
3.5.	Procesos fotoquímicos en medios acuáticos	160
3.5.1.	Breve introducción a la fotoquímica	160
3.5.2.	Tipos de procesos y reacciones fotoquímicas	162
3.6.	Regulación de metales traza y sustancias químicas en general en aguas naturales.....	164
3.6.1.	Regulación de metales pesados en aguas de ríos.....	165
3.6.2.	Regulación de elementos traza en lagos y embalses	167
3.6.3.	Regulación de elementos traza y sustancias químicas en general en océanos.....	173
4.	TRATAMIENTO Y DEPURACIÓN INDUSTRIAL DE AGUAS	177
4.1.	Introducción.....	177
4.2.	Bases teóricas del tratamiento de aguas	178
4.2.1.	Coagulación-floculación. Decantación	179
4.2.2.	Flotación	185
4.2.3.	Filtración.....	187
4.2.4.	Separación por membranas filtrantes	189
4.2.5.	Adsorción	192
4.2.6.	Intercambio iónico	194
4.2.7.	Precipitación.....	196
4.2.8.	Neutralización	198
4.2.9.	Oxidación-reducción.....	199
4.2.10.	Desinfección.....	202
4.2.11.	Aspectos biológicos.....	205
4.3.	Procesos más usuales de tratamiento de aguas	207
4.3.1.	Pretratamientos.....	207
4.3.2.	Decantación-flotación	209
4.3.3.	Filtración-adsorción	216
4.3.4.	Oxidación-desinfección.....	219
4.3.5.	Aireación-desaireación.....	223

4.3.6. Corrección y afino.....	224
4.3.7. Sistemas de apoyo en tratamiento y depuración.....	226
4.4. Tratamiento de aguas: ETAP.....	229
4.5. Depuración de aguas: EDAR.....	237
4.5.1. Depuración convencional aerobia.....	237
4.5.2. Tecnologías blandas.....	244
4.5.3. Aplicación del tratamiento fisicoquímico en depuración de aguas domésticas.....	247
4.5.4. Depuración de aguas industriales: técnicas anaerobias y fisicoquímicas.....	252
5. NORMATIVA BÁSICA.....	259
5.1. Introducción.....	259
5.2. Ley de Aguas y Reglamentos que la desarrollan.....	260
5.2.1. Real Decreto 606/2003.....	268
5.2.2. Orden MAM 1873/2004.....	268
5.2.3. Orden MAM 985/2006.....	268
5.2.4. Real Decreto Ley 4/2007.....	268
5.2.5. Real Decreto 9/2008.....	268
5.2.6. Orden MMA 85/2008.....	269
5.2.7. Real Decreto 1383/2009.....	269
5.2.8. Real Decreto 1514/2009.....	269
5.2.9. Real Decreto 1161/2010.....	269
5.2.10. Real Decreto 260/2011.....	269
5.2.11. Resolución de 30 de junio de 2011 (BOE nº 180).....	269
5.2.12. Real Decreto 1290/2012.....	269
5.2.13. Real Decreto 670/2013.....	270
5.2.14. Real Decreto 817/2015.....	270
5.2.15. Real Decreto 638/2016.....	276
5.3. Aguas de consumo.....	276
5.3.1. Real Decreto 140/2003 sobre aguas de consumo.....	276
5.3.2. Real Decreto 1798/2010 sobre aguas minerales naturales y envasadas.....	290
5.3.3. Real Decreto 1799/2010 sobre aguas preparadas envasadas.....	294
5.3.4. Real Decreto 314/2016 sobre control radiológico de aguas.....	297
5.3.5. Decreto estatal sobre legionelosis.....	299
5.3.6. Reglamento del suministro domiciliario de agua de Andalucía.....	302
5.4. Aguas regeneradas: Real Decreto 1620/2007.....	304

5.5.	Aguas de piscinas: Real Decreto 742/2013.....	307
5.6.	Aguas de baño: Real Decreto 1341/2007.....	309
5.7.	Normativas españolas sobre vertidos a cauce y a redes de saneamiento.....	311
5.7.1.	Real Decreto 1290/2012.....	314
5.7.2.	Real Decreto 508/2007.....	315
5.7.3.	Reglamentación autonómica y local.....	318
6.	LA CONTAMINACIÓN EMERGENTE.....	325
6.1.	Introducción.....	325
6.2.	Compuestos emergentes regulados.....	328
6.2.1.	Metales pesados y compuestos organoestánicos.....	331
6.2.2.	Plaguicidas organoclorados, organofosforados y organitrogenados.....	331
6.2.3.	Compuestos orgánicos volátiles (COV).....	333
6.2.4.	Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).....	334
6.2.5.	Alquilfenoles y otros compuestos orgánicos.....	334
6.3.	Sustancias farmacéuticas y medicamentos.....	337
6.4.	Drogas ilegales o de abuso.....	339
6.5.	Disruptores endocrinos.....	340
6.5.1.	Principales disruptores endocrinos.....	341
6.6.	Microplásticos.....	342
6.7.	Patógenos emergentes.....	345
7.	ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DE AGUAS.....	351
7.1.	Introducción.....	351
7.2.	Toma de muestras.....	352
7.3.	Generalidades sobre técnicas analíticas.....	358
7.3.1.	Técnicas de análisis fisicoquímico.....	360
7.3.2.	Métodos de separación y técnicas cromatográficas.....	363
7.3.3.	Métodos microbiológicos y biológicos.....	365
7.3.4.	Aproximación al control de calidad en aguas.....	366
7.4.	Parámetros microbiológicos.....	371
7.5.	Parámetros químicos.....	372
7.6.	Parámetros químicos controlados según especificaciones de productos.....	384
7.7.	Parámetros indicadores.....	385
7.8.	Radiactividad.....	390
7.9.	Otros análisis habituales.....	391
7.10.	Aguas residuales y vertidos y otros análisis de interés.....	402

8. BIBLIOGRAFÍA.....	413
8.1. Química-Física, dinámica fisicoquímica de aguas.....	413
8.2. Biología, ecología, limnología.....	414
8.3. Tratamiento y depuración de aguas potables y residuales.....	416
8.4. Control analítico y calidad de aguas.....	417
8.5. Revistas.....	418

PRESENTACIÓN

Este nuevo texto, bajo el título de *Fisicoquímica y Microbiología de los Medios Acuáticos. Tratamiento y Control de Calidad de Aguas (segunda edición actualizada y ampliada)*, va dirigido a todos aquellos interesados en el campo del agua, tanto desde la actividad del tratamiento y depuración industrial de aguas, como de la del control de calidad de aguas en todos su apartados (blancas, grises y negras), así como también desde la óptica de la investigación y la docencia. Se intenta implicar a los variados estamentos presentes en el estudio teórico y práctico de las aguas y de los medios acuáticos (estudiantes universitarios y de formación profesional, recién titulados, profesionales y docentes). Agotada la primera edición, esta segunda actualiza contenidos y los amplía de forma sustancial.

El punto de vista polivalente que maneja el autor, con treinta y seis años de experiencia en el control de calidad y tratamiento de aguas blancas, grises y negras, dentro de la Empresa Municipal de Aguas de Córdoba S.A., y también en la Universidad de Córdoba en el aspecto de investigación sobre estos temas, complementadas con la impartición de asignaturas relacionadas con el mundo del agua, cursos de doctorado, cursos de extensión universitaria, másteres de ingeniería de aguas y similares, etc., junto a la publicación de varios libros de aguas anteriores a este (*Análisis de Aguas y Ensayos de Tratamiento: Principios y Aplicaciones —1995—, Química, Microbiología, Tratamiento y Control Analítico de Aguas: una introducción al tema —1996—, Fisicoquímica de Aguas —1999—, Fisicoquímica y Microbiología de los Medios Acuáticos. Tratamiento y Control de Calidad de Aguas —2003—, Ciclo integral del agua —2008— y Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas. Teoría, práctica y problemas resueltos —2012—*) y varios capítulos en otros libros de aguas, así como más de doscientos trabajos de investigación publicados en revistas nacionales e internacionales y la cincuentena de comunicaciones a congresos y simposios nacionales e internacionales, ha posibilitado la confección de este documentado trabajo.

Lo dicho más arriba permite que el libro se enfoque hacia un tipo de alumnado que excede el de una asignatura concreta y se pueda extender como libro de consulta a varias asignaturas y cursos universitarios de Análisis de Aguas, Normativas sobre Aguas, Físicoquímica de Aguas, Microbiología de Aguas y Tratamiento y Depuración de Aguas, tanto en segundo ciclo de licenciaturas y grados relacionados con el mundo del agua, como para estudiantes de tercer ciclo, y para titulados de diferentes licenciaturas (Ciencias Químicas, Biológicas, Ciencias Ambientales, Ciencias del Mar, Tecnología de los Alimentos, Ingeniería Química, Ingeniería Sanitaria, otras ingenierías, Farmacia, Veterinaria, etc.). También puede encontrar indudable cabida en estudios formativos de Formación Profesional y Ciclos Superiores de Ramas Sanitarias, Químicas, de Laboratorio o afines.

Dicho lo anterior, el libro se estructura en varios capítulos definidos y determinados, con una carga académica y formativa totalmente propia, y en muchos sentidos, independiente para cada capítulo, si bien las referencias internas son continuas.

El *Capítulo 1* se refiere a la dinámica físicoquímica de aguas, entendiendo por tal el comportamiento y evolución de las propiedades físicoquímicas y de las especies químicas presentes en las aguas, tanto naturales como aquellas contaminadas por la acción indiscriminada del hombre. Especial atención tienen los iones mayoritarios de las aguas, los metales y los compuestos orgánicos (naturales y sintéticos). Además, y en relación a la 1ª ed. se aportan ahora ideas sobre el origen del agua en la Tierra, se profundiza en la físicoquímica del agua, se incluyen las referencias a nuevos subproductos de desinfección de aguas y a otros compuestos orgánicos de interés y se trata el tema de la radiactividad en aguas.

El *Capítulo 2* aborda con la misma filosofía del anterior el comportamiento y evolución de las diferentes especies de microorganismos de interés en aguas, es decir, la dinámica microbiológica de las aguas, con atención a cómo afectan los microorganismos a los ciclos bioquímicos de más relevancia en nuestro planeta. También se ocupará de la aportación microbiológica (positiva o negativa) al tratamiento y depuración de aguas y al aspecto sanitario de los microorganismos acuáticos, sobre todo de los patógenos. Con respecto a la 1ª ed. se aporta nuevo material gráfico, información actualizada sobre microorganismos de interés sanitario en aguas (*legionella*) y sobre otros aspectos medioambientales del agua.

El *Capítulo 3* se ocupa de las reacciones químicas que se dan en los medios acuáticos y que determinan la evolución de las especies químicas (lo cual también influirá en los microorganismos y organismos vivos) en las aguas naturales, es decir, sobre sus concentraciones y modificaciones de las mismas. Se intentará presentar una visión, sin duda breve y muy condensada, de los principales mecanismos físicoquímicos que rigen la distribución de compuestos químicos en las aguas naturales, e incluso en las contaminadas, haciendo una introducción a los fenómenos de disolución y precipitación, complejación, adsorción, y procesos fotoquímicos, como los de más interés en la regulación de especies químicas en los medios acuáticos. El autor entiende que las reacciones ácido-base y redox son lo suficientemente conocidas como para no tener que ser tratadas aquí. El capítulo

acaba con unos apartados que prestan especial atención a la regulación de especies químicas en ríos, lagos y embalses, y finalizando con los océanos. Este es el capítulo con menos modificaciones en relación a la 1ª ed. de este texto.

El *Capítulo 4* trata sobre las bases teóricas del tratamiento de aguas (aguas blancas o potabilización, y aguas negras o depuración) en una primera fase, para hablar acerca de los procesos unitarios básicos empleados en tratamiento de aguas, estructuración de los anteriores en las estaciones de tratamiento de aguas o estaciones de depuración de aguas usadas, así como varios ejemplos de algunas de las anteriores. En esta 2ª ed. se profundiza en los procesos de tratamiento y depuración, en las referencias prácticas a ETAP y EDAR tanto nacionales como internacionales, incluyendo un nuevo apartado sobre sistemas de apoyo en tratamiento y depuración (bombeos de aguas, dosificación, etc.) habida cuenta de su uso cotidiano práctico.

En el *Capítulo 5*, sin duda el que más cambios y modificaciones ha sufrido con respecto a la 1ª ed. de este libro (en quince años las normativas en el campo del agua han cambiado sustancialmente), se recopila un resumen de los cuerpos legales y reglamentaciones de ámbito nacional, autonómico, municipal y aun con referencias a la UE, que son de interés al profesional del agua o para aquel que se aproxima a este mundo. Se presentan los aspectos más relevantes de estas normas, también sus consecuencias en el tratamiento de aguas destinadas al consumo humano, depuración de aguas residuales, aguas regeneradas, para piscinas, baños, y vertidos a cauces públicos, así como sobre el control analítico de todas estas aguas. La revisión general se extiende hasta diciembre de 2017, si bien con algunas referencias a normativa muy relevantes aparecidas en 2018. A destacar los profundos cambios experimentados en las aguas de consumo, y también en relación a las aguas naturales modificadas por la acción humana, y su traslado a las normas de calidad ambiental y otras. Asimismo, cabe destacar la atención prestada a las normativas locales para control de vertidos a redes de saneamiento, que es el primer escalón en la lucha contra la contaminación ambiental en las aguas.

El *Capítulo 6* es totalmente nuevo en esta 2ª ed. y se trata de una incorporación surgida de la preocupación ambiental actual sobre todas aquellas sustancias y microorganismos que, bajo la denominación de *contaminantes emergentes*, están tomando un interés creciente en nuestra sociedad. Los contaminantes emergentes son muchas veces sustancias previamente desconocidas y por ello no reguladas en las normativas, pero que pueden ser candidatos a ser sujetos de regulación en un futuro más o menos próximo, dependiendo del conocimiento de sus potenciales efectos sobre la salud y el medio ambiente, y de los datos disponibles sobre su aparición en las aguas.

Su característica negativa fundamental es que no es necesario que persistan largo tiempo en el medio para causar efectos negativos ya que su eliminación o transformación puede ser compensada por su continua introducción en el mismo, dada su elevada producción diaria y el alto consumo habitual por el ser humano: esto implica una continua introducción en el medio ambiente en general, y en los sistemas acuáticos en particular. Metales pesados, compuestos orgánicos de sín-

tesis, sustancias farmacéuticas y drogas, disruptores endocrinos, microplásticos, así como patógenos nuevos u otros que cobran actividad y actualidad hoy en día, serán tratados ahora.

El *Capítulo 7* de esta nueva 2ª ed. presenta un compendio de todos los parámetros cuyo análisis es impuesto en las normativas de aguas vigentes en nuestro país y recogidas en el *Capítulo 5* (de consumo humano, residuales, regeneradas, vertidos, medioambientales, etc.). También se incluyen otros análisis frecuentes en control de calidad de aguas así como de subproductos de tratamiento y depuración con una estructuración totalmente diferente a la recogida en la anterior 1ª ed. de este texto. Corroborando lo dicho, se ha insertado como introducción al análisis de aguas unos primeros apartados de tomas de muestras y conservación de las mismas, y de generalidades acerca de las técnicas y métodos analíticos con especial atención a los empleados habitualmente en control de calidad de aguas.

Considerando el agua de consumo como especialmente relevante en el conjunto del sector *agua*, los parámetros a determinar han seguido la secuencia marcada en la normativa vigente sobre aguas de consumo (parámetros microbiológicos, químicos, indicadores y radiológicos) siguiéndoles a estos las determinaciones típicamente aplicadas en aguas residuales, vertidos, aguas regeneradas y otras.

En cuanto a la *Bibliografía*, se han incluido varias nuevas referencias en los cuatro apartados considerados en la 1ª ed, insertando ahora uno nuevo que recoge revistas relevantes del sector *aguas* tanto nacionales como internacionales que se pretenden como insustituibles para el profesional o para el interesado en los temas del sector.

Como aspectos generales de esta nueva obra, el lenguaje empleado en el texto ha intentado huir de academicismos innecesarios, pretendiendo ser claro y conciso, presentando los temas con la máxima actualidad posible, con referencias a las fechas presentes, pugnando por cubrir el vacío de los quince años transcurridos desde la aparición de la 1ª ed. de este libro, con un rigor no exento de amenidad y procurando contar con un soporte adecuado de figuras y tablas (enriquecido notablemente sin duda alguna) para clarificar todos los temas tratados. Por todo ello, sigue entendiendo el autor que el libro puede ser de obligada consulta para gran parte de los estudiosos y profesionales del campo del agua, bien en su aspecto teórico, bien en el aspecto práctico del tratamiento de aguas, depuración de aguas usadas, así como de la investigación analítica de la calidad de las mismas.

Para terminar esta presentación y siendo obligado, debo agradecer muy especial y sinceramente a mis grandes compañeros y amigos, el Prof. Dr. D. José Miguel Rodríguez Mellado, Catedrático del Departamento de Química Física y Termodinámica Aplicada de la Universidad de Córdoba, y a D. Rafael Mantecón Pascual, Ingeniero Químico, hasta hace un par de años, en el Área Metropolitana de Barcelona, y reputado experto en su máxima expresión en el campo de las aguas residuales en nuestro país y aun fuera de él, su valiosísima aportación en la preparación de este trabajo, agradecimiento que debo hacer extensivo al Grupo de Electroquímica Molecular de la Universidad de Córdoba, al Grupo de Trabajo de Inspección y Control de Vertidos de la Comisión de Aguas Residuales, y también a la Comisión de Tratamiento y

Control de Calidad de Aguas, ambos dentro de la Asociación Española de Abastecimientos de Aguas y Saneamiento, así como, finalmente, a la Empresa Municipal de Aguas de Córdoba S.A., lugar en donde me he formado (y lo sigo haciendo después de treinta y seis años) en este apasionante y polivalente mundo del agua.

Córdoba, septiembre de 2018

RAFAEL MARÍN GALVÍN

DINÁMICA FISCOQUÍMICA DE AGUAS

I.1. INTRODUCCIÓN

El agua, sustancia esencial tanto para la vida como para la propia civilización humana, es el vehículo idóneo donde se desarrollan las complejas reacciones bioquímicas que hacen posible el desarrollo de la actividad vital de cualquier ser vivo. Además, se trata probablemente del único compuesto que se puede encontrar en nuestro planeta en los tres estados físicos de agregación de la materia, líquida, sólida y gaseosa, y en una cantidad considerable: se cifra el total de agua en la Tierra en 1.386 millones de km^3 , de los cuales un 2,53 % (35,03 millones de km^3) del total corresponde a agua *dulce*.

En relación al ciclo hidrológico definido anteriormente, podemos estimar los flujos de agua que se dan entre los diferentes nichos o depósitos de la misma en nuestro planeta. Así los más importantes serían, según los últimos datos disponibles y en orden decreciente:

- Evaporación de aguas desde el océano hacia la atmósfera: $426 \text{ km}^3/\text{año}$.
- Precipitaciones y lluvias en el océano desde la atmósfera: $386 \text{ km}^3/\text{año}$.
- Precipitaciones y lluvias en zonas terrestres: $114 \text{ km}^3/\text{año}$.
- Evaporación y transpiración de seres vivos: $74 \text{ km}^3/\text{año}$.
- Transporte de agua atmosférica desde océanos hacia tierra firme: $40 \text{ km}^3/\text{año}$.
- Flujo superficial de ríos y lagos hacia océanos: $38 \text{ km}^3/\text{año}$.
- Percolación de aguas superficiales: $16,5 \text{ km}^3/\text{año}$.
- Flujo subterráneo de aguas hacia océanos: $2 \text{ km}^3/\text{año}$.

La provisión global de agua en la Tierra es invariante desde hace miles de millones de años, estando sometida al denominado «ciclo hidrológico». Este consiste en una serie de cambios de fase, de características físicas, químicas y microbiológicas, e incluso de emplazamiento físico (mares, nubes, glaciares, ríos, aguas subterráneas) cuyo último efecto es la «renovación» periódica de la dotación de agua en las grandes acumulaciones o *depósitos* de esta existentes en el planeta: océanos, ríos y lagos, atmósfera y litosfera.

El motor del «ciclo hidrológico» es la radiación solar recibida por nuestro planeta que provoca la evaporación de cantidades ingentes de agua desde la superficie libre de los océanos y mares (especialmente) hasta la atmósfera, desde donde revierte depositándose bajo forma de lluvia. En el «ciclo» además, intervienen otros factores como son la evaporación de agua desde el propio terreno, la evapotranspiración de plantas y seres vivos, e incluso, el balance entre detracción y aporte de agua usada por el hombre (véase Figura 1.1). Con respecto a esto, el uso que el hombre hace del agua varía dependiendo de la zona concreta del planeta: desde unos 5-6 L/habitante-día en países subdesarrollados, hasta unas 100 veces más en zonas industrializadas (recuérdense los casi 600 L/habitante-día consumidos en Norteamérica).

Por otro lado, el hombre utiliza el agua en múltiples facetas de su vida cotidiana que pueden esquematizarse en los siguientes apartados:

- a. Bebida y preparación de alimentos.
- b. Riegos agrícolas y explotaciones ganaderas.
- c. Industrias: refrigeración y procesos varios.
- d. Navegación y comercio fluvial y/o marítimo.
- e. Usos deportivos y lúdicos.
- f. Evacuación de vertidos y residuos variados.
- g. Producción hidroeléctrica, termoeléctrica, etc.

En relación a España, el uso de agua en agricultura es el mayoritario, con un 75% sobre el total, seguido del uso urbano con un 15% y el uso industrial con un 10%, cifrándose el total de agua usada en nuestro país en unos 16.000 millones de m³. Además, según los últimos datos obtenidos por la Asociación Española de Abastecimientos de Aguas y Saneamiento (AEAS) y correspondientes a 2016, se cifra en 4.642 millones de m³ el agua captada para potabilización y en 4.080 millones de m³ el agua suministrada a todo el país para usos urbanos (doméstico+industrial+servicios) con un consumo medio por habitante y día de 132 L.

Con relación al agua residual, se depuraron en España durante 2016 un total de 3.769 millones de m³, lo que representaba una generación de aguas residuales de 81 m³/habitante-año (doméstico + industrial + servicios).

En el apartado de agua reutilizada su volumen se cifró en 373 millones de m³, lo que representaba un 9,1% del total del agua depurada, siendo el uso para agricultura (41%) y el riego de jardines y zonas de ocio (31%) los usos preferentes.

Finalmente, es ilustrativo señalar que, aproximadamente, de cada 100 L de agua potable apenas 5 L se consumen directamente para bebida en nuestros hogares.

En referencia a la existencia del «ciclo hidrológico» del agua, este da lugar a cambios importantes en la composición y características del agua, es decir, en su *dinámica*. A ello nos vamos a referir en los puntos siguientes de este capítulo y en los de los próximos Capítulos 2 y 3, englobándolos bajo la denominación de «Dinámica Físicoquímica» y «Microbiología» de las aguas, respectivamente, finalizando con el Capítulo 3 dedicado a hablar sobre un tema tan apasionante como es

el de la «Regulación de sustancias químicas en medios acuáticos», influida tanto por aspectos fisicoquímicos como microbiológicos y biológicos.

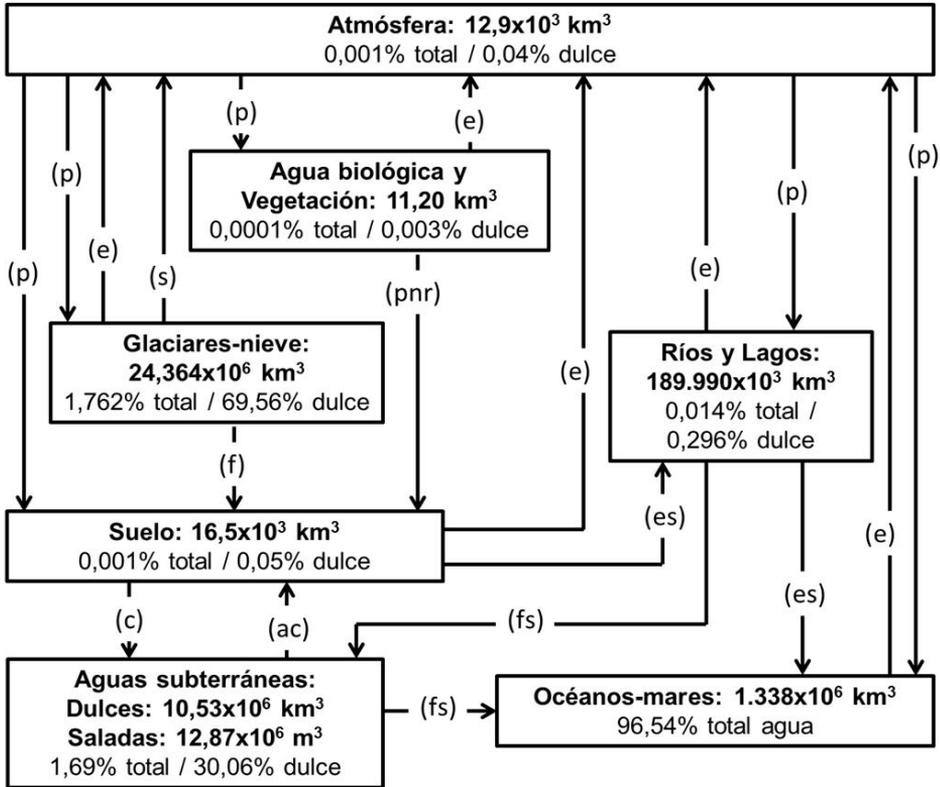


FIGURA I.1. Ciclo hidrológico: principales flujos implicados: (p) precipitación; (e) evaporación; (f) fusión; (c) percolación; (ac) ascenso capilar; (es) escorrentía; (fs) flujo subterráneo; (s) sublimación; (pnr) lluvia no retenida por la vegetación.

I.2. ORIGEN DEL AGUA EN LA TIERRA

Dado que, como se dijo antes, la cantidad de agua en nuestro planeta apenas ha variado, geológicamente hablando, desde hace miles de millones de años, podemos plantearnos de dónde ha venido este agua, si se encontraba en la formación del planeta o si ha tenido orígenes extraterrestres. En todo caso, dado que la molécula de agua es simple químicamente (solo tres unidades) y que sus átomos son de bajo peso molecular, puede pensarse que sería de las primeras moléculas en formarse en un universo primigenio.

Para responder a esta cuestión haremos uso de la relación de formas isotópicas del agua existentes de las que se hablará a continuación en este capítulo, y particularmente de la relación «agua pesada/agua normal», entendiendo por tales, la primera la que tiene deuterio (^2H o D) en lugar de hidrógeno (^1H), que podemos expresar como $^2\text{H}_2\text{O}$, frente al agua normal o $^1\text{H}_2\text{O}$. Esta relación en el agua terrestre

(océanos, ríos, incluso agua biológica) es de 1 átomo de deuterio por cada 6.410 de hidrógeno, es decir, el equivalente a 156 ppm. La posible fuente de agua terrestre debería tener un cociente similar, algo inferior contando con el enriquecimiento en D (deuterio) por fenómenos de escape preferencial de H al espacio al ser su masa más baja que la del deuterio. Podrían descartarse, en principio, las posibles fuentes en que la relación D/H fuese apreciablemente más elevada. En suma, se plantean tres posibles orígenes para el agua de nuestro planeta: *endógena, cometas y asteroides y otros cuerpos celestes*.

Según las últimas estimaciones disponibles, cuando se formó el universo también lo hicieron todo el hidrógeno y el deuterio (y gran parte de los elementos químicos actuales) con una relación entre ellos que apenas ha variado y que se estima en el orden de 20 ppm. Recientes estudios indican que la relación D/H en el sistema solar es más alta que la esperable, con lo que el agua del mismo en parte provendría de antes de su formación (unos 4.500 millones de años) y desde materiales anteriores al inicio de la misma y por tanto ya evolucionados y enriquecidos en D.

La mayor parte del agua de la primitiva protonebulosa que conformó el sistema solar, vía atracción gravitatoria, se acumuló en las zonas exteriores del mismo, donde existen temperaturas más bajas y con una menor posibilidad de volatilización y/o descomposición de la misma, quedando las zonas próximas al Sol y los planetas gaseosos con poca cantidad relativa de agua. Así pues, se define una línea a nivel actualmente entre el cinturón de asteroides y Júpiter que separa ambas zonas de nuestro sistema planetario, la rica en agua, externa y la pobre, interna.

La Tierra, en sus fases iniciales y dentro de la zona de escasez primordial de agua, debería contener poca por encontrarse con una alta proporción de materiales fundidos y a una temperatura muy elevada, además de sometida a fuerte irradiación UV que promovería el escape de hidrógeno (y agua) hacia el espacio. Asimismo, en esta fase primitiva, hace unos 4.200 millones de años, parece ser que un objeto del tamaño de Marte impactó sobre nuestro planeta, resultando en la formación de la Luna así como en la pérdida de las acumulaciones de agua que pudieran existir en superficie.

Con este planteamiento se puede pensar que el agua actual habría viajado hacia la Tierra desde donde es más abundante, en forma de agua constituyente de los cometas exteriores, que contienen 200 veces más de agua que la de La Tierra en relación a su masa, o en forma de meteoritos, de los cuales los más abundantes (*condritas carbonáceas*) la contienen en un cuádruplo de la terrestre. Estos objetos cósmicos se concentran en la nube de Oort, una zona existente entre nuestro propio sistema solar y el de Alfa Centauri, el sistema solar más próximo.

No obstante, las elevadas relaciones D/H (>300 ppm) encontradas en muchos cometas con respecto a la hallada en el agua en nuestro planeta plantea que el origen del agua cometaria no sea el fundamental para el agua terrestre.

Otros posibles candidatos a suministrar agua a nuestro planeta son los asteroides. En muchos de estos la relación D/H es muy similar a la terrestre. Además, ciertos cuerpos celestes tales como el planeta enano Ceres, del que se estima que la mitad de su masa puede ser agua, podrían erigirse en parte de nuestros primeros

suministradores acuáticos a través de su impacto en diversas fases geológicas de nuestro planeta. Así, se supone que varios impactos de estos objetos hubieran alimentado todos los nichos acuáticos existentes en nuestro planeta.

Finalmente, queda la hipótesis del agua endógena. Recientes estudios sugieren que en el horizonte de una Tierra de 300 millones de edad, ya hubo agua líquida en la superficie planetaria. Así en la isla Baffin, en unas lavas solidificadas de remota antigüedad y aisladas del entorno desde su formación, se descubrieron compuestos cuya relación D/H debió de ser similar a la del agua primordial de La Tierra: esa relación resultó algo inferior (20%) a la de los océanos terrestres y similar a la de la nebulosa protosolar germen de nuestro planeta.

Como conclusión, la fuente principal de los 1.386 millones de km^3 que tiene nuestro planeta parece residir en el propio manto terrestre, muy rico en agua y donde se encuentra ocluida en minerales (también actualmente) trasladándose desde aquí a la superficie vía erupciones volcánicas (tanto terrestres como marinas) y por generación de nueva corteza terrestre vía tectónica. Ese agua mantiene una relación D/H similar a la primordial, la cual se va incrementando progresivamente a los niveles actuales por su progresivo enriquecimiento en D a causa del escape progresivo de átomos más ligeros de H al espacio.

Además, los fenómenos de subducción de placas tectónicas marinas cerrarían el ciclo geológico ingresando en el manto terrestre nuevas cantidades de materiales y de agua asociada. Con estos datos, no es aventurado esperar la existencia de muchos más planetas ricos en agua (y acaso en vida) en el resto del universo.

Para más información al respecto, consultar *El agua en el cosmos* (véase Bibliografía).

I.3. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL AGUA

La molécula de agua presenta la conocida forma triangular abierta con el átomo de O ocupando el vértice y unido a los dos átomos de H, a su vez no interconectados entre sí. Esta estructura puede explicarse atendiendo a la estructura electrónica de los átomos implicados en la molécula y de acuerdo a la *teoría del enlace covalente*: el átomo de O dispone de seis e^- , distribuidos entre dos orbitales atómicos tipo s que estarían llenos, y otros tres orbitales tipo p , uno de los cuales se hallaría lleno y los otros dos semilenos. Para alcanzar la estabilidad electrónica ($8e^-$) el O requiere dos e^- suplementarios, que a su vez provienen de los dos átomos de H de la molécula, cada uno de los cuales posee 1 e^- en un orbital tipo s . Por su parte, cada átomo de H alcanza también la estabilidad electrónica con 2 e^- compartiendo 1 e^- del O.

No obstante, la *teoría de los orbitales moleculares* explica más adecuadamente la estructura electrónica y espacial de la molécula de H_2O . Para ello, los orbitales atómicos que intervienen en la formación de los orbitales moleculares son los $2s$ y $2p$ del O y el $1s$ del hidrógeno. Las combinaciones de todos estos orbitales generan los orbitales moleculares puros representados también en la Figura 1.2. Obsérvese que hay orbitales σ enlazantes, casi no enlazantes y antienlazantes, y orbitales π no enlazantes.

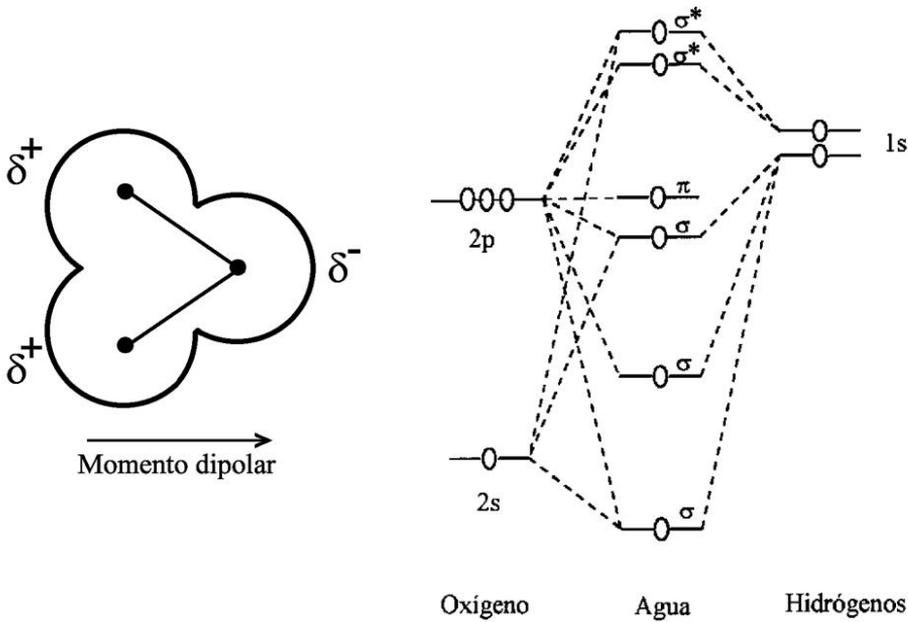


FIGURA 1.2. Izquierda: modelo de la molécula de agua con la separación parcial de cargas que genera el momento dipolar en la misma. Derecha: diagrama de energías de los orbitales moleculares de la molécula.

En realidad, de acuerdo con la simetría de la molécula y del valor del ángulo formado por los tres átomos (104.5°) lo que ocurre es la hibridación de los anteriores orbitales moleculares puros para formar orbitales híbridos del tipo sp^3 que adoptan una geometría tetraédrica que sí está de acuerdo con la geometría real observada.

La disposición espacial de los átomos de la molécula de H_2O , unida a la más alta electronegatividad del O frente al H, posibilita una acumulación relativa de carga negativa en las inmediaciones del átomo de O, o *carga local parcial negativa* (designada por δ^-), frente a una relativa acumulación de carga positiva, o *carga local parcial positiva* (designada por δ^+), alrededor de los átomos de H. Esto supone una separación relativa de cargas que a su vez lleva aparejada una polaridad en la molécula, y por lo tanto, la existencia de un *momento dipolar*, con un valor de 1.85×10^{18} uec. Este momento dipolar posibilita la formación de uniones electrostáticas entre moléculas de agua vecinas, en concreto entre los átomos de H con carga parcial positiva de una molécula y los de O de moléculas vecinas cargados negativamente. A estos enlaces (que se extienden tridimensionalmente en el espacio) se los denomina *enlaces o puentes de hidrógeno* y debido a la ordenación casi tetraédrica de los electrones situados alrededor del átomo de O, cada molécula de agua es capaz, potencialmente, de unirse mediante cuatro moléculas de agua vecinas.

Los *enlaces de hidrógeno* son relativamente débiles, con una energía de enlace de 4,5 kcal/mol, frente a las 110 kcal/mol del enlace H-O. Además, presentan la particularidad de que su fuerza es máxima cuando los dos grupos que interaccionan están orientados de modo que proporcionan el máximo de atracción electrostática. Por otro lado, la longitud del *enlace de hidrógeno* depende del tipo de enlace, de la geometría estructural y de la distribución electrónica en las moléculas unidas. Por ejemplo, en el hielo, la longitud es de 0.177 nm.

Por último, indíquese que la formación de este tipo de enlaces posee una gran importancia sobre las propiedades fisicoquímicas de la especie química agua en cualesquiera de sus estados físicos (gas, líquido o gas) como se comprobará más adelante.

El agua líquida parece estar formada por asociaciones de moléculas de 2, 3 y hasta 12 unidades $[\text{H}_2\text{O}]_n$ estando dotada de una estructura tridimensional fluctuante, mientras que el hielo es una mezcla de cuatro isómeros distintos, compuestos a su vez de diferente número de moléculas y/o con diferente estructura. Además, desde el punto de vista isotópico los átomos de H y O pueden corresponder a especies « ^1H », « ^2H », « ^{16}O », « ^{17}O » y « ^{18}O », mayoritariamente. Esto, como ya se indicó en un apartado anterior, tiene su notable influencia a la hora de determinar el origen del agua terrestre.

De densidad aproximadamente igual a la unidad (en concreto, 0,9999 g/cc a 20 °C) su tensión superficial varía con la temperatura, disminuyendo desde 75,5 din/cm a 0 °C hasta un valor nulo en el punto crítico (aquel en que coexisten los tres estados físicos de la sustancia); también la densidad cambia con los gases disueltos y con la presencia de otras sustancias presentes en el líquido. Cabe destacarse aquí que la densidad máxima del agua se da a 3,98 °C (1,000 g/cc) y la circunstancia de que el hielo (agua sólida) flote en el agua líquida, con lo que las zonas inferiores de los cauces de agua se mantienen líquidas siempre, permitiendo el intercambio de especies químicas, nutrientes y especies biológicas que de estar en forma sólida serían muy difíciles alterando la dinámica natural de las masas de agua.

Con respecto a la viscosidad, la del agua no es muy diferente a la de otras especies líquidas y exhibe la misma tendencia de otros líquidos de disminuir al aumentar la temperatura, aumentando con el incremento de presión, de forma similar a la de la mayoría de los líquidos. Su valor a 25 °C es de 8,90 mP (mili poises).

Por otro lado, el agua es poco compresible, teniendo una alta capacidad calorífica con un mínimo entre 34 °C y 35 °C. Esta circunstancia actúa como bomba de calor en la regulación del clima de la Tierra, de forma que los océanos se comportan como termostatos en los que se experimenta un tránsito de energía desde las aguas cálidas hacia las zonas frías, y viceversa (por ejemplo la corriente cálida del Golfo que fluye desde el Golfo de México hacia el Atlántico Norte moderando el clima de Europa).

Deben citarse aquí los conocidos puntos de fusión y ebullición del agua, con tránsitos de especie sólida a líquida (0 °C) y de líquido a gas (100 °C) con variaciones en función de la presión atmosférica poco acusadas para la fusión-congelación, y sí más ostensibles para la ebullición-condensación. En cuanto al fenómeno

de sublimación del hielo (paso de sólido a gas sin intermedio líquido) la presión de vapor a 0 °C es de 4,58 mm Hg, inferior al del líquido, lo que explica que el fenómeno de fusión está favorecido frente al de sublimación. Como consecuencia práctica, si la presión del vapor de agua se reduce por debajo de 4,58 mm Hg, al descender la temperatura el vapor produciría directamente hielo y no agua líquida, es decir, se experimentaría el fenómeno de la *escarcha*.

Para finalizar estas cuestiones conviene citar al denominado *punto crítico del agua*, que se experimenta a una *presión crítica* de 218 atm, y a una *temperatura crítica* de 374 °C donde coexisten las tres fases sólida, líquida y gaseosa del agua sin poder hacer distinción física entre ellas.

En otro orden de cosas y desde la óptica puramente fisicoquímica la conductividad eléctrica del agua pura es muy baja, del orden de $0,05 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, pero cualquier electrólito disuelto en ella la hace más conductora, tanto más cuánto más disociado se encuentre. En este sentido, la conductividad, y por tanto, el contenido salino de un agua natural fluyente (arroyos, ríos) suele ir incrementándose a través de su recorrido sobre el terreno, integrando cada vez más cantidad de sales en su seno. Además, el agua posee una muy alta reactividad química, que se pone de manifiesto en su alto poder de disolución de materiales. Como ejemplo, compárese la Tabla 1.1 que presenta los contenidos en iones mayoritarios encontrados en la investigación de un agua ultrapura, con mínima interacción con el terreno, como la del deshielo de un glaciar de Noruega, con la Tabla 1.2 que recoge el contenido medio de algunos cationes, aniones y gases en el agua del océano (tiempos de interacción agua-terreno del orden de miles de años). Obsérvese el relativamente alto contenido en Fe y Al del agua glaciar, como metales, y el mayoritario de sulfatos dentro de los aniones.

Dicho lo anterior, cualquier proceso de disolución implica el cambio en propiedades físicas y químicas de la disolución ya constituida con respecto tanto al soluto como al propio disolvente. En el caso del agua existen dos tipos de interacciones soluto-disolventes:

- a. la inducida por aquellos solutos que «refuerzan» la estructura del agua; y
- b. la producida por los solutos que la «rompen» o la distorsionan drásticamente.

Los primeros suelen ser compuestos no iónicos como hidrocarburos y en general, moléculas no polares. Estas se sitúan en el límite del enlace de hidrógeno, reforzando el enlace H-agua. Los segundos, sustancias de carácter polar, provocan en el líquido reacciones complejas, debido a interacciones eléctricas. Actúan sobre la estructura tridimensional «normal» del agua, provocando fenómenos de hidratación mediante fuerzas de corto alcance, e interacciones eléctricas de largo alcance conocidas como «fuerzas de Coulomb».

TABLA I.1. Agua de deshielo. Glaciar de Jostedalbreen (Noruega, 2002).

Anión	µg/L	Catión	µg/L
SO ₄ ²⁻	640	Ca	200
Cl ⁻	220	Mg	100
PO ₄ ³⁻	<100	Fe	115
NO ₃ ⁻	<100	Na	<100
NO ₂ ⁻	40	K	50
F ⁻	10	Al	46
Br ⁻	<10	Mo, Hg, Pb	<0,5

TABLA I.2. Composición media aproximada del agua oceánica.

Anión	mg/L	Catión	mg/L	Gas	mg/L
Cl ⁻	19.000	Na	10.600	N ₂	13
SO ₄ ⁻	2.600	Mg	1.300	O ₂	8
HCO ₃ ⁻	140	Ca	400	Ar	0,6
Br ⁻	65	K	380	Ne	3 · 10 ⁻⁴
BO ₂ ⁻	19	Sr	8	Kr	3 · 10 ⁻⁴
SiO ₄ ⁻	9,8	Li	0,2	Xe	1 · 10 ⁻⁴
NO ₃ ⁻	2,0	Rb	0,12	He	5 · 10 ⁻⁶
F ⁻	1,3	Ba	0,03	Rn	9 · 10 ⁻¹⁶
PO ₄ ³⁻	0,2	Al, Fe (*)			
		Zn, Mo	0,01		
I ⁻	0,05	Se	0,004		

(*) Para cada metal individual.

Dentro de las principales propiedades del agua debe mencionarse la solubilidad de gases en ella, que se rige por la *ley de Henry*: a una temperatura dada, el volumen de un gas disuelto en un líquido es proporcional a la presión parcial del gas.

Otro tipo de sistemas de interés en el agua son los sistemas «coloidales» (cuya eliminación o reducción sensible de su contenido constituye una parte fundamental del tratamiento industrial del agua, como se verá más adelante). Estos sistemas no son disoluciones verdaderas, estando compuestos de partículas cuyo diámetro oscila entre 0,1 y 0,001 µm, y que poseen carga eléctrica, lo que les permite adsorber iones del mismo signo que el del electrólito, y paralelamente estabilizar eléctricamente a la partícula coloidal.

Para terminar esta introducción al comportamiento físico y químico del agua, menciónese el ataque químico del líquido a las rocas y minerales en un medio

natural, el cual se puede producir de diferentes formas y considerando dos parámetros «clave», el pH y el E_H .

Resumamos ahora algunos conceptos importantes en relación a la fisicoquímica del agua.

- a. *Hidratación*, o penetración del agua dentro de la red reticular del cristal, formando compuestos químicos denominados «hidratos» (por ejemplo el caso del CaSO_4).
- b. *Hidrólisis*, o descomposición mutua entre la sal que se disuelve y el agua.
- c. *Oxido-reducción*. Este es un proceso que se da tanto en la zona de infiltración, donde coexisten aire y agua, como en el agua libre: implica el tránsito de electrones (e^-). El equilibrio redox se da entre el O_2 aportado por el aire disuelto en el agua que se infiltra, y el consumo del gas en procesos de oxidación de las sustancias reductoras existentes en el medio.
- d. *pH*, o concentración relativa de iones H^+ en el agua, que puede provocar reacciones de disolución de las sales presentes en rocas y minerales, sobre todo en condiciones ácidas. En este momento conviene recordar el fenómeno de la «lluvia ácida» asociado a los efectos derivados de la contaminación ambiental. Esta viene provocada por las emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno a la atmósfera, provenientes de la quema de combustibles fósiles, que reaccionan con el agua atmosférica formando ácidos sulfúrico y nítrico.
- e. E_H , o potencial redox de un agua, que mide la capacidad global de proceder por sí misma a la oxidación o reducción de sustancias. En este sentido, y como se verá más adelante, un agua en estado óxico es capaz de llevar a cabo la oxidación de sustancias en bajo estado de oxidación (por ejemplo Fe^{2+} a Fe^{3+} , NO_2^- a NO_3^-) mientras que un agua anóxica promueve la reducción de especies en alto estado de oxidación en contacto con ella (por ejemplo, SO_4^{2-} a S^{2-}).

La acción del agua sobre los minerales y rocas (también sobre los gases) da lugar a una *dinámica* o evolución de los elementos químicos y sus compuestos bien simples bien complejos en su seno. Pasemos revista ahora a los aspectos puramente químicos del agua, es decir, a esta «dinámica fisicoquímica» de un agua, con referencia tanto a un agua natural como a un agua usada (residual doméstica o industrial).

1.4. TEMPERATURA, COLOR, OLOR-SABOR

a) Temperatura

La temperatura de un agua se establece por la absorción de radiación en las capas superiores del líquido, estando ligada a la energía cinética media de sus moléculas.

Las variaciones de temperatura afectan a la solubilidad de sales y gases en agua y, en general, a todas sus propiedades, tanto químicas como a su comportamiento microbiológico.

Aunque la temperatura de un agua superficial está ligada a la irradiación recibida, la de las aguas profundas de embalses y lagos de nuestras latitudes experimentan una secuencia cíclica caracterizada por dos períodos:

- a. uno de «mezcla térmica» con temperatura similar en profundidad.
- b. otro de «estratificación térmica» con aguas más cálidas en superficie y más frías en el fondo e imposibilidad de mezcla vertical de capas de agua (véase Figura 1.3).

Estos períodos rigen las características fisicoquímicas de la masa de agua en cada caso. Además, ha de comentarse que de acuerdo con la dinámica en el comportamiento de la temperatura del agua de un lago a lo largo de un año, estos pueden dividirse en:

- a. *Amícticos*, que no tienen cambios térmicos apreciables entre el exterior y el interior del agua. Característico de estos lagos es el poseer una capa de hielo permanente en superficie, y en su interior una temperatura baja y constante. Son típicos de latitudes polares.
- b. *Monomícticos fríos*, con temperatura siempre inferior a los 4 °C en las capas superficiales incluso en la estación cálida. En la estación fría se hallan cubiertos por una capa de hielo.
- c. *Monomícticos calientes*, con temperatura tanto en superficie como en el fondo superior a los 4 °C. Estos lagos poseen un período de estratificación térmica en verano y otro de circulación durante la estación fría.
- d. *Dimícticos*, los cuales presentan dos períodos de estratificación térmica, uno en verano y otro en invierno, con otros dos períodos de circulación entre estos.
- e. *Oligomícticos*, con agua siempre caliente a cualquier profundidad y períodos de circulación térmica muy raros. Se trata de lagos de zonas tropicales.
- f. *Polimícticos*, con varios períodos de circulación térmica distribuidos a lo largo del año. Son lagos de regiones intertropicales.

Para las aguas subterráneas, su temperatura depende del terreno que drenan, naturaleza de las rocas, profundidad de la surgencia y fenómenos magmáticos que puedan existir. En este sentido, coméntese que según la *Ley de Minas* de nuestro país, «son aguas termales aquellas cuya temperatura de surgencia sea superior en 4 °C a la media anual del lugar donde alumbren».

Desde el punto de vista del consumo humano, el agua es más agradable cuanto más baja sea su temperatura, con un óptimo de confort para su consumo situado entre 12 °C y 16 °C. Asimismo, turbidez y color de un agua están ligados indirectamente

tamente a la temperatura, siendo paralelos y en el mismo sentido *grosso modo* los aumentos de las tres variables.

Por otro lado, una más baja temperatura dificulta la coagulación, sedimentación y filtración de un agua en fase de potabilización (véase Capítulo 4). De forma opuesta, una temperatura más alta favorece la esterilización. En este sentido, la formación de trihalometanos y otros compuestos orgánicos tales como ácidos holoacéticos, haloacetnitrilos y halonitrometanos, sustancias potencialmente tóxicas generadas por cloración de sustancias húmicas presentes en un agua bruta sin tratar, se incrementan también con la temperatura del agua.

Por último, la temperatura de un efluente a un cauce natural puede afectar drásticamente su biología y microbiología induciendo cambios dramáticos de poblaciones bacterianas y organismos superiores. Efluentes industriales con temperaturas altas suelen ser los de industrias del sector alimentario (conservas, cerveceras) y otras como fábricas de papel, industrias químicas, textiles, etc.

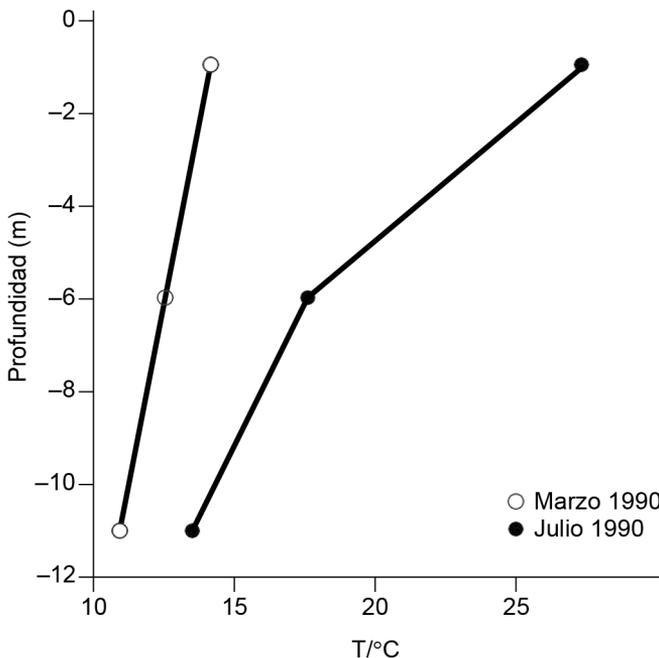


FIGURA I.3. Perfil de temperaturas en el embalse de Guadalupe (Córdoba, 1,6 hm³). Círculos vacíos, período de mezcla térmica; círculos llenos, estratificación térmica.

b) Color

El color de un agua se debe, fundamentalmente, a diferentes sustancias coloreadas existentes en suspensión o disueltas en ella. En aguas naturales el color proviene de las numerosas materias orgánicas procedentes de la descomposición de vegetales, así como de diversos productos y metabolitos orgánicos que habitualmente

se encuentran en ellas (coloraciones amarillentas). Además, la presencia de sales solubles de Fe y Mn (aguas subterráneas y superficiales poco oxigenadas) también produce un cierto color en el agua. En aguas naturales de lagos y embalses suele existir una relación directa entre color y pH, de forma que cuando aumenta el segundo lo hace el primero. En estos medios, el color del agua profunda durante la época de estratificación térmica es marcadamente más alto que el del agua superficial.

Por otro lado, las coloraciones rojizas observadas a veces en aguas de bebida proceden de acumulaciones de hierro, y las negras, de las de manganeso divalentes que se oxidan por la presencia de cloro u otros agentes oxidantes, generándose la correspondiente precipitación de oxihidróxidos coloreados poco solubles. Otras veces, el color procede de la oxidación de los materiales de las propias conducciones de agua de consumo público, que si son de cobre provocan tonalidades verdosas y azuladas. En este sentido, la importancia del color en el agua de consumo es fundamentalmente de carácter organoléptico: cuando solo se dispone para el consumo de agua coloreada, ineludiblemente se la asocia a agua «no adecuada» para la salud. En todo caso, la mayor parte de los individuos perciben niveles de coloración a partir de unos 15 mg/L de Pt-Co.

Respecto a aguas residuales industriales, estas suelen presentar coloraciones en función de la actividad industrial que desarrollen: fábricas de pasta de papel evacúan aguas parduzcas debido a la *lignina*; las aguas de mataderos son rojizas por la *sangre*; las lecherías y derivados lácteos producen aguas blancuzcas, las aguas residuales de fábricas de levaduras tienen un marcado color rojizo-caramelo, etc.

Finalmente, en tratamiento de aguas, dígase que aguas fuertemente coloreadas ofrecen más resistencia a la acción desinfectante y oxidante del cloro y otros desinfectantes usados para su tratamiento.

c) Olor-sabor

Fisiológicamente, los sentidos del gusto y el olfato están íntimamente relacionados ya que las papilas linguales y las olfativas detectan estímulos simultáneos y complementarios. Solamente existen cuatro sabores básicos: ácido, salado, dulce y amargo. Todos los demás sabores se obtienen por interacción de estos reseñados. A este respecto, en los últimos años y por influencia de la cocina japonesa, se habla de un quinto sabor, *umami* o cárnico.

Si bien para una sustancia aislada debe existir, y de hecho existe, una relación entre olor/sabor y concentración en el agua, esta situación no ocurre habitualmente. Es muy raro que las sustancias productoras de olor y sabor se encuentren aisladas en un agua. Si eso ocurriera, se podría relacionar la intensidad del olor/sabor con la concentración de la sustancia productora en el agua, por ejemplo, mediante la fórmula de Weber-Frechner:

$$I = k \cdot \log C \quad (1.1)$$

donde «I» es intensidad, «C» concentración y «k» un término de proporcionalidad constante. En la situación habitual, las sustancias con capacidad de producir olor/sabor en un agua pueden interactuar en tres formas:

- a. *Aditividad*: o suma simple de olores/sabores.
- b. *Sinergismo*: o incremento del olor/sabor con respecto a la suma simple de los individuales.
- c. *Antagonismo*: o reducción del olor/sabor resultante con relación a lo esperado por adición simple.

La cloración de aguas para bebida que porten cantidades apreciables de materias orgánicas producen aguas con problemas de olor y sabor, poco apreciadas por el consumidor que automáticamente identifica estos problemas con exceso de cloro en el agua, lo que no es la verdadera causa.

Las fuentes de sabores y olores en un agua responden a dos orígenes: naturales y artificiales. Respecto a las primeras incluyen gases, sales, compuestos inorgánicos, compuestos orgánicos y compuestos procedentes de la actividad vital de los organismos acuáticos. Los compuestos productores de olor/sabor de origen artificial pueden ser también orgánicos e inorgánicos y están probablemente más definidos, al poder identificarse la fuente concreta productora del problema. Pasemos revista brevemente a ambos.

Compuestos inorgánicos

El H_2S , con su típico olor a huevos podridos en concentración alta y a moho o pantano en concentraciones bajas, es suficientemente conocido. Se suele detectar en aguas poco oxigenadas y en aguas profundas de lagos durante la estratificación térmica (verano-otoño). Asimismo, la mayoría de las sales y minerales producen olor salado o metálico en un agua, siendo el umbral de percepción tremendamente subjetivo. Metales que habitualmente producen sabores en un agua son Fe, Mn y Zn; mientras, entre los aniones deben citarse F^- , Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$, HCO_3^- , y NO_3^- .

Es típico también el sabor que produce en el agua el cloro o hipoclorito usado en su tratamiento, especialmente si el agua a tratar lleva compuestos fenólicos o aromáticos (sabor a clorofenoles, o «medicamentoso»).

Compuestos orgánicos

De entre los de origen natural cítense los siguientes:

- a. *Geosmina*, aceite neutro de fórmula $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}$ con un olor terroso o leñoso, producido por especies de actinomicetos.
- b. *Mucidona*, metabolito de fórmula $\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_2$ con persistente olor a moho. Otros odorantes típicos pueden ser *metil-isoborneol*, *metilmercaptanos*, *sulfuro de dimetilo*, etc.

Además, benceno y sustancias afines tienen tanto origen natural como industrial y no se perciben en un agua salvo que estén en concentraciones altas. Finalmente, menciónese a los detergentes debido a los perfumantes y aromatizantes que contienen.

Desde otro punto de vista, los organismos potencialmente productores de olor/sabor en las aguas son prácticamente todos los que pueden vivir en ellas, es decir, algas, hongos, bacterias, cianofíceas, organismos zooplanctónicos y, en general, los encargados de llevar a cabo la putrefacción de materias orgánicas y su descomposición.

Finalmente, la incidencia y problemática asociada a los olores y sabores en el agua de consumo humano viene marcada por dos aspectos: pH y temperatura. Esto es debido a que, generalmente, las sustancias con incidencia organoléptica suelen estar afectadas por un equilibrio ácido-base en que solo una de las formas es la que produce el problema. Además, cualquier sustancia que provoque olor/sabor acentúa esta circunstancia cuando su presión de vapor y su volatilidad son más altas, es decir, cuando la temperatura del agua también lo es. Como complemento al tema, la Tabla 1.3 recoge algunos olores-sabores típicos potencialmente detectados en aguas.

TABLA 1.3. Olores/sabores típicos de las aguas.

Olores	Sabores
Aromático (especies, limón, etc.)	Amargo
Balsámico (flores diversas)	Metálico
Clorado	Salado
Hidrocarburos	Medicinal
Medicinal	Terroso
Sulfuroso	Mohoso
Terroso	Otros
Fecal	
Mohoso (cieno, fango, otros)	

I.5. TURBIDEZ-TRANSPARENCIA, RESIDUO SECO, CONDUCTIVIDAD

a) Turbidez-transparencia

La presencia de materias diversas en suspensión, arena, limos, coloides orgánicos, plancton y otros organismos microscópicos da lugar a la turbidez en un agua. Estas partículas (de dimensiones variables, desde 10 nm hasta diámetros del orden de 0,1 mm) se pueden asociar a tres categorías: minerales, partículas orgánicas húmicas (provenientes de la descomposición o agregación de restos vegetales) y partículas filamentosas (por ejemplo, restos de amiantos u otros filosilicatos).