

ÍNDICE

<i>Prólogo</i>	19
----------------------	----

Tema 1

CALIDAD Y PROPIEDADES DEL AGUA

Vicenta Muñoz Andrés

Introducción	27
1. Tipos de aguas por su composición y origen	28
1.1. Agua atmosférica	29
1.2. Aguas continentales	29
1.2.1. Agua superficial	30
1.2.2. Agua subterránea	31
1.3. Compuestos inorgánicos en el agua superficial	32
2. Propiedades del agua	36
2.1. Propiedades ácido base	36
2.1.1. Sistema bicarbonato-carbonato	37
2.2. Reacciones de precipitación	42
2.2.1. Dureza del agua. Precipitación. Solubilidad de carbonato cálcico	43
2.2.2. Carbonato cálcico disuelto a saturación en agua destilada	44
2.2.3. Carbonato cálcico disuelto a saturación en agua destilada en contacto con la atmósfera	46
2.2.4. Estabilidad del agua frente a la formación de precipitados	49
2.2.5. Eliminación de la dureza del agua. Reacciones de precipitación	51

2.2.6. Aplicación	54
2.3. Acciones debidas a cationes de Al, Fe, Mn y sus compuestos hidroxilados	59
2.3.1. Acción de los hidróxidos de aluminio y hierro en la remoción de coloides	67
2.3.2. Solubilidad de los cationes de hierro en presencia de carbonatos	67
2.4. Propiedades redox. Oxidación-reducción del agua y de compuestos disueltos en agua	70
2.4.1. Oxidación-reducción de hierro (II-III)	74
2.4.2. Solubilidad del hierro (II), (III) en condiciones aerobias y anaerobias	76
2.4.3. Oxidación reducción de Mn (II-IV)	78
2.4.4. Presencia de H ₂ S en el agua	79
2.4.5. Compuestos derivados de nitrógeno	80
2.5. Reacciones de complejación, fotoquímicas y de hidrólisis	81
2.5.1. Procesos de complejación	81
2.5.2. Reacciones fotoquímicas	83
2.5.3. Reacciones de hidrólisis	87
2.6. Reacciones de biodegradación en medio acuoso	88
3. Medio marino	89
3.1. Propiedades del medio marino	90
3.2. Compuestos inorgánicos y orgánicos presentes	93
3.3. Gases disueltos	94
3.4. Presencia de ON ₂ , y de la pareja de gases CO ₂ -O ₂ Implicaciones en la actividad biológica	96
Apéndice. Reacciones de oxidación-reducción	99
Ejercicios de autoevaluación	104

Tema 2

TRATAMIENTO DE LAS CORRIENTES DE AGUAS

Vicenta Muñoz Andrés - Esther Asedegbega Nieto

Introducción	109
1 Calidad de las aguas	109
1.1. Tratamiento de aguas para consumo urbano	111

2. Depuración de aguas residuales de origen urbano	112
2.1. Pretratamiento	113
2.2. Tratamiento primario	113
2.3. Tratamiento secundario, biológico	115
2.3.1. Degradación biológica aerobia	117
2.3.2. Degradación biológica anaerobia	122
2.4. Instalaciones para el tratamiento biológico aerobio	125
2.5. Consideraciones de diseño en un reactor biológico aerobio de fangos	130
2.5.1. Consideraciones cinéticas	130
2.5.2. Diseño. Reactor de mezcla total con recirculación de fangos	133
2.5.3. Consideraciones de diseño y mantenimiento de reactores de mezcla total basadas en la experiencia de la vida activa de ERARs	135
2.5.4. Consideraciones de diseño en un reactor de carruse	140
2.5.5. Instalaciones para el tratamiento biológico anaerobio ..	140
2.6. Eliminación de compuestos de nitrógeno y fosforo	143
3. Tratamiento de lodos	149
3.1. Espesado estabilización y/o deshidratación sobre el fango	150
3.2. Compostaje	152
3.3. Secado de lodo	157
3.3.1. Cinética de secado de lodo	162
3.3.2. Requerimiento energético	165
3.4. Diseño de horno de secado	166
3.5. Aprovechamiento del lodo	168
3.5.1. Procesos a alta temperatura sobre el lodo	169
3.5.2. Otros procesos de valorización del fango	173
4. Tratamientos terciarios	174
4.1. Eliminación de material orgánico no biodegradable	175
4.2. Eliminación de material inorgánico soluble	175
4.2.1. Resinas Cambiadoras de iones	175
4.2.2. Procesos utilizando membranas	179
4.3. Desinfección del agua	182
4.3.1. Cloración	183
4.3.2. Ozonización	184
5. Tratamiento de aguas residuales industriales	185
Ejercicios de autoevaluación	189

Tema 3

GESTIÓN DE AGUAS

Vicenta Muñoz Andrés

1. Gestión del agua	193
1.1. Ciclo hidrológico global	195
1.2. Ciclo hidrológico de cuenca	197
1.3. Características en España de los recursos y del consumo	198
2. Balance hidrológico	198
2.1. Entradas recursos hídricos	298
2.2. Salidas y consumo	200
2.3. Acumulación o pérdidas	204
2.4. Captación del agua de lluvia. Recogida y acumulación	204
2.4.1. Elementos de recogida	205
2.4.2. Captación de agua de lluvia en redes urbanas	206
2.4.3. Gestión de agua de lluvia en zonas urbanas	210
2.4.4. Fuentes de contaminación difusa	211
2.5. Almacenamiento de agua	214
2.5.1. Embalses y presas	214
2.5.2. Acuíferos como elementos de almacenamiento y transporte	216
2.5.3. Características físicas de los acuíferos	220
2.5.4. Pozos	223
2.5.5. Rendimiento del acuífero	226
2.5.6. Recarga de acuíferos	228
3. Precipitaciones	232
3.1. Características	233
3.1.1. Intensidad	233
3.1.2. Escorrentía superficial	236
3.2. Cuencas. Hidrograma de cuenca	237
3.2.1. Hidrograma del canal de salida de una cuenca	238
3.2.2. Hidrograma unitario HU	241
3.2.3. Construcción de hidrogramas a partir del HU	247
3.2.4. Hidrogramas sintéticos	252
3.3. Comportamientos de precipitaciones intensas y puntuales. Olas de inundación	256
3.3.1. Almacenamiento y transmisión del flujo	256
3.3.2. Almacenamiento en presas	261
3.3.3. Almacenamiento en canales	263

4. Tratamiento y reutilización de aguas de procedencia industrial y de procedencia urbana	266
4.1. Uso para riego	268
4.2. Reutilización industrial del agua depurada. Aguas de refrigeración	270
5. Desalación de agua de mar. Técnicas	271
5.1. Procesos de desalación	272
5.1.1. Procesos de destilación	272
5.1.2. Proceso de cristalización	278
5.1.3. Proceso de electrodiálisis	279
5.2. Proceso de ósmosis inversa	279
5.2.1. Flujos a través de la membrana	281
5.2.2. Parámetros	283
5.2.3. Pretratamiento	287
5.2.4. Acondicionamiento del agua desalada	287
5.2.5. Problemática en la toma de aguas y en la emisión de salmueras	289
5.3. Trasvases frente a desalación	293
5.3.1. Legislación sobre la gestión del agua en España en época reciente	293
5.3.2. Consideraciones	294
5.3.3. Trasvases. Algo de historia	298
5.3.4. Trasvases en España	300
5.4. Desalación en España	303
5.4.1. Diseño construcción y explotación de desaladoras en España	304
Ejercicios de autoevaluación	307

Tema 4

**SUELO. FORMACION.
CONSTITUYENTES. PROPIEDADES**

Vicenta Muñoz Andrés

1. Suelo. Horizontes	313
2. Formación del suelo	314
2.1. Factores que intervienen	314
2.2. Procesos de formación del suelo	315

3. Erosión y degradación del suelo	317
3.1 Factores de la erosión	318
3.1.1. Erosión del agua	319
3.1.2. Erosión del viento	321
3.1.3. Erosión glacial	323
3.1.4. Erosión biológica	323
3.1.5. Erosión antrópica	324
3.2 Modelos para predecir la pérdida de suelo	325
4. Fases del suelo. Constituyentes	327
4.1 Minerales	328
4.1.1. Silicatos	330
4.2. Materia orgánica	340
4.3. Agua edáfica	342
4.4. Nutrientes	347
4.4.1. Ciclo del nitrógeno	349
4.4.2. Ciclo del fósforo	351
4.5. Aire edáfico	354
5. Propiedades físicas del suelo	355
5.1. Granulometría. Tamaño de partícula, distribución	355
5.2. Textura	357
5.3. Flujo de aire y agua en el suelo	361
6. Interacción fase mineral–fase acuosa	362
6. 1 Coloides. Potencial zeta	363
6. 2. Fenómenos interfásicos en el suelo. Adsorción, naturaleza, propiedades, consecuencias	369
6.3. Isotermas de adsorción	370
6.4. Reparto entre fases	372
6.5. Diversos procesos de adsorción en el suelo	373
6.6. Intercambio iónico	377
Ejercicios de autoevaluación	382

Tema5

CONTAMINACIÓN DEL SUELO ORIGEN E INCIDENCIA

Vicenta Muñoz Andrés

Introducción	389
1. Contaminantes inorgánicos: metales	389

2. Contaminantes orgánicos	394
2.1. Degradación de la materia orgánica	397
3. Características de acidez-alcalinidad	398
3.1. Acidez–basicidad del suelo	398
3.2. Sucesos que afectan a la acidez del suelo	403
3.3. Consecuencias de la acidez de un suelo	407
3.4. Tratamiento a suelos ácidos	408
4. Degradación del suelo por acumulación de sales	408
4.1. Causas de la salinidad y consecuencias	408
4.2. Medida de la salinidad	410
4.3. Acción sobre los suelos salinos	412
Ejercicios de autoevaluación	414

Tema6

**REMEDIACIÓN DE SUELOS. EL TRATAMIENTO
DE SUELOS CONTAMINADOS**

Vicenta Muñoz Andrés - Jesús Álvarez Rodríguez

Introducción	419
1. Control de suelos contaminados: confinamiento sellado y estabilización	422
1.1. Aislamiento	423
1.2. Sellado por estabilización	425
1.3. Sellado por solidificación	426
1.4. Sellado por vitrificación	427
2. Movilización y tratamiento de suelos por electroremediación	427
2.1. Descripción	428
2.2. Fundamentos	430
2.2.1. Electromigración	430
2.2.2. Electroforesis	431
2.2.3. Electroósmosis	432
2.2.4. Difusión	433
2.2.5. Flujo total	433
2.3. Reacciones en los electrodos	434

2.4. Consideraciones de diseño	436
3. Procesos térmicos de eliminación	437
4. Tratamientos químicos	442
5. Tratamiento de suelos por extracción	444
5.1. Aireación	444
5.2. Arrastre	445
5.2.1. Equilibrio entre fases en los procesos de arrastre de compuestos orgánicos mediante corriente de aire	445
5.3. Succión	448
5.4. Aire a presión	452
5.5 Inyección de vapor	452
5.5.1. Equilibrio entre fases en los procesos de arrastre de compuestos orgánicos mediante corriente de vapor de agua	454
5.6. Lavado	455
5.6.1. Utilización de la operación de destilación para separación de mezclas líquidas procedentes de operaciones de extracción	459
5.6.2. Procedimiento de destilación	462
6. Tratamientos biológicos de recuperación de suelos	466
6.1. Bioremediación	466
6.1.1 Acción de microorganismos, sobre compuestos orgánicos	467
6.1.2. Acción de los microorganismos sobre metales, movilizar e inmovilizar	469
6.2. Técnicas de bioremediación	471
6.2.1. Bioventing	472
6.2.2. Biosparging	472
6.2.3. Landfarming	472
6.2.4. Biopilas	474
6.2.5. Compostaje	475
6.2.6. Bioreactores de lodos	476
6.3. Fitorecuperación	476
6.3.1. Fitoestabilización	477
6.3.2. Fitoextracción-fitoacumulación	477
6.3.3. Rizofiltración	478
6.3.4. Fitodegradación	478
6.3.5. Fitovolatilización	478
6.4. Consideraciones sobre la fitoremediación	478

7. Actuación al suceder un vertido	480
Ejercicios de autoevaluación	482
GLOSARIO	485
BIBLIOGRAFÍA	493
SOLUCIONARIO	497

INTRODUCCIÓN

El agua se encuentra en múltiples lugares: en la atmósfera, en las gotas de lluvia, en el mar, en lagos y ríos, en corrientes subterráneas, en el suelo, cristalizada con minerales, formando parte de compuestos vivos. En raras ocasiones se haya agua completamente pura. Las sustancias que le acompañan depende del lugar geográfico donde se encuentra, el agua de mar tiene una gran concentración en sales, y el agua de los glaciares contiene la menor cantidad de sustancias extrañas.

Las propiedades del agua provienen de su estructura, los dos átomos de hidrógeno y el átomo de oxígeno se unen de acuerdo a una hibridación sp^3 , formando un ángulo formado de $104,5$ grados, ligeramente inferior a $109,5^\circ$ correspondiente a la geometría del enlace modelo. La distancia entre H—O es de $0,1$ nm. La molécula es fuertemente polar (cada hidrógeno $\delta +0,41$, el oxígeno $\delta -0,82$) con un momento bipolar de $1,85D$ y por ello tiene la posibilidad de interaccionar cada átomo de hidrógeno de una molécula con un átomo de oxígeno de otra diferente -lo que se ha dado en llamar puentes de hidrogeno- si la distancia del enlace O-H en una molécula es de $0,096$ nm, entre el oxígeno y el hidrógeno enlazados por el puente de hidrógeno es de $0,17$ nm, y la distancia entre los oxígeno de dos moléculas de agua unidas por puentes de hidrógeno es de $0,27$ nm. Ello provoca que su estado a temperatura ambiente sea líquido, moléculas semejantes H_2S , NH_3 , CH_4 se hallan en fase gas en las mismas condiciones ambientales. Es especialmente importante el hecho de que su densidad que está muy influenciada por la temperatura presenta un máximo a $3,98^\circ C$ superior a la densidad de su estado sólido, lo que permite que en el fondo de ríos y lagos la temperatura del agua sea superior a la temperatura de la capa externa helada, lo que además de facilitar el deshielo permite conservar la vida en el periodo invernal.

Las entalpias de fusión y vaporización, así como el calor específico, son elevados, lo que hace que actúe como un regulador

térmico: reservorio de frío en las zonas heladas y atempera cambios de temperatura. El mar, por tener una masa elevada, modifica su temperatura en pocos grados y lentamente, en una localización determinada. Otras propiedades físicas presentan valores anómalos respecto a compuestos que deberían ser afines, como la constante dieléctrica debida a la polaridad de la molécula -que le confiere propiedades de disolvente-, como la viscosidad que es baja lo que facilita la sedimentación de partículas y el desplazamiento de organismos en su seno, como el movimiento de pequeños insectos sobre su superficie viene propiciado por la alta tensión superficial, que influye a su vez en la formación de gotas.

Las reacciones químicas del agua provienen de su capacidad de actuar como ácido y como base, como oxidante y como reductor, dependiendo del medio, puede intervenir como disolvente e incluso como agente dispersante de coloides, como agente acomplejante y como soporte de procesos fotoquímicos; la propiedad más importante está en relación con el mantenimiento de la vida y es su intervención como transportador de oxígeno (y CO₂) en el medio acuático.

El agua tiene unas características organolépticas color, turbidez, sabor, temperatura, olor, que resultan modificadas por pequeñas cantidades de sustancias presentes. El agua para consumo requiere poseer las propiedades organolépticas, mantener las sustancias que la acompañan en ciertos límites regulados en la legislación vigente y carecer de actividad patógena. De todo ello es sumamente cuidadosa la normativa vigente.

1. TIPOS DE AGUAS POR SU COMPOSICIÓN Y ORIGEN

Se puede reunir en tres grandes grupos los diferentes tipos de aguas, cada uno de ellos con composición y características peculiares que le confieren propiedades diferentes: agua atmosférica, agua continental, y medio marino.

1.1. Agua atmosférica

El agua en fase vapor que se halla en la atmósfera puede pasar a estado líquido en forma de diminutas gotas que forman un aerosol en el aire, la formación de gotas está favorecida por la presencia de partículas sólidas que proceden de la erosión del suelo, de emisiones antropogénicas, de emisiones volcánicas, de sales marinas expulsadas. El tamaño de las gotas 10-50 μm hace que posean una gran superficie en relación al volumen total de agua suspendida lo que facilita el intercambio de sustancias, en primer lugar la disolución de los gases atmosféricos, N_2 , O_2 , CO_2 y de otros que pueden estar presentes; son importantes los óxidos de nitrógeno y de azufre, procedentes principalmente de combustiones, que aportan acidez al agua; también otros ocasionales como HCl , NH_3 . Las partículas sólidas, frecuentemente son de naturaleza calcárea, silícica y principalmente arcillosa.

Las primitivas gotas de agua tienden a crecer hasta llegar a un tamaño aproximado de 1 mm, ya transformadas en gotas de lluvia al caer arrastran o disuelven las sustancias presentes con ello su concentración de minerales aumenta y tanto más en zonas próximas a la costa y a núcleos urbanos. Los óxidos de nitrógeno y azufre se disuelven y acidifican el agua, pueden pasar a grados superiores de oxidación y constituyen los ácidos nítrico y sulfúrico constituyentes principales de la lluvia ácida, si las gotas o la niebla ácida alcanza una zona en cuya atmósfera hay presente NH_3 se forman aerosoles persistentes de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y NH_4NO_3 .

1.2. Aguas continentales

Se entiende por tales las masas de aguas estáticas y corrientes, del interior y costeras hasta el límite territorial en contacto con el mar, se distinguen las superficiales y las subterráneas.

1.2.1. Agua superficial

La composición del agua superficial es muy variada y diferente dependiendo de la situación geográfica: difiere en lagos alimentados por hielos y aguas de montaña, alimentados por ríos o alimentados por aguas subterráneas, también en los ríos depende del tramo. En el nacimiento donde su velocidad es elevada la erosión y el arrastre de elementos de tamaño considerable es importante, en el tramo medio, reúne junto a las partículas que transporta las que recibe de otros afluentes, molitura las partículas arrastradas, y se produce la disolución y suspensión de materiales; en la zona final se observa mayor sedimentación de materiales finos debido al descenso de la velocidad. Es frecuente el curso del río menos lineal, en meandros. Por último en la desembocadura se produce una interrelación con el agua de mar de propiedades muy diferentes al agua de río, ésta dulce, con material arcilloso y orgánico suspendido y de menor densidad se pone en contacto con agua de alta concentración de sales y muy densa, ambas aguas no se mezclan de inmediato, puede haber dos lenguas de agua, dulce en superficie y de agua salada en profundidad que coexisten en un tramo, e incluso puede que el último tramo sea únicamente de agua salada (las rías). Si la corriente fluvial arrastra una alta cantidad de coloides la alta concentración de sales puede provocar la precipitación de dichos coloides, en función del caudal del río, y de la intensidad de las corrientes litorales marinas, pueden ser o no arrastrados provocando desembocaduras muy diferentes (rías gallegas, estuario de Lisboa, delta del Ebro).

La cantidad de minerales que transporta una corriente superficial depende de la naturaleza del terreno donde se produce la escorrentía, mayor o menor pendiente, más o menos permeable; de la estación del año, propia de precipitaciones o de evaporación, influye poderosamente. Los minerales que contiene pueden estar en suspensión, como coloides o solubilizados (las sales solubilizadas dan lugar a los iones carbonato, bicarbonato, sulfato, cloruro, sodio, potasio, calcio, magnesio, aluminio, manganeso, hierro).

Además hay una serie de compuestos orgánicos en la corriente debidos a la propia vida que mantienen los ríos, al arrastre de restos

agrícolas, pesticidas, por deposición atmosférica, y por vertidos urbanos (industriales).

La concentración de oxígeno (y CO_2) que mantiene un agua natural depende de la temperatura, de la superficie en contacto con el aire y por tanto de la turbulencia de la corriente que altera la relación superficie interfásica aire-agua/ volumen de la masa de agua, esto es singularmente importante en lagos, de relación área/volumen baja, aireados por acción del viento, por el contrario el agua está muy oxigenada en los rápidos, en los que se aumenta la aireación; para provocar aireación se introducen obstáculos en los cauces normales como un represado que obliga a un pequeño salto en el flujo del agua. Hay que tener en cuenta la difusibilidad de los gases: flujo molecular de un compuesto en una fase debido a un gradiente de concentración de dicho compuesto en la fase. El oxígeno, como cualquier otro gas, difunde peor en el agua que en el aire, y el coeficiente de difusión depende de la turbulencia, de nuevo es mayor en los ríos y menor en los lagos. De acuerdo a la ley segunda de Fick:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{dC^2}{dL^2} \quad [1.1]$$

El oxígeno es consumido por diversos vegetales y animales acuáticos y por bacterias en la degradación de materia orgánica, la mayor o menor presencia e incluso ausencia de O_2 modifica el potencial red-ox del agua; cuanto mayor sea la vida animal y vegetal en el agua mayor requerimiento de oxígeno existe. Únicamente la fotosíntesis de algas u otros vegetales reduce el CO_2 y proporciona oxígeno, lo que ocurre sólo en la zona en la que penetra la luz. De nuevo los lagos por tener una relación área superficial/ profundidad menor que los ríos tiene menor posibilidad de vida aerobia y pueden contener bacterias anaerobias.

1.2.2. Agua subterránea

En cuanto al agua que se infiltra en el suelo, parte permanece incorporada al medio edáfico y parte se infiltra hasta alcanzar un soporte impermeable, es la capa de saturación en la que el agua rellena

los poros, la zona de infiltración donde aire y agua comparten los poros se denomina zona vadosa, el límite superior de la zona saturada es el nivel freático. El agua en el transcurso de su viaje hacia zonas impermeables, recoge las sustancias solubles o coloides y arrastra otras de carácter tanto mineral como orgánico, hay que tener en cuenta que en estas aguas sin aporte de oxígeno se crean estados anaerobios y por tanto reductores. En la zona saturada el agua puede moverse con velocidad lenta de unos metros al día, la velocidad depende del gradiente de altura hidráulica o carga de presión, y de la conductividad, está viene influenciada por el tamaño de partículas del sedimento, y en especial por el mezclado de partículas pequeñas, arcillas, con partículas grandes, arenas, ya que las pequeñas taponan el hueco dejado entre partículas grandes. Si la porosidad efectiva -volumen de poros interconectados/volumen de sedimentos, es baja la velocidad será mayor porque el área a atravesar es menor.

Se insistirá en la composición de las sustancias que la acompañan al tratar de las propiedades del agua.

1.3. Compuestos inorgánicos en el agua superficial

De los compuestos solubilizados los más abundantes son compuestos inorgánicos en especial aniones y cationes que provienen del suelo y se hallan en mayor o menor cantidad en función de la disponibilidad en el suelo próximo y a la solubilidad de los mismos, se puede distinguir entre iones mayoritarios y minoritarios, además habría que considerar los elementos traza.

Se describen a continuación algunos iones mayoritarios.

Calcio, es la causa principal de la dureza del agua (la dureza debida a calcio y magnesio se mide en mg equivalentes de CaCO_3 por litro); este catión está asociado principalmente a los iones carbonato-bicarbonato, entra en la constitución de rocas ígneas: plagioclasa, piroxenos, anfíboles y en rocas sedimentarias calcita, aragonito, dolomita, yeso y anhidrita, y en arcillas como la montmorillonita, existe en todo tipo de suelos salvo en los formados estrictamente por sílice como el cuarzo y sedimentos de diatomeas. Es un catión de cambio, es

decir, puede intercambiarse con otros cationes en la interrelación suelo-agua, y por tamaño y carga tiende a expulsar a otros cationes de los sitios de adsorción como los alcalinos.

Magnesio (le recordamos asociado a la clorofila), forma parte de rocas ígneas: plagioclasa, piroxenos, anfíboles y de micas, de rocas metamórficas como clorinas y serpentinas. En rocas sedimentarias se encuentra como carbonato en magnesita, asociado a calcio en dolomita y como hidróxido en brucita; hidróxidos formados por precipitación del carbonato previamente solubilizado. Como catión de intercambio es de tamaño y carga similar al calcio y como él se retiene en arcillas. El magnesio no escasea en el agua, tan solo escasea en suelos ácidos, a los que se incorpora como dolomita para su corrección.

Sodio, está muy ligada su concentración a la de ión cloruro (complejo iónico Cl-Na), es el más abundante de los alcalinos, son fuente del sodio, ciertos feldespatos, evaporitas y el espray de gotas de mar producido en la costa. El suelo se puede enriquecer en este ión si la evaporación del agua es muy intensa y el aporte escaso, con ello se saliniza el suelo y más si el agua de riego es rica en sales o si se producen vertidos de sal común por diversas causas, como en medios urbanos en invierno para reducir o evitar cubiertas de hielo en calles y caminos, y en la desalación de aguas salobres interiores si el concentrado en sales revierte al suelo. El sodio no es reactivo no tiene características redox, ni precipita con los aniones comunes, puede proceder a intercambio iónico en minerales con carga negativa, aunque en general el proceso es el inverso se ve expulsado por cationes de mayor carga.

Potasio, nutriente de plantas y animales, se halla en menor concentración que el sodio, proviene de ciertos minerales (micas y algunos feldespatos y es importante en illita) y de los detritus de animales, suele estar en carencia y se adiciona como abono a los cultivos. Este catión, al contrario que el sodio se mantiene en solución aún si la evaporación es rápida e intensa. Es posible su retención en arcillas, hay una retención rápida de **K⁺ catión de intercambio** y sucede una retención lenta y más eficaz si su introducción se realiza en el interior de las capas de arcilla, **K⁺ fijado**. Si en el aporte como abono se halla en exceso las plantas lo acumulan, en los restos vegetales

se devuelve al suelo, éste “ K^+ orgánico” es de nuevo retenido por las arcillas con facilidad y con ello se cierra un cierto ciclo del potasio.

Bicarbonato, este anión está asociado al carbonato y al CO_2 en disolución, su concentración depende de la presencia de rocas calcáreas para introducir anión carbonato, de la aireación del agua para introducir CO_2 y del consumo o expulsión del mismo por los organismos imbuidos en el medio. Su concentración está directamente relacionada con el pH del medio y contribuye a su estabilización, tan sólo se transforma a carbonato en medios muy alcalinos. Se relaciona con la presencia de cationes de calcio y magnesio.

Cloruro, por su presencia en el agua el siguiente anión en importancia, después del bicarbonato-carbonato es el cloruro, este elemento se halla como anión cloruro tanto en agua como en suelo, se encuentra en evaporitas y es reenviado a la atmósfera desde emisiones marinas, se adiciona en fertilizantes, como KCl. Es soluble, móvil, en cierto modo inerte, no precipita en reacciones redox ni participa en la formación de complejos, en arcillas es uno de los aniones más desplazados por otros aniones, en suelos muy áridos permite la deposición de sodio como NaCl, Se usa como elemento traza en el balance de materia en corrientes, y en la medida de evotranspiración.

Sulfato, los minerales que contienen azufre como sulfato son evaporitas, yeso y anhidrita. En otras rocas, ígneas o sedimentarias, el azufre se halla como sulfuro de metales diversos, principalmente FeS, los sulfuros son muy insolubles, en contacto con el aire pueden oxidarse a sulfatos algunos solubles otros insolubles como sulfato de bario, sulfato de plomo, sulfato cálcico. Un aporte de azufre sucede al descomponerse la materia orgánica bien en forma reducida bien en forma oxidada dependiendo de las condiciones del medio. En la combustión de materiales fósiles, petróleo, gas, carbón, que contienen azufre, en la erupción de volcanes y en la tostación de piritas se desprende SO_2 que se oxida hasta ácido sulfúrico que forma aerosoles en la atmósfera estos aerosoles son responsables de la lluvia ácida que puede provocar la destrucción de ecosistemas.

En disolución, el azufre se puede hallar como S^{2-} en condiciones anaerobias y como SO_4^{2-} en condiciones aerobias, en ausencia de oxígeno

este compuesto SO_4^{2-} actúa como oxidante de la materia orgánica pasando a H_2S tóxico para la vida. La oxidación de piritas (sulfuros) en el suelo origina un consumo elevado de oxígeno y proporciona acidez al agua, liberando, además cationes metálicos. A dicha oxidación se le suma, si el pH se rebaja hasta 4, la oxidación realizada por la bacteria *Thiobacillus Ferrooxidans*, oxidación de cinética rápida lo que favorece la mayor acidez del medio. Como consecuencia las corrientes de aguas de drenaje en minas son muy ácidas y con un alto contenido en cationes, es importante el número de cationes que tan sólo están disueltos como tales en condiciones muy ácidas, de lo contrario precipitan como hidróxidos o como carbonatos. En el flujo de estas aguas ácidas se ponen en contacto con otros materiales y los cationes pueden ser adsorbidos o intercambiados en otros minerales, su contacto con materiales como calcitas provoca una bajada de acidez y se produce una precipitación de hidróxidos-óxidos de diversos cationes, una incorporación de Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , en el medio.

Nitratos-fosfatos, tienen características, junto al potasio, de nutrientes esenciales y se expondrán en otro apartado.

Cationes en disolución relativamente abundantes, con un comportamiento en cierto modo semejante, son hierro, aluminio y manganeso.

Hierro, forma parte de la hemoglobina y los cloroplastos, es el segundo elemento metálico más numeroso, (aluminio el mayor) se encuentra en rocas ígneas en los dos estados Fe(II) y Fe(III), en condiciones reductoras se halla como piritita, carbonato, óxido e hidróxido (ver apartado 2.3.). En disolución se encuentra en el estado (III) sólo a pH extremadamente ácido y en condiciones aerobias, en condiciones anaerobias se halla en estado (II).

Manganeso, metal de transición semejante al hierro, puede hallarse diferentes estados de oxidación Como Mn (II) forma parte de rocas ígnea y de otras sedimentarias como dolomita, en disolución se encuentra en condiciones anaerobias es más soluble y más estable a la oxidación que Fe (II), el manganeso en condiciones oxidantes puede hallarse como MnO_2 insoluble. Forma un cierto ciclo ya que permanece en las plantas concentrado y estas en su descomposición lo aportan al

suelo, del que posteriormente lo tomarán, en épocas de gran degradación, otoño, su concentración en el suelo aumenta, y disminuye en la época de crecimiento de vegetales.

Aluminio, tercer elemento en abundancia. No se le conoce papel biológico y puede ser tóxico para plantas en elevadas concentraciones, su concentración aumenta en vertidos antropogénicos. En disolución tan sólo se halla a pH muy ácidos, por tanto está presente en el agua edáfica en suelos muy ácidos.

Estos tres cationes tienen ciertas características comunes, como la posibilidad de formar diversos oxo-hidroxo complejos en función del pH, que se expondrán en apartados posteriores.

2. PROPIEDADES DEL AGUA

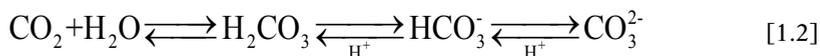
2.1. Propiedades ácido-base

La acidez de un agua, capacidad de neutralizar oxidrilos, se debe fundamentalmente a la presencia de CO_2 y sus compuestos derivados, $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{CO}_3, \text{HCO}_3^-, \text{CO}_3^{2-}$. La presencia de CO_2 atmosférico provoca su disolución en el agua, el contenido máximo en CO_2 en equilibrio aire-agua depende de la temperatura y de la presión, viene definido por la ley de Henry.

Presión de CO_2 en la fase gas = K_H Concentración de CO_2 en la fase líquida.

Naturalmente K_H depende de la temperatura. A 25°C la saturación aire-agua destilada, lleva la concentración de CO_2 a $1 \cdot 10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$

En agua tienen lugar una serie de reacciones a partir de CO_2 disuelto:



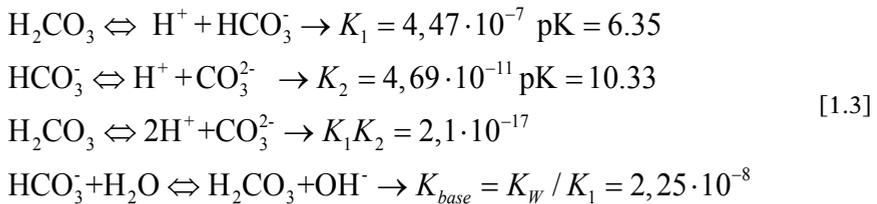
La disolución de CO_2 en agua provoca un cierto contenido de acidez que puede ser estimado a partir de las constantes de disociación del ácido carbónico. En agua destilada y aireada el pH es de 5,67 debido a

la presencia de CO_2 y HCO_3^- . En el agua atmosférica, en presencia de óxidos de azufre y de nitrógeno, el pH se reduce y se llega a rebajar a 3. Otros compuestos que aportan acidez en el agua, que son menos importantes y no siempre están presentes, son: H_2S , H_2PO_4^- , ácidos orgánicos, ácidos húmicos y fúlvicos, estos en especial en el agua edáfica.

Unido al fenómeno de acidez está el de alcalinidad, propiedad de aceptar protones. En el agua natural los iones, responsables de la alcalinidad son OH^- , CO_3^{2-} y HCO_3^- , en menor medida otros como el amoníaco, los aniones correspondientes a la protonación de los ácidos fosfóricos, silícicos, bóricos, y de los fúlvicos y húmicos.

2.1.1. Sistema bicarbonato-carbonato

Centrando el interés en el sistema CO_2 -agua hay que considerar que el CO_2 transferido al agua, en parte se halla como gas disuelto y en parte se une a ésta como H_2CO_3 , en este caso sufre una serie de transformaciones a ión bicarbonato e ión carbonato; ambos pueden reaccionar con otros iones del medio. Las reacciones y las correspondientes constantes de equilibrio (25°C) son:



Dada la interacción entre CO_2 disuelto, sus iones transformados y el pH del medio, conviene señalar ciertos conceptos necesarios para el estudio de este sistema.

Se denomina “carbono total CT” a la suma de las concentraciones de las tres especies relacionadas

$$CT = [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \quad [1.4]$$