

TEMA 2.1
CALIDAD DEL AGUA, CONCENTRACION Y ESTEQUIOMETRIA

CI41B Ingeniería Ambiental

Profesores C. Espinoza, D. Rodríguez y R. Muñoz
Semestre Otoño 2005

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los problemas relacionados con contaminación ambiental que enfrentamos en nuestra actividad profesional tiene un contenido importante de física y química. Incluso la descripción más cualitativa de problemas tales como el efecto invernadero, la disminución de la capa de ozono, la contaminación de aguas subterráneas y del aire, así como la lluvia ácida requieren la comprensión de algunos conceptos básicos de física y química. Este capítulo incluye un pequeño número de tópicos que han sido seleccionados con el propósito de presentar los principios básicos esenciales que nos permitan entender la naturaleza de los problemas ambientales que enfrentamos y de sus posibles soluciones.

Problemas ambientales comunes están relacionados con la descarga de sustancias al ambiente líquido o gaseoso, y cual es el impacto que dichas descargas causan sobre el medio ambiente. De igual modo, muchas soluciones a problemas ambientales pueden ser estudiadas a partir de una serie de conceptos técnicos muy simples, pero a la vez muy poderosos.

Gases, líquidos y sólidos pueden disolverse en agua para formar soluciones reales. La sustancia que se disuelve es denominado el **soluta**, mientras que la sustancia o medio en el cual es disuelto se denomina **solvente**. Una solución puede tener cualquier concentración de soluto bajo un cierto límite denominado la **solubilidad** de esa sustancia en ese medio. Aún cuando estos conceptos son generales, en este curso el énfasis principal está en el solvente agua, analizando en forma secundaria problemas relacionados con contaminación atmosférica.

Las aguas naturales siempre contienen iones disueltos los cuales provienen del contacto del agua con minerales tales como el limo, magnetita, yeso y sales. Los más comunes cationes encontrados en el agua natural son calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), y potasio (K^+). Los aniones más comunes son los bicarbonatos (HCO_3^-), cloros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}), y en menor cantidad nitratos (NO_3^-). En cualquier agua la electroneutralidad de la muestra debe ser mantenida, es decir, la suma de los cationes debe ser siempre igual a la de los aniones

Aguas que se encuentran afectadas por algún tipo de contaminación pueden contener desde metales pesados y/o pesticidas, hasta elementos orgánicos complejos cuya presencia se debe fundamentalmente al impacto de la actividad humana.

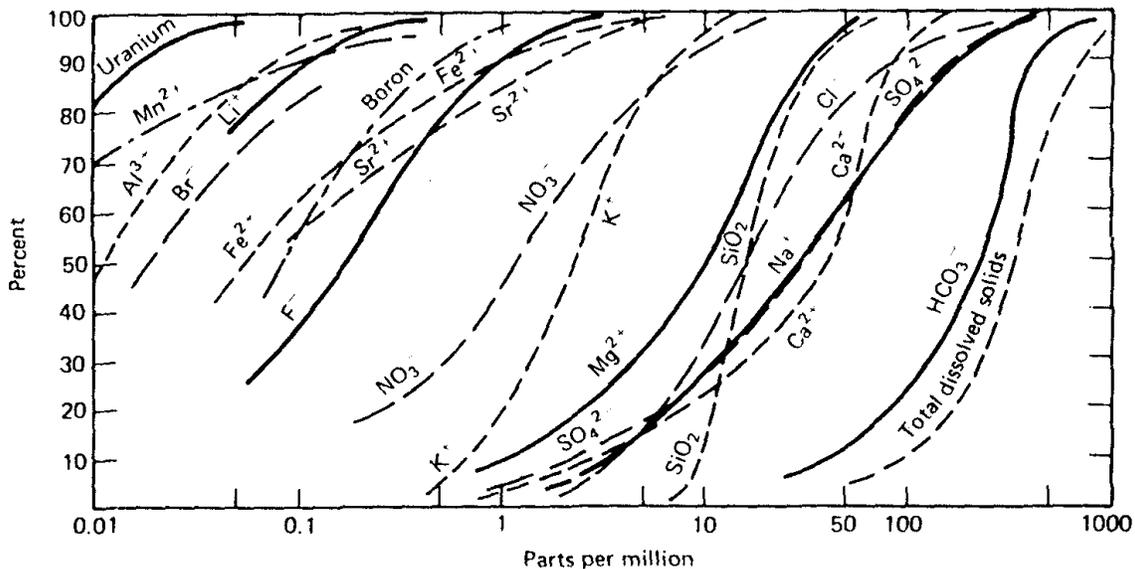
2. COMPOSICION QUIMICA MEDIA DE AGUAS NATURALES

2.1 Generalidades

El agua (H_2O) es una molécula fuertemente dipolar por lo que presenta marcadas propiedades solventes, es decir, el agua siempre disolverá algo de cualquier sólido o gas con el cual entre en contacto. En el ciclo global del agua en la tierra (ciclo hidrológico) el agua entra en contacto con los gases de la atmósfera (incluyendo contaminantes del aire y emisiones volcánicas) y los minerales y sales de la corteza terrestre. A una escala menor, el agua circula en los sistemas construidos por el hombre (ductos y cañerías de concreto, asbesto-cemento, fierro, cobre plástico) sobre los cuales el agua también puede ejercer esta acción disolvente, si las condiciones la favorecen.

Esta característica del agua es la causante de la presencia en ella de variados iones, algunos en concentraciones mayores que otros, dependiendo de condiciones geológicas y/o antrópicas (Figura 2.1). Algunos iones como los macro constituyentes disueltos del agua (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- , SiO_2) son casi omnipresentes y sus concentraciones varían en un estrecho rango y otros, por el contrario, son característicos de ciertos medios geológicos y/o antrópicos. Pertenecen a este último grupo algunos metales y muchos compuestos orgánicos.

Figura 2.1
Distribución de distintos constituyentes en aguas terrestres



En resumen las reacciones químicas de la molécula de H_2O , con la atmósfera y los suelos y rocas de la corteza terrestre, forman una solución mineral acuosa diluida que llamamos agua superficial o subterránea y que empleamos como fuente de agua potable, la que luego de ser sometida a distintos procesos de tratamiento, según las necesidades, constituye el agua que se distribuye a los consumidores a través de un sistema de distribución, conformado por elementos de distintos materiales que también pueden contribuir a la composición final del agua potable.

El agua natural como un nicho ecológico contiene una variedad de microorganismos. En un agua natural existen bacterias, algas, hongos, protozoos, en armónico equilibrio, cuyo principal papel es mantener el conjunto (*pool*) de nutrientes en el agua, a través del reciclaje de los compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en el agua, servir de base para mantener el

normal establecimiento de las cadenas tróficas y recuperar la calidad del agua, a través de los procesos de autopurificación ó catalizando una serie de reacciones químicas: fotosíntesis, oxidación, reducción, metilación, degradación, etc.

2.2 Factores Que Influencian la Composición Natural del Agua

La composición química de las fuentes de agua superficial es reflejo de la geografía local, estacionalidad, escorrentía, procesos biológicos y actividades antrópicas desarrolladas en la cuenca.

La presencia de microorganismos en el agua es influenciada por una gran variedad de factores bióticos y abióticos. Los factores bióticos corresponden a interacciones de los organismos entre sí, los cuales pueden ser favorables (comensalismo, sinergismo, simbiosis o mutualismo), o antagónicos (competencia, predación, parasitismo, antibiosis). Los factores abióticos pueden ser de tipo físico o químico. Dentro de los físicos se incluyen pH , turbiedad, luz solar, temperatura, presión hidrostática. Entre los químicos: oxígeno disuelto, sales y nutrientes orgánicos e inorgánicos.

La presencia de microorganismos de origen fecal, refleja la disposición en ellas de aguas residuales de origen doméstico.

La calidad físico química de las fuentes de agua potable subterráneas depende de la composición del agua de recarga, las interacciones entre el agua y el suelo, el suelo-gas y las rocas con las cuales entra en contacto en la zona no saturada, del tiempo de residencia y las reacciones que se producen en el acuífero. Por lo tanto, puede encontrarse variaciones significativas de calidad, aún en una misma área, especialmente, cuando se tiene rocas de diferente composición y solubilidad. Los procesos principales, que influncian la calidad del agua en los acuíferos son físicos (dispersión/dilución, filtración y movimiento de gases), geoquímicos (formación de complejos, reacciones ácido-base, óxido-reducción, precipitación-solución y adsorción-desorción) y bioquímicos (respiración y decaimiento microbial, síntesis celular).

También puede influenciar la calidad del agua subterránea, la actividad antrópica que genera contaminación en el suelo superficial, porque la mayoría de las aguas subterráneas se originan por recarga del agua lluvia que infiltra desde la superficie. El agua de lluvia misma puede presentar, además, una acentuada acidez lo que aumenta su capacidad de disolución. La zona no saturada puede contribuir a reducir las concentraciones de algunos contaminantes, pero también puede actuar como sitio de almacenamiento para algunos de ellos, los que eventualmente puede ser liberados. Algunos contaminantes ingresan a las aguas subterráneas directamente desde pozos abandonados, minas, canteras, tuberías de aguas residuales enterradas, por lo cual evitan la zona no saturada y por lo tanto, la posibilidad de que actúe sobre ellos algún proceso natural de descontaminación y/o atenuación se reduce.

En general, las fuentes subterráneas presentan concentraciones de sales disueltas mayores que las aguas superficiales, dado el íntimo y prolongado contacto que establece el agua con rocas y suelos. Las aguas subterráneas son, en general, de composición más constante que las aguas superficiales y se consideran menos vulnerables que éstas a la contaminación. Las aguas superficiales pueden llegar a presentar significativos cambios de composición, temporal y espacial, producto de la disposición en ellas de aguas residuales provenientes de la actividad doméstica e industrial.

Por tanto la selección, entre recursos superficiales y subterráneos, de fuentes de agua potable marca una notoria diferencia en el riesgo potencial de contaminación. No obstante cualquiera sea la fuente seleccionada no debieran escatimarse esfuerzos para evitar y controlar su contaminación.

2.3 Factores Que Modifican el Destino y Concentración de Contaminantes en el Agua

El destino y concentración de las sustancias químicas en los cuerpos de agua puede ser afectado por procesos de: hidrólisis, formación de complejos, intercambio iónico, degradación microbiana, oxidación-reducción, fotólisis y fototransformación, precipitación y co-precipitación, solubilidad, sorción y volatilización. La tasa y grado al cual se dan estos procesos depende de las condiciones ambientales locales prevalecientes. Estos procesos a su vez pueden afectar significativamente la disponibilidad, toxicidad, persistencia y destino de las sustancias químicas en la fuente de agua potable (Tabla 2.1).

Tabla 2.1
Procesos que pueden afectar la disponibilidad, toxicidad, persistencia y destino de las sustancias químicas presentes en fuentes de agua potable

Procesos	Constituyentes químicos		
	Metales	Organismos	Nutrientes
Formación de complejos	X		
Hidrólisis	X	X	
Intercambio iónico	X		
Degradación microbiana		X	X
Metilación	X		
Oxidación-reducción	X	X	X
Fotólisis y fototransformación		X	
Precipitación y co-precipitación	X		
Sorción	X	X	
Volatilización		X	

El agua puede transportar una variada gama de organismos patógenos. Los más frecuentes corresponden a bacterias, virus, protozoos y ovas de helminto excretadas por las heces de animales de sangre caliente, incluido el hombre. Sólo algunos patógenos son organismos propios del agua y en general su expresión va asociada a situaciones de desequilibrio que ocurren en el medio acuático, ya sea por causas naturales o por actividad antrópica. La mayoría de los organismos patógenos propios del agua son de tipo oportunista o secundario, aunque también existen algunos de tipo primario.

Para que los patógenos de transmisión hídrica expresen su capacidad de producir infecciones se deben considerar aspectos asociados al comportamiento del agente infeccioso en el agua. Entre ellos se mencionan: latencia, supervivencia o persistencia y capacidad de multiplicación de los agentes en el agua.

Por otro lado, la calidad y concentración de patógenos en el agua depende del estado de salud de la población que genera las excretas, es decir de las endemias locales o brotes epidémicos de infecciones excretadas y de la existencia de tratamiento de las aguas servidas, previo a su descarga a cuerpos de aguas naturales.

Algunos factores climáticos como sequías o lluvias intensas pueden modificar la calidad y cantidad de patógenos clásicos u oportunistas en el agua, ya sea por disminución del caudal o volumen de agua de ríos, lagos, embalses y/o por arrastre de organismos del suelo.

El agua pura no existe en la naturaleza, por lo que su definición teórica como combinación química de oxígeno e hidrógeno no puede extenderse al estado en que se encuentra habitualmente. El agua es el solvente más abundante, y es capaz de incorporar gran cantidad de sustancias al estar en contacto con la atmósfera y los terrenos por los cuales circula.

2.4 Calidad del Agua según su Origen

2.4.1 Aguas Subterráneas

Las aguas subterráneas tienen una mayor oportunidad de disolver materiales por las mayores superficies de contacto, lentas velocidades de circulación y mayores presiones y temperaturas a las que están sometidas y facilidad de disolver CO_2 del suelo no saturado (Tabla 2.2). Por ello, sus concentraciones salinas son superiores a las de las aguas superficiales, en general.

Estas mismas condiciones físicas a que se hallan sometidas las aguas subterráneas suponen asimismo una reducción de las materias en suspensión y de la materia orgánica, debido esta última a la acción de los propios microorganismos del terreno.

La mayoría de las aguas subterráneas no contienen materia suspendida y prácticamente ninguna bacteria. En general son claras e incoloras. Estas características contrastan con aquellas de las aguas superficiales, y a que las aguas superficiales son generalmente turbias y contienen considerables cantidades de bacterias (Tabla 2.3). Las aguas subterráneas son normalmente de calidad sanitaria superior. Su temperatura es relativamente constante, otro importante factor en algunos casos.

2.4.2 Agua de Mar

Los mares representan la mayor reserva de agua del planeta, el agua de mar contiene como promedio 3.5% de sales disueltas (35.000 ppm). Esta concentración hace a esta agua inadecuada para muchos usos domésticos e industriales o para regadío en cultivos convencionales. Las sales principales contenidas en el agua de mar son: Cloruro de sodio y Cloruro de magnesio (constituyen más del 90% de la salinidad), sulfato de calcio, sulfato de potasio y carbonato de calcio (Tabla 2.4).

La gran extensión de zonas secas en la tierra, algunas de las cuales han sido pobladas por el hombre, en que no hay otros recursos hídricos disponibles, ha hecho necesaria la remoción de sales del agua de mar o salobre.

En general los procedimientos para potabilizar agua salobre pueden ser clasificados en dos grupo: los que extraen el agua pura de la solución y los que extraen las sales de la solución.

Entre los primeros se cuentan la destilación, congelación, osmosis invertida, formación de hidratos, etc. y entre los segundos la extracción mediante membranas selectivas y el intercambio iónico.

Tabla 2.2
Constituyentes Disueltos en Aguas Subterráneas
(Según Davis y De Wiest, 1966)

Constituyentes principales (rango de concentración 1.0 a 1000 ppm)	
Sodio (Na) Calcio Magnesio Sílice	Bicarbonato Sulfato Cloruro
Constituyentes secundarios (rango de concentración de 0.01 a 10.0 ppm)	
Hierro Estroncio Potasio Boro	Carbonato Nitrato Fluoruro
Constituyentes menores (rango de concentración de 0.0001 a 0.1 ppm)	
Antimonio Aluminio Arsénico Bario Bromo Cadmio Cromo Cobalto Cobre Germanio Yodo Plomo	Litio Manganeso Molibdeno Niquel Fosfato Rubidio Selenio Titanio Uranio Vanadio Zinc
Constituyentes trazas (rango de concentración generalmente menor que 0.001 ppm)	
Berilio Bismuto Cerio Cesio Galio Oro Indio Lantano Niobio Platino Radio	Rutenio Escandio Plata Talio Torio Estaño Tungsteno Yterbio Ytrio Zirconio

Tabla 2.3
Características Generales de Aguas Superficiales y Subterráneas
(De Black, A.F., 1959)

Características	Aguas Superficiales	Aguas Subterráneas
Físicas		
Turbiedad	Variable, baja a muy alta	Prácticamente ninguna
Color	Variable	Constante bajo o ninguno
Temperatura	Variable	Constante
Químicas		
Mineralización	Variable, generalmente muy baja	Constante y dependiente de los terrenos
Dureza	Generalmente baja	Dependiente de los terrenos, generalmente alta
Estabilidad	Variable, generalmente algo corrosivas	Constante, generalmente algo incrustantes
Bacteriológicas	Variable y generalmente contaminadas	Constante y generalmente puras
Radiológicas	Expuestas a contaminación directa	Protegidas contra la contaminación directa

Tabla 2.4
Composición de Agua de Mar
(Según Rankama y Sahama, 1950)

Constituyente	Concentración	Constituyente	Concentración
Cl	18,980	Pb	0.004-0.005
Na	10,560	Se	0.004
SO ₄	2,560	As	0.003-0.024
Mg	1,272	Cu	0.001-0.09
Ca	400	Sn	0.003
K	380	Fe	0.002-0.02
HCO ₃	142	Cs	0.002
Br	65	Mn	0.001-0.01
Sr	13	P	0.001-0.10
B	4.6	Th	0.0005
F	1.4	Hg	0.0003
Rb	0.2	U	0.00015-0.0016
Al	0.16-1.9	Co	0.0001
Li	0.1	Ni	0.0001-0.0005
Ba	0.05	Ra	8.10-11
I	0.05	Be	-
SiO ₂	0.04-8.6	Cd	-
N	0.03-0.9	Cr	-
Zn	0.005-0.014	Ti	Trazas

2.4.3 Aguas Lluvias

El vapor de agua condensado y precipitado a gran altura es prácticamente puro. Al caer lluvia o nieve, absorbe oxígeno, anhídrico carbónico y otros gases del aire, así como polvo, humo y desechos. En forma global estas impurezas son de poco monto excepto al comienzo de una lluvia cuando el agua que cae debe “limpiar” la atmósfera, esto es especialmente notorio sobre las ciudades donde la atmósfera está más contaminada. Normalmente, las impurezas que se incorporan a las aguas lluvias en su paso por el aire son de poca importancia sanitaria.

Las aguas lluvias son muy blandas, saturadas de oxígeno, pero insípidas y corrosivas. En las localidades en que las aguas lluvias son utilizadas, su calidad definitiva depende del grado de limpieza de las superficies de captación y de los sistemas de almacenamiento y distribución.

3. FORMAS DE EXPRESAR CONCENTRACIONES

Una gran cantidad de problemas ambientales se refiere a la presencia de elementos extraños dentro de una solución líquida o gaseosa, que afectan la "calidad" de dicha solución. Cuando estos elementos extraños afectan o impiden el uso de dicha solución para una actividad determinada se habla de contaminación. Por ejemplo, en el caso de agua potable, se habla de contaminación cuando existen dentro de ella ciertos elementos que son inadecuados o que pueden afectar la salud humana. Para evaluar cuantitativamente el impacto de dichos elementos extraños o contaminantes se utiliza el concepto de concentración, el que se refiere básicamente a cuanto de ese elemento extraño está presente en la solución. Si la cantidad de contaminante (solute) es muy pequeña con respecto a la cantidad de solvente, se puede definir concentración como:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{cantidad de soluto}}{\text{cantidad de solución}} = \frac{\text{cantidad de soluto}}{\text{cantidad de soluto más solvente}} \quad (1)$$

Dependiendo de la forma en la cual se miden la *cantidad de soluto* y la *cantidad de solución* existen básicamente tres formas de expresar concentraciones:

1. Masa/masa (comúnmente referida como peso/peso), o más explícitamente, la masa de soluto sobre la masa de solución. Unidades típicas son mg/kg, también expresada como ppm (partes por millón), el porcentaje en peso y la fracción molar.
2. Masa/volumen (comúnmente referida como peso/volumen), corresponde a la masa de soluto por volumen de solución. Unidades típicas de medición son mg/L y mol/L. En el caso de un gas, el volumen de la solución depende de la temperatura. Este tipo de unidad se utiliza normalmente para líquidos.
3. Volumen/volumen, corresponde a una unidad utilizada en el caso de gases y se refiere al volumen de soluto por volumen de solución.

Otra forma típica de expresar concentraciones es a través de **un constituyente común**. En este caso se expresa la concentración de distintos compuestos usando un constituyente común a todos ellos. Un caso típico es el de los compuestos de nitrógeno, los cuales se encuentran de las siguientes formas en el agua servida o residual:

- Nitrógeno Amoníaco NH_4^+, NH_3
- Nitrógeno orgánico varias formas
- Nitrito NO_2^-
- Nitrato NO_3^-

En este caso se acostumbra reportar los resultados en término de nitrógeno (N) de tal forma que los valores puedan ser comparados directamente. La forma de hacerlo es a través de los pesos moleculares de los distintos compuestos presentes. El *peso molecular* de una molécula es simplemente la suma de los pesos atómicos de sus átomos constituyentes.

4. CONCENTRACIÓN MOLAR

Una forma común de expresar concentración es a través del concepto de **Molaridad** o **Concentración Molar**. Para incorporar este concepto consideremos los siguientes elementos. El **peso atómico** de un átomo es la masa del átomo medida en **unidades de masa atómica** (uma), mientras que el **número atómico** es el número de protones en el núcleo. En la Tabla 4.1 se entrega un resumen con el **peso atómico y número atómico** de distintos elementos.

El **peso molecular** de una molécula es simplemente la suma de los pesos atómicos de sus átomos constituyentes. De este modo, para un compuesto como el monóxido de carbono (CO) el peso molecular es igual a:

$$PM_{CO} = PA_C + PA_O = 12 \text{ g/mol} + 16 \text{ g/mol} = 28 \text{ g/mol} \quad (2)$$

Si dividimos la masa de una sustancia por su peso molecular, el resultado es la masa expresada en *moles*. El número de moles se calcula dividiendo la masa del compuesto por su peso molecular:

$$\text{Moles} = \frac{\text{Masa}}{\text{Peso Molecular}} \quad (3)$$

De acuerdo a nuestros conocimientos básicos de química recordemos que un mol de cualquier sustancia (en particular de un gas) contiene 6.022×10^{23} moléculas. Este número se conoce como el número de Avogadro. Un mol de cualquier sustancia gaseosa tiene un peso igual a su peso molecular, mientras que el volumen que ocupa es dependiente de la temperatura y de la presión. De esta manera, el volumen de un mol de gas se puede escribir como:

$$V_{T,P} = 22.4 \cdot \frac{T}{273} \cdot \frac{1}{p} \quad (\text{litro}) \quad (4)$$

donde T es la temperatura expresada en grados Kelvin y p es la presión atmosférica en atmósferas.

La expresión (4) permite escribir para el caso de una sustancia gaseosa la siguiente expresión para relacionar la concentración en MM con aquella expresada en MV.

$$(C_{MM})_{GAS} = (C_{MV})_{GAS} \cdot \frac{PM_{GAS}}{V_{T,P}} \quad (5)$$

Para el caso de un líquido se tiene:

$$(C_{MM})_{LIQUIDO} \approx (C_{MV})_{LIQUIDO} \quad (6)$$

Tabla 4.1
Símbolos y Pesos Atómicos (g/mol)

Elemento	Símbolo	Peso Atómico	Elemento	Símbolo	Peso Atómico
Actinio	Ac	227.03	Mercurio	Hg	200.59
Aluminio	Al	26.98	Molibdeno	Mo	95.94
Americio	Am	243.00	Neodimio	Nd	144.24
Antimonio	Sb	121.75	Neón	Ne	20.18
Argón	Ar	39.95	Neptunio	Np	237.05
Arsénico	As	74.92	Níquel	Ni	58.70
Astatino	At	210.00	Niobio	Nb	92.91
Bario	Ba	137.33	Nitrógeno	N	14.01
Berkelio	Bk	247.00	Nobelio	No	259.00
Berilio	Be	9.01	Osmio	Os	190.20
Bismuto	Bi	208.98	Oxígeno	O	16.00
Boro	B	10.81	Paladio	Pb	106.40
Bromo	Br	79.90	Fósforo	P	30.97
Cadmio	Cd	112.41	Platino	Pt	195.09
Calcio	Ca	40.08	Plutonio	Pu	244.00
Californio	Cf	251.00	Polonio	Po	209.00
Carbono	C	12.01	Potasio	K	39.09
Cerio	Ce	140.12	Praeseodimio	Pr	140.91
Cesio	Cs	132.90	Prometio	Pm	145.00
Cloro	Cl	35.45	Protactio	Pa	231.04
Cromo	Cr	51.99	Radio	Ra	226.03
Cobalto	Co	58.93	Radon	Rn	222.00
Cobre	Cu	63.55	Renio	Re	186.20
Curio	Cm	247.00	Rodio	Rh	102.91
Disprobio	Dy	162.50	Rubidio	Rb	85.45
Einsteinio	Es	254.00	Rutenio	Ru	101.07
Erbio	Er	167.26	Samario	Sm	150.40
Europio	Eu	151.96	Scandio	Sc	44.96
Fermio	Fm	257.00	Selenio	Se	78.96
Fluor	F	19.00	Silicon	Si	28.09
Francio	Fr	223.00	Plata	Ag	107.89
Gadolinio	Gd	157.25	Sodio	Na	22.99
Galio	Ga	69.72	Estroncio	Sr	87.62
Germanio	Ge	72.59	Sulfuro	S	32.06
Oro	Au	196.97	Tántalo	Ta	180.95
Hafnio	Hf	178.49	Tecneito	Tc	97.00
Helio	He	4.00	Telurio	Te	127.60
Holmio	Ho	164.93	Terbio	Tb	158.93
Hidrógeno	H	1.01	Talio	Tl	204.37
Indio	Ln	114.82	Torio	Th	232.04
Yodo	I	126.90	Tulio	Tm	168.93
Iridio	Lr	192.22	Estaño	Sn	118.69
Hierro	Fe	55.85	Titanio	Ti	47.90
Kripton	Kr	83.80	Tungsteno	W	183.85
Lantano	La	138.91	Uranio	U	238.03
Lawrencio	Lr	260.00	Vanadio	V	50.94
Plomo	Pb	207.20	Xenón	Xe	131.30
Litio	Li	6.94	Yterbio	Yb	173.04
Lutelio	Lu	174.97	Ytrio	Y	88.91
Magnesio	Mg	24.31	Zinc	Zn	65.38
Manganeso	Mn	54.94	Circonio	Zr	91.22
Mendelevio	Md	258.00			

5. NORMAS DE CALIDAD DE AGUA

Es un conjunto de valores que indican los requerimientos o exigencias mínimas referentes a la calidad del agua medida en términos de la concentración de determinados constituyentes presentes en ella. Dependiendo de su objetivo se tiene los siguientes tipos de normas:

- Norma de Calidad Ambiental
- Normas de Emisión
- Normas de Uso

5.1 Normas de Calidad Ambiental

5.1.1 Norma primaria de calidad ambiental

Es aquella norma que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población.

En la determinación de las normas primarias de calidad ambiental, se recopilarán los antecedentes y se encargará la preparación de los estudios o investigaciones científicas, epidemiológicas, clínicas, toxicológicas y otros que sean necesarios, para establecer los niveles de riesgo para la vida o salud de la población. En especial, estas investigaciones o estudios deberán:

- Identificar y caracterizar los elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos, o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda construir un riesgo para la vida o la salud de la población;
- Describir la distribución del contaminante en el país, identificando el nivel actual, natural o antropogénico, existente en los respectivos medios;
- Recopilar la información disponible acerca de los efectos adversos producidos por la exposición o carencia en la población, tanto desde el punto de vista epidemiológico como toxicológico, del elemento en estudio;
- Identificar las vías, fuentes, rutas, y medios de exposición o carencia;
- Describir los efectos independientes, aditivos, acumulativos, sinérgicos o inhibidores de los elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos, o combinación de ellos. En la elaboración de una norma primaria de calidad ambiental deberán considerarse, a lo menos, los siguientes criterios:
- La gravedad y la frecuencia del daño y de los efectos adversos observados;
- La cantidad de población expuesta;
- La localización, abundancia, persistencia y origen del contaminante en el medio ambiente;
- La transformación ambiental o alteraciones metabólicas secundarias del contaminante.

Toda norma primaria de calidad ambiental señalará los valores de las concentraciones y períodos máximos y mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos, o combinación de ellos. El cumplimiento de la norma primaria de calidad ambiental deberá verificarse mediante mediciones en donde existan asentamientos humanos o en los medios cuyo uso previsto afecte directa o indirectamente la salud de la población.

Toda norma primaria deberá señalar, al menos, los valores críticos que determinen las situaciones de emergencia ambiental; el plazo para su entrada en vigencia y los organismos públicos con competencia para fiscalizar su cumplimiento, en conformidad al artículo 64° de la ley 19.300. Asimismo, señalarán las metodologías de medición y control de la norma, las que corresponderán, en caso de existir, a aquellas elaboradas por el Instituto Nacional de Normalización y oficializadas por el Ministerio correspondiente mediante la dictación de un decreto supremo. En caso de no contar con una norma en cuestión. Lo establecido en este inciso, se aplicará también, tanto a las normas secundarias de calidad ambiental, como a las normas de emisión.

5.1.2 Norma secundaria de calidad ambiental

Es aquella norma que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o la conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza. En la determinación de las normas secundarias de calidad ambiental, se recopilarán los antecedentes y se encargará la preparación de estudios o investigaciones técnicas, científicas, toxicológicas y otras que sean necesarias para establecer los niveles de exposición o carencia para la protección o conservación del medio ambiente.

Para establecer las normas secundarias de calidad ambiental, deberán considerarse el sistema global del medio ambiente además de las especies y componentes del patrimonio ambiental que constituyan el sostén de poblaciones locales.

Además, se considerarán los antecedentes relativos a las condiciones de explotación de los recursos naturales renovables.

En la elaboración de una norma secundaria de calidad ambiental deberán considerarse, conjuntamente, los siguientes criterios:

- Alteración significativa del patrón de distribución geográfica de una especie de flora o fauna o de un determinado tipo de ecosistema nacional, especialmente de aquellos que sean únicos, escasos o representativos, que ponga en peligro su permanencia, capacidad de regeneración, evolución y desarrollo;
- Alteración significativa en la abundancia poblacional de una especie, subespecie de la flora o fauna,
- Alteración de los componentes ambientales que son materia de utilización por poblaciones locales, en especial plantas, animales, suelo y agua;
- Degradación significativa de monumentos nacionales, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico, y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural. Toda norma secundaria de calidad ambiental señalará los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos.

5.2 Normas de Emisión

Normas de Emisión son las que establecen la cantidad máxima permitida para un contaminante medida en el efluente de la fuente emisora. Las normas de emisión podrán utilizarse como instrumento de prevención de la contaminación o de sus efectos, o como instrumento de gestión ambiental insertas en un plan de Descontaminación o de Prevención.

La determinación de las normas de emisión de estudios que den cuenta de los siguientes aspectos:

- La concentración ambiental o distribución del contaminante en el área de aplicación de la norma, su metodología de medición y los resultados encontrados;
- La relación entre las emisiones del contaminante y la calidad ambiental;
- La capacidad de dilución y de autodepuración del medio receptor involucrado en la materia normada;
- Los efectos que produce el contaminante sobre la salud de las personas, la flora o la fauna u otros elementos del medio ambiente como, por ejemplo, áreas silvestres protegidas y monumentos;
- Las tecnologías aplicadas a cada caso y un análisis de la factibilidad técnica y económica de su implementación.

Toda norma de emisión contendrá las siguientes materias:

- la cantidad máxima permitida para un contaminante medida en el efluente de la fuente emisora;
- los objetivos de protección ambiental y resultados esperados con la aplicación de la norma;
- el ámbito territorial de su aplicación;
- los tipos de fuentes reguladas,
- los plazos y niveles programados para el cumplimiento de la norma.

5.3 Normas de Uso

En lo que respecta a la calidad del agua y del aire es posible indicar la existencia de normas, las cuales determinan límites máximos de concentración de distintos elementos para diferentes usos. La Tabla 5.1 muestra un ejemplo de norma de agua, la que corresponde a la norma de agua de riego NCh 1333.

Tabla 5.1
Norma Chilena de Agua para Riego

Parámetro	Unidad	NCh.1333 Of.78
pH	–	5,5–9,0
Aluminio	[mg/l]	5,00
Arsénico	[mg/l]	0,10 ⁽²⁾
Bario	[mg/l]	4,00 ⁽²⁾
Berilio	[mg/l]	0,10 ⁽²⁾
Boro	[mg/l]	0,75 ⁽²⁾
Cadmio	[mg/l]	0,010 ⁽²⁾
Cianuro	[mg/l]	0,20 ⁽²⁾
Cloruros	[mg/l]	200,00 ⁽²⁾
Cobalto	[mg/l]	0,050 ⁽²⁾
Cobre	[mg/l]	0,20 ⁽²⁾
Cromo	[mg/l]	0,10 ⁽²⁾
Fluoruro	[mg/l]	1,00 ⁽²⁾
Hierro	[mg/l]	5,00 ⁽²⁾
Litio	[mg/l]	2,50 ⁽²⁾
Litio (cítricos)	[mg/l]	0,075 ⁽²⁾
Manganeso	[mg/l]	0,20 ⁽²⁾
Mercurio	[mg/l]	0,001 ⁽²⁾
Molibdeno	[mg/l]	0,010 ⁽²⁾
Níquel	[mg/l]	0,20 ⁽²⁾
Plata	[mg/l]	0,20 ⁽²⁾
Plomo	[mg/l]	5,00 ⁽²⁾
Selenio	[mg/l]	0,020 ⁽²⁾
Sodio porcentual ⁽¹⁾	% de Na	35,00 ⁽²⁾
Sulfatos	[mg/l]	250,00 ⁽²⁾
Vanadio	[mg/l]	0,10 ⁽²⁾
Zinc	[mg/l]	2,00 ⁽²⁾
Conductividad específica	[μmhos/cm a 25°C]	< 750 ⁽³⁾
Sólidos disueltos totales	[mg/l a 105°C]	< 500 ⁽³⁾
Coliformes fecales	[NPM/ml]	1.000

(1) El sodio porcentual se calcula a partir de la fórmula: % de Na = $[Na/(Na+Ca+Mg+K)]$, las concentraciones en [meq/l].

(2) El *Ministerio de Obras Públicas* podrá autorizar valores mayores o menores de estos elementos.

(3) Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales, existen más clasificaciones.

Fuente: Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena Oficial 1333 Of. 78, modificada en 1987. "Requisitos de Calidad del Agua para Diferentes Usos". Segunda Edición, 1987, pp. 3–5.

6. ESTEQUIOMETRÍA

Cuando una reacción química es analizada provee información cualitativa y cuantitativa. En forma cualitativa podemos observar que elementos químicos están interactuando para producir que productos finales. En forma cuantitativa podemos determinar cuanto reactante y cuanto producto se requiere para llevar a cabo una reacción. El balance de las ecuaciones químicas para que cada tipo de átomo aparezca en un mismo número entre reactantes y productos se denomina *estequiometría*.

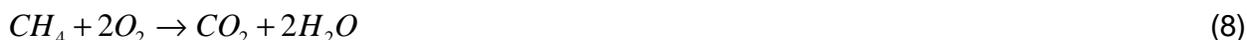
El primer paso en este análisis es definir, a partir del conocimiento de los reactantes y del proceso que se trata, los posibles productos finales. Una vez definidos los reactantes y productos se procede a balancear las ecuaciones. Por ejemplo, supongamos que deseamos investigar la combustión de metano (CH_4) el principal componente del gas natural. En el proceso de combustión el metano se mezcla con oxígeno para producir dióxido de carbono y agua, como lo muestra la siguiente reacción:



Esta ecuación no está balanceada ya que hay cuatro (4) átomos de hidrógeno en el lado izquierdo y sólo dos (2) en el lado derecho. La forma más simple de balancear este tipo de ecuaciones es siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Balancear todos los elementos excepto el agua y oxígeno.
2. Balancear los átomos de hidrógeno modificando las moléculas de agua.
3. Balancear los átomos de oxígeno modificando las moléculas de oxígeno gas (O_2).

Al seguir el procedimiento anterior obtenemos la siguiente ecuación balanceada:



Esta ecuación balanceada puede ser interpretada de la siguiente manera: Una molécula de metano reacciona con dos moléculas de oxígeno para producir una molécula de dióxido de carbono y dos moléculas de agua. Más útil que saber el número de moléculas que reaccionan es conocer la masa de cada elemento que actúa en esta reacción. Para esto debemos conocer algo más acerca de la masa de átomos individuales.

Finalmente, si dividimos el número de moles por el volumen de la solución obtenemos la concentración molar o molaridad ($1\text{ M} = 1\text{ mol/L}$). Volviendo al ejemplo del metano podemos escribir los pesos moleculares de los distintos elementos que participan en la reacción en la reacción:

$$\begin{array}{l} CH_4 = 12 + 4 \times 1 = 16 \text{ g/mol} \\ O_2 = 2 \times 16 = 32 \text{ g/mol} \\ CO_2 = 12 + 2 \times 16 = 44 \text{ g/mol} \\ H_2O = 2 \times 1 + 16 = 18 \text{ g/mol} \end{array}$$

En resumen tenemos tres formas distintas de expresar la oxidación del metano: número de moléculas, número de moles y gramos de producto.

EJEMPLO 1

Convirtiendo ppm a mg/m³ (aire).

El estándar federal de calidad del aire (EE.UU.) para monóxido de carbono (basado en mediciones cada 8 hr) es 9 ppm. Expresar este estándar en mg/m³ a 1 atm y 25°C.

EJEMPLO 2

Análisis de Nitrógeno.

Un análisis de nitrógeno de una muestra de agua servida arrojó los siguientes resultados:

- Amoníaco 30.0 mg/L como NH_3
- Nitrito 0.10 mg/L como NO_2^-
- Nitrato 1.50 mg/L como NO_3^-
- Nitrógeno orgánico (varias formas) 5.0 mg/L como N

Encontrar la concentración total de nitrógeno.

EJEMPLO 3

Combustión de Butano.

Determinar la masa de dióxido de carbono generada en la oxidación de 100 g de butano (C_4H_{10}). Los productos finales de la oxidación son agua y dióxido de carbono.

EJEMPLO 4

Demanda Teórica de Oxígeno.

Considere una solución 1.67×10^{-3} M de glucosa ($C_{12}H_6O_{12}$) que es completamente oxidada a CO_2 y agua. Balancee la ecuación química y determine la cantidad de oxígeno requerida para completar la reacción.

Si la composición química de una sustancia es conocida, entonces la cantidad de oxígeno requerida para oxidarla a dióxido de carbono y agua puede ser calculada usando estequiometría. Este requerimiento de oxígeno se denomina *demanda teórica de oxígeno (DTO)*. Si la oxidación se lleva a cabo mediante la acción de bacterias el requerimiento de oxígeno se denomina *demanda bioquímica de oxígeno (DBO)*. La *DBO* es algo menor que la *DTO* dado que parte del carbono originalmente presente en la muestra es usado para síntesis (creación) de nuevas bacterias y no es oxidado a dióxido de carbono.

EJEMPLO 5

Demanda Teórica de Oxígeno para Células de Bacterias.

Determine la Demanda Teórica de Oxígeno para la descomposición de 1 g de células de bacterias. Suponga que las células se pueden representar por la ecuación química ($C_5H_7NO_2$) y que el nitrógeno orgánico se descompone a amoníaco, NH_3 .

EJEMPLO 6

Descomposición de Algas

La descomposición o degradación de algas contribuye en forma importante a acelerar la eutroficación de cuerpos de agua tales como lagos o lagunas. Este proceso de descomposición se produce en dos etapas secuenciales. En la primera etapa, fase carbonácea, las algas son convertidas en dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y amoníaco (NH_3). En la segunda etapa, fase nitrogenada, el amoníaco es convertido en ácido nítrico (HNO_3). Como resultado de estas dos etapas las algas consumen una cantidad total de oxígeno, la que se denomina demanda total de oxígeno (carbonácea más nitrogenada).

- Si las algas se pueden representar mediante la fórmula química $C_6H_{15}O_6N$, determine las reacciones químicas, balanceadas, que describen cada etapa del proceso de oxidación.
- Calcule la cantidad total de oxígeno (fase carbonácea más nitrogenada) necesaria para descomponer 100 mg/L de algas. Expresar esta cantidad en mg/L, mol/L y ppm.
- Si luego del segundo proceso de descomposición (fase nitrogenada) el ácido nítrico HNO_3 , se disocia según una reacción ácido-base, ¿Qué ocurre con el pH en el lago? Sube, baja, se mantiene. Justifique su respuesta. Nota: Considere que el pH del lago es inicialmente neutro.

EJEMPLO 7

Descomposición de Etanol Derramado en Río

Etanol (C_2H_5OH) es derramado en forma accidental en un río, donde es degradado por la acción de microbios. Si los productos de descomposición son el dióxido de carbono (CO_2) y agua:

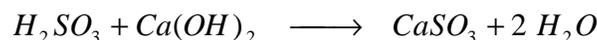
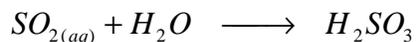
- Escriba la reacción química que describe este proceso.
- ¿Cuántos kilogramos de oxígeno son consumidos en este proceso si 500 Kg de etanol fueron derramados? ¿Cuántos kilogramos de CO_2 son producidos?

EJEMPLO 7

Emisiones a la Atmósfera

Como un Ingeniero del Servicio de Salud del Ambiente le corresponde controlar una industria con el propósito de reducir el efecto de sus emisiones contaminantes sobre el medio ambiente. Este objetivo se logra al neutralizar el dióxido de sulfuro (SO_2) producido en las labores de fundición de plomo zinc. La remoción del dióxido de sulfuro se logra mediante un proceso que combina un filtro húmedo y el uso de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) para transformar el SO_2 en un producto más controlable, sulfito de calcio ($CaSO_3$)

- Basados en las siguientes reacciones químicas, ¿Cuántos kilogramos de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) son necesarios para neutralizar los 120 Kg de SO_2 producidos cada día?



- b) Calcular los kilogramos de H_2SO_3 producidos después de usar el filtro de agua, en la primera etapa del tratamiento.
- c) ¿Cuántos litros de una solución 2M de $Ca(OH)_2$ son necesarios para neutralizar el SO_2 ?

Nota: Una solución 2M de $Ca(OH)_2$ contiene 2 moles de $Ca(OH)_2$ por litro de solución.

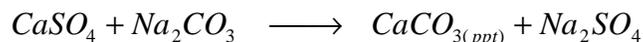
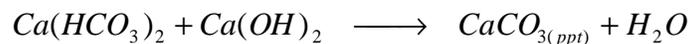
EJEMPLO 8

Análisis Químico para Tratamiento de Aguas

A partir del análisis de una muestra de agua se determinó que contiene los siguientes elementos:

Dióxido de carbono (CO_2)	8.8 mg/L
Bicarbonato de calcio ($Ca(HCO_3)_2$)	186.3 mg/L
Sulfato de calcio ($CaSO_4$)	81.6 mg/L

Como parte de un proceso de tratamiento de esta agua se utiliza hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) para precipitar el dióxido de carbono (CO_2) y el bicarbonato de calcio ($Ca(HCO_3)_2$), mientras que carbonato de sodio (Na_2CO_3) se usa para precipitar el sulfato de calcio ($CaSO_4$). La remoción de estos elementos se lleva a cabo de acuerdo a las siguientes reacciones químicas:



- a) Calcular las masas de $Ca(OH)_2$ y Na_2CO_3 necesarias para ablandar (remover el calcio) presente en 1 litro de solución.
- b) Determinar la cantidad total de $CaCO_{3(ppt)}$ precipitada como resultado de este proceso de ablandamiento.
- c) ¿Qué porcentaje de $CaCO_{3(ppt)}$ (en peso) es producido en cada etapa del proceso de ablandamiento?

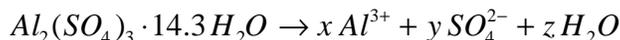
EJEMPLO 9

Proceso de Coagulación

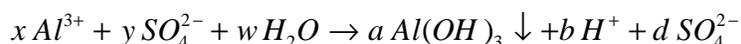
Una de las fases principales del proceso de tratamiento para producir agua potable es la denominada *coagulación*. Durante esta fase se procede a agregar sustancias químicas al agua para eliminar las cargas eléctricas de los coloides (material en suspensión), y permitir que éstos se junten entre ellos y generen elementos de mayor tamaño (*flocs*) que puedan sedimentar por su propio peso.

Uno de los principales elementos químicos que se utiliza para llevar a cabo este proceso de coagulación es el sulfato de aluminio hidratado ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14.3H_2O$). Este proceso consta de al menos tres fases que se describen a continuación:

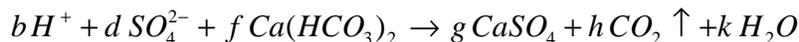
1. El sulfato de aluminio se ioniza en agua produciendo Al^{3+} y SO_4^{2-} :



2. La mayor parte del Al^{3+} se combina con iones hidróxido, OH^- , para formar un compuesto denominado hidróxido de aluminio ($Al(OH)_3$) que sedimenta y arrastra los coloides hacia el fondo de la unidad de sedimentación:



3. El exceso de iones hidrógeno (H^+) tiende a disminuir el pH de la solución (aumenta la concentración de los iones hidrógeno presentes en la solución) lo que es perjudicial para el proceso de coagulación en su conjunto. Para evitar esta situación se incorpora bicarbonato de calcio ($Ca(HCO_3)_2$) para controlar el pH de la solución:



A partir de la información anterior se pide:

- a) Determinar las constantes estequiométricas $x, y, z, w, a, b, d, f, g, h$ y k .
- b) Desarrollar una ecuación que describa el proceso de coagulación en su totalidad.
- c) Si se utilizan 600 mg/L de sulfato de aluminio para el tratamiento de un tipo de agua específico, ¿Cuántos mg/L de $Al(OH)_3$ sedimentan?, ¿Qué volumen de $Al(OH)_3$ sedimenta cada día si se está tratando un caudal de 50 l/s? Considere una temperatura de 25°C y una presión atmosférica de 0.9 atmósferas.
- d) Si se utilizan 600 mg/L de sulfato de aluminio para el tratamiento de un tipo de agua específico, ¿Cuántos mg/L de H^+ se producen durante el tratamiento? ¿Qué cantidad de $Ca(HCO_3)_2$ se requiere para neutralizar la disminución de pH causada durante la coagulación?

REFERENCIAS

Wilcox, L.V. Classification and use of irrigation Waters. U.S. Dept. Agric. Circ. 969. Washington, D.C., 19 pp. 1955.

APHA. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Ed. APHA, AWWA, WEF.

OMS. 1977. Vigilancia de la calidad del agua potable. Serie de Monografías N° 63, Ginebra.

OMS. 1995. Guías para la calidad del agua potable. 2ª edición. Volumen 1. Recomendaciones. Ginebra.

US EPA 1973. Manual of Current Practices in Water Microbiology.

USEPA. Manual of Chemical Methods for Pesticides and Devices. 2nd Edition
Universidad del Valle. Curso Internacional sobre Técnicas Analíticas de Manejo de Muestras Ambientales. Santiago de Cali. Septiembre 2-7 de 1996.

US Environmental Protection Agency. Estándares del Reglamento Nacional Primario de Agua Potable. EPA 815-F-00-007, 2000.

Centro Regional de Ayuda Técnica. Agencia para el Desarrollo Internacional. Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos. Manual de Agricultura N°60.

Kirchmer C. Manual de Curso Química, Microbiología e Ingeniería Sanitaria. "Recursos de Agua: Fuentes, contaminación, criterios y normas de calidad". Depto. Obras Civiles. U. de Chile, 1973.

Sancha A.M. Manual del Curso "Calidad Química, Control Microbiológico y Desinfección del Agua Potable. Depto. Obras Civiles. U. de Chile, 1977.

Edward E. Johnson, Inc. "Ground Water and Wells". 1st edition 1966.

David K. Todd "Ground Water Hydrology" Willey.

Universidad Central de Venezuela "Desarrollo de Aguas Subterráneas". Caracas 1970.

Hem H.D. "Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water" Geological Survey Water-Supply Paper 1473.

Edward E. Johnson, Inc. "Ground Water and Wells". 1st edition 1966.

Todd, D. "Groundwater Hydrology". Wiley.

Universidad Central de Venezuela. "Desarrollo de Aguas Subterráneas. Caracas 1967.

<http://www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T0234E00.HTM>