

OTROS TÍTULOS DE EDITORIAL CORHUILA

Pensar la región

Ensayos de historia económica, social y cultural del Huila

Bernardo Tovar Zambrano

Caracterización de las apuestas productivas y perfiles ocupacionales en el sector piscícola del Huila

Varios autores

Congreso internacional de turismo sostenible

Varios autores

Geografía económica colombiana

Felix Erney Monje Penha
Hugo Ibsen Zambrano Solarte

Perspectivas Turísticas del Huila

Varios autores

Manual de prácticas de campo y laboratorio

Santiago Gutiérrez Quintero

Reflexiones académicas desde la proyección social en Corhuila

Varios autores

Saberes emergentes para la cuarta revolución industrial

Varios autores

Hoy en día es una necesidad introducir aspectos ambientales en los diversos programas académicos como estrategia de sensibilización que anime al estudiante a la exploración de la riqueza natural. Este libro, por su naturaleza pedagógica y su propósito didáctico, no pretende ser un compendio de todas las posibles aplicaciones de la química ambiental a las diferentes disciplinas convergentes en el área de las ingenierías; dicha ambición lo volvería interminable. Sí le interesa, por su amplitud teórica y claridad metodológica, explorar algunos conceptos básicos que le serán muy útiles al estudiante para su formación profesional. Estos saberes esenciales, llevarán al iniciado en química ambiental a la búsqueda autónoma y espontánea de libros especializados que ampliarán el fascinante firmamento científico de la química.



HANS THIELIN CASTRO SALAZAR

Química Ambiental Básica



Química Ambiental Básica

HANS THIELIN CASTRO SALAZAR

Hans Thielin Castro Salazar

Es químico y doctor en química egresado de la Universidad Industrial de Santander. Desde el año 2013 se desempeña como docente investigador de tiempo completo en la Corporación Universitaria del Huila, Corhuila, institución en la que se ha consagrado como estudioso del aprovechamiento de los residuos y subproductos de la actividad agrícola, el análisis biológico y ambiental y la caracterización de hidrocarburos. Ha sido docente de diferentes cursos de química en la Universidad Industrial de Santander, Universidad Santo Tomás, Universidad de Santander, Universidad Francisco de Paula Santander y la Universidad Surcolombiana. Ha participado en diferentes congresos de química ambiental y publicado en diferentes revistas nacionales e internacionales, lo que han convertido sus artículos en fuentes de permanente consulta para los investigadores en las áreas de Biopolímeros, Silvicultura e Ingeniería Geológica y Ambiental.

Química Ambiental Básica

Química Ambiental Básica

Hans Thielin Castro Salazar



Química Ambiental Básica

© Hans Thielin Castro Salazar

© Editorial Corporación Universitaria del Huila (CORHUILA), 2021

ISBN: 978-958-52203-8-6

Primera edición: Neiva, Colombia, marzo 2021

Coordinador editorial: Marcos Fabián Herrera

Imágenes y fotografías: Sebastián Perdomo, Comunicaciones CORHUILA

Diagramación y diseño carátula: Luz Mery Avendaño

Impresión: Editorial Gente Nueva

Editorial Corporación Universitaria del Huila (CORHUILA)

Calle 21 N° 6 - 01 Barrio Quininal

Neiva - Huila - Colombia

Teléfono (8) 8754220

Impreso y hecho en Colombia

Printed and made in Colombia

Se autoriza la reproducción total o parcial de la obra para fines educativos siempre y cuando se cite la fuente.

Si tiene observaciones que puedan enriquecer los planteamientos conceptuales formulados en este libro, puede escribir al correo electrónico: hans.castro@corhuila.edu.co.



Contenido

Prólogo	7
----------------------	---

Capítulo 1

¿Qué es química ambiental?

1.1	Introducción.....	9
1.2	Ciclo hidrológico y ciclos biogeoquímicos	11
1.2.1	El ciclo hidrológico	11
1.2.2	El ciclo de carbono	13
1.2.3	El ciclo de nitrógeno	15
1.2.4	El ciclo de oxígeno	17
1.2.5	El ciclo de fósforo.....	18
1.2.6	El ciclo de azufre	20
1.3	Propósitos de la química sostenible o química verde.....	21
1.4	Huella de carbono.....	22
	Lectura adicional.....	23
	Literatura citada	26

Capítulo 2

Hidrosfera

2.1	Generalidades.....	29
2.2	Características y propiedades físicas del agua	29
2.3	Fuentes naturales de agua	34
2.3.1	Mares y océanos	34
2.3.2	Glaciares	34
2.3.3	Aguas subterráneas	35
2.3.4	Ríos, quebradas y riachuelos.....	36
2.3.5	Páramos.....	37
2.3.6	Humedales	38
2.4	Tratamiento de agua potable y agua residual	40
2.5	Contaminantes del agua y parámetros de calidad del agua	42
2.6	Métodos de análisis de parámetros de calidad.....	44
2.6.1	Sólidos totales	44

2.6.2	pH, conductividad eléctrica y dureza.....	45
2.6.3	Turbidez	47
2.6.4	Demanda de oxígeno	48
2.6.5	Análisis de nitrógeno	49
2.6.6	Análisis de fósforo soluble	51
2.6.7	Análisis de contaminantes orgánicos usando cromatografía	52
2.6.8	Análisis de metales pesados usando espectroscopia de absor- ción de llama	53
	Literatura citada	57

Capítulo 3

Suelo

3.1	Las capas de la geósfera	61
3.2	Características, origen y tipos de suelo	62
3.3	Meteorización o intemperismo	65
3.4	Tipos de suelo.....	67
3.5	Macronutrientes y micronutrientes.....	71
3.6	Fertilizantes.....	73
3.7	Plaguicidas.....	74
3.8	Ingeniería genética y productos transgénicos.....	76
3.9	Agricultura sostenible	77
3.10	Monocultivos.....	79
3.11	Fracturación hidráulica o <i>Fracking</i>	81
3.12	Minería	82
3.13	Contaminantes del suelo.....	84
3.14	Métodos de análisis de parámetros de calidad de suelo.....	85
	Literatura citada	88

Capítulo 4

Atmósfera

4.1	Generalidades.....	91
4.2	La capa de ozono (estratósfera)	94
4.3	Efecto de invernadero y calentamiento global	96
4.4	Lluvia ácida	98
4.5	Ozono troposférico	100
4.6	Smog fotoquímico.....	102
4.7	Contaminantes y análisis de aire	103
	Literatura citada	106

Prólogo

Este libro de química ambiental básica está escrito como una introducción a tópicos de interés para un estudiante de diferentes ingenierías, especialmente la de ingeniería ambiental. Hoy en día, es una necesidad introducir aspectos ambientales en los diversos programas académicos como una estrategia de sensibilización del ambiente. El libro no pretende ser un compendio de todas las posibles aplicaciones de la química ambiental a las diferentes disciplinas de ingenierías porque se volvería interminable; pero sí le interesa explorar algunos conceptos básicos que le serán muy útiles al estudiante para su formación profesional, y que le permita leer libros especializados en el tema con mayor claridad.

El libro comprende tres esferas del medio ambiente: la hidrósfera, geósfera y la atmósfera descritos en cuatro capítulos:

El capítulo 1 describe una introducción a la química ambiental, química verde y a los ciclos biogeoquímicos. El capítulo 2 trata sobre la hidrósfera, describe las características y propiedades del agua, los contaminantes y las fuentes de contaminación; y el análisis y calidad de agua. El capítulo 3 trata sobre la geósfera, donde se describen las capas de la geósfera, su importancia, los contaminantes y su transporte, procesos físicos y químicos de interés y algunos métodos de análisis; y por último, el capítulo cuatro, describe la importancia de la atmósfera, plantea algunas reacciones fotoquímicas para entender el efecto invernadero y el calentamiento global, la formación del ozono estratosférico y troposférico, el smog fotoquímico y la lluvia ácida.

El autor

Capítulo 1

¿Qué es química ambiental?

1.1 Introducción

La **química ambiental** está relacionada con la idea de la **Ciencia química sostenible**, que comprende el estudio de las fuentes naturales, las reacciones involucradas y los efectos o destinos de las especies químicas en cada componente de la naturaleza (agua, aire o suelo) y en los ambientes vivos, el transporte de elementos químicos; así como los consiguientes efectos de la tecnología sobre ellos. El estudio de la química ambiental también incluye los orígenes de los elementos y sus transformaciones a través de las diferentes eras geológicas, la industrial y la tecnológica. En la era **carbonífera**, hace 350 millones de años, la atmósfera tenía casi que el doble de oxígeno que en la actualidad. Este exceso de oxígeno era originado por un nuevo tipo de vida: los árboles. La evolución de la **lignina** hizo posible que los árboles crecieran muy alto en este período, con una consecuencia adicional: cada vez que los árboles morían terminaban acumulándose en el suelo debido a que no existían los microorganismos adecuados para degradar la lignina (ni tampoco habían evolucionado las termitas), dando origen a lo que hoy conocemos como **carbón** mineral. El hecho que los árboles no se descompusieran hacía que se liberara más oxígeno en la atmósfera y disminuyeran las cantidades de dióxido de carbono que terminaban formando el carbón mineral. Millones de años más tarde, después de un cataclismo mundial que sepultó millones de organismos acuáticos (plantas y animales), se dio origen a lo que se conoce hoy en día como: **petróleo**.

El carbón, petróleo y minerales que han tardado años en formarse se conocen como **recursos No renovables**. La explotación **antropogénica**

(realizada por el hombre) de cualquiera de estos recursos, altera las concentraciones de elementos que estén involucrados en cada componente de la naturaleza. Así por ejemplo la explotación de carbón y petróleo (así como sus derivados) incide significativamente en el aumento de CO₂ en la atmósfera. Por tal razón, es importante estudiar las diferentes relaciones que tienen los elementos y sus derivados con su origen antropogénico o natural.

Cada elemento de los componentes de la naturaleza está interrelacionado uno con otro (ver Figura 1.1). Estas relaciones **biunívocas** incluyen cada cambio físico o químico que presenta un elemento entre dos componentes. Por ejemplo, el carbono presente en el petróleo se quema para formar dióxido de carbono y agua; a su vez, el dióxido de carbono reacciona con agua en el proceso de la fotosíntesis para producir oxígeno. Estos cambios se pueden presentar entre dos componentes de la naturaleza en ambos sentidos y aplica para cualquier o cualesquiera de las características a analizar. Para entender cada detalle de los procesos que sufren los elementos en la naturaleza, es necesario conocer el ciclo hidrológico y los **ciclos biogeoquímicos**.

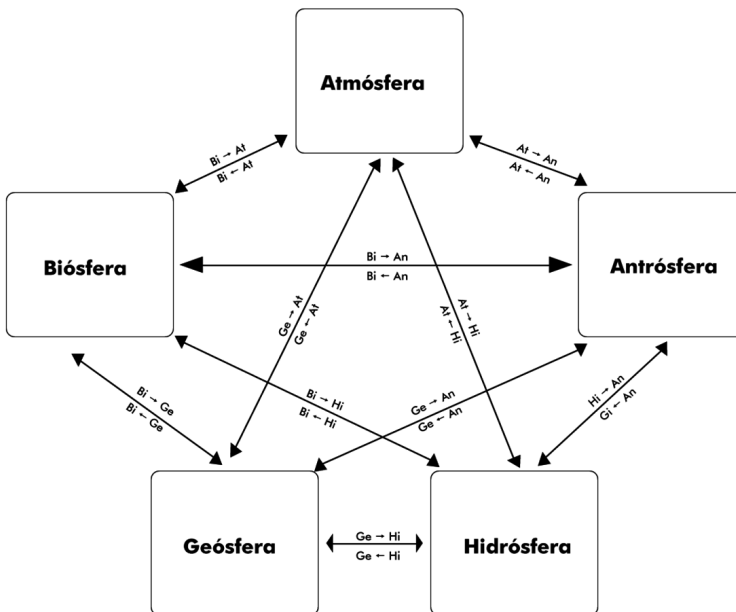


Figura 1.1 Relaciones biunívocas entre cada componente de la naturaleza. Fuente propia.



Investiga:

- ¿Qué entidades gubernamentales y no gubernamentales protegen el medio ambiente en tu región?
- ¿Por qué cuando morían los árboles no se degradaban en la era carbonífera?

1.2 Ciclo hidrológico y ciclos biogeoquímicos

Los **ciclos biogeoquímicos** permiten la transformación de la materia de una forma a otra, utilizando la materia en una forma específica de organismos particulares. Por ejemplo, los humanos utilizan agua en forma líquida; pero a través del ciclo hidrológico (proceso característico del agua que incluye sus propiedades físicas y químicas), el vapor de agua se condensa en líquido y el hielo se convierte en agua líquida. El nitrógeno, a pesar de su abundancia en la atmósfera, es a menudo el nutriente más limitante para el crecimiento de las plantas acuáticas. Este problema se produce porque la mayoría de las plantas solo pueden absorber nitrógeno en dos formas sólidas: el ion amonio (NH_4^+) y el nitrato iónico (NO_3^-). Por lo tanto, los ciclos biogeoquímicos permiten la provisión de elementos a los organismos en formas utilizables. Cada elemento presente en la naturaleza puede presentar diferentes procesos químicos y físicos en el agua, suelo y aire. Un proceso puede ser **endógeno** cuando el elemento se encuentra en el suelo y el agua y **exógeno** cuando se encuentra en los tres componentes (agua, aire y suelo). Los ciclos biogeoquímicos regulan el flujo de elementos o sustancias, a través de un flujo entre las diferentes esferas en un medio particular y a diferentes velocidades determinadas por la viscosidad y la densidad del medio. Esto explica el por qué el agua contaminada no se recupera rápidamente.

1.2.1 El ciclo hidrológico

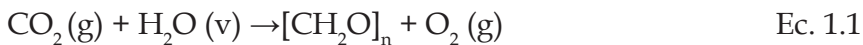
El agua puede presentar diferentes cambios físicos y químicos en los tres componentes de la naturaleza (agua, suelo y aire) (ver Figura 1.2). Un proceso físico muy conocido es el de la **condensación** del vapor de agua en forma de nubes, que se presenta cuando el agua que se encuentra en los ríos, mares y océanos se evapora ($\text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightarrow \text{H}_2\text{O} (\text{v})$). Las nubes

se vuelven “pesadas” hasta que precipitan en forma de lluvia hasta el suelo. Si la temperatura de la atmósfera es demasiado fría ($T \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$), la **precipitación** será en forma de nieve. Al proceso por el cual las plantas y los animales eliminan agua se le conoce como **transpiración**.

Las plantas, algas y bacterias fotosintéticas utilizan vapor de agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2) gaseoso para su manutención y crecimiento, liberando oxígeno gaseoso (O_2). Este proceso químico, conocido como **fotosíntesis**, convierte entre 300 – 500 millardos de toneladas de CO_2 por año en azúcares necesarios para la vida. Actualmente, se cree que este proceso fotosintético se originó hace 2500 millones de años atrás, por los ancestros de las cianobacterias, y se estima que se necesitan 2880 kJ de energía para formar un mol de azúcar ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). La fotosíntesis incluye una serie de reacciones fotofísicas, químicas y fotoquímicas que involucran sofisticados complejos proteicos, transportadores de energía y enzimas- algunas dependientes de la radiación electromagnética y otras independientes. Un resumen de la reacción de fotosíntesis se presenta en la Ec. 1.1. Algunos ingenieros han tratado de simular este proceso de reducción de CO_2 usando, principalmente, fotocatalizadores de TiO_2 ; y a pesar, de los buenos resultados, la fotosíntesis natural sigue siendo el proceso energéticamente más eficiente.

En las noches, las plantas presentan un proceso similar a la respiración animal, conocido como **respiración vegetal**. Este es un proceso que libera grandes cantidades de CO_2 a la atmósfera, a nivel global se ha calculado que las plantas terrestres liberan como producto de la respiración aproximadamente 60 gigatoneladas de carbono por año a la atmósfera. A pesar de lo anterior, la concentración molar del dióxido de carbono gaseoso producido no es equivalente al usado en la fotosíntesis. Un resumen de esta reacción se presenta en la ecuación 1.2.

Fotosíntesis:



Respiración vegetal:



La importancia de cuidar el agua también consiste en proteger su ciclo hidrológico. Así que cualquier sustancia externa termina siendo

un contaminante, ya que participará mediante diferentes procesos físicos (transporte y sedimentación) o químicos (oxidación y combustión) transformando el agua, y en consecuencia, alterando el ciclo.

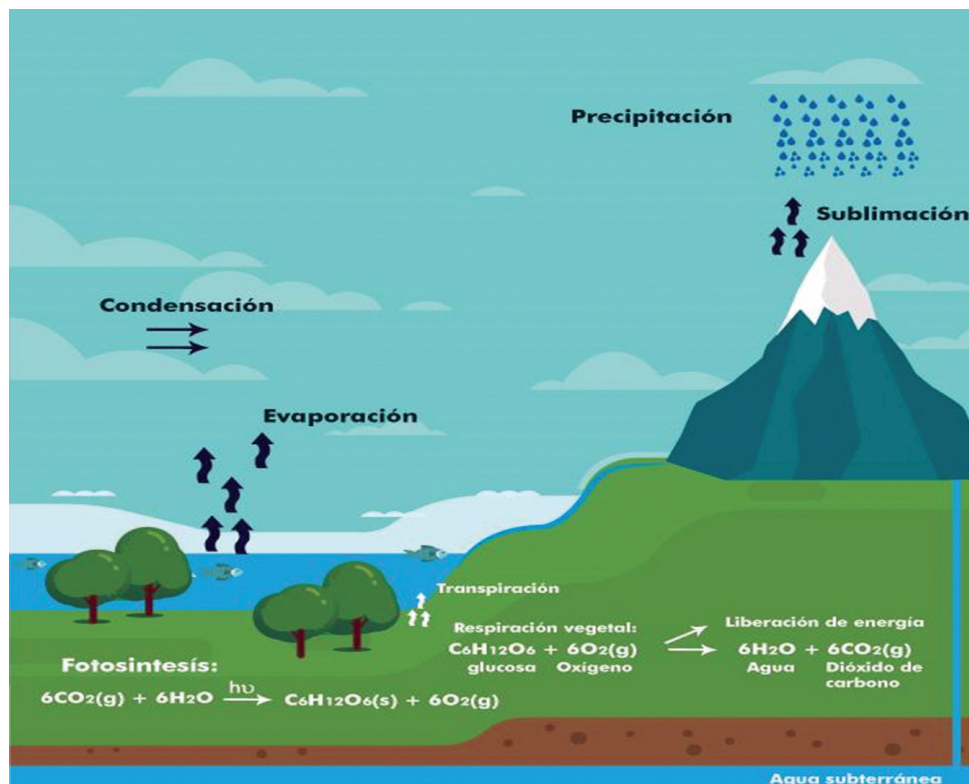


Figura 1.2. El ciclo del agua. Tomado y adaptado de S. E. Manahan. Introducción a la Química Ambiental. Madrid: Editorial Reverté, 2011, pp. 725.

1.2.2 El ciclo de carbono

El carbono es quizás uno de los elementos más estudiados en la naturaleza y que participa en una gran cantidad de procesos químicos y físicos en la naturaleza (ver Figura 1.3). Es un proceso exógeno, ya que encontramos compuestos gaseosos de carbono (CO_2 , CH_4), en el agua (CO_3^{2-} , CO_2) y en el suelo (carbón, CO_3^{2-}). El dióxido de carbono gaseoso presente en la naturaleza reacciona con el agua y forma una gran cantidad de azúcares (carbohidratos) de interés para las plantas, que luego participarán en la síntesis de moléculas más grandes o **macromoléculas** (proteínas, lípidos, ácidos nucleicos y polisacáridos). El dióxido de car-

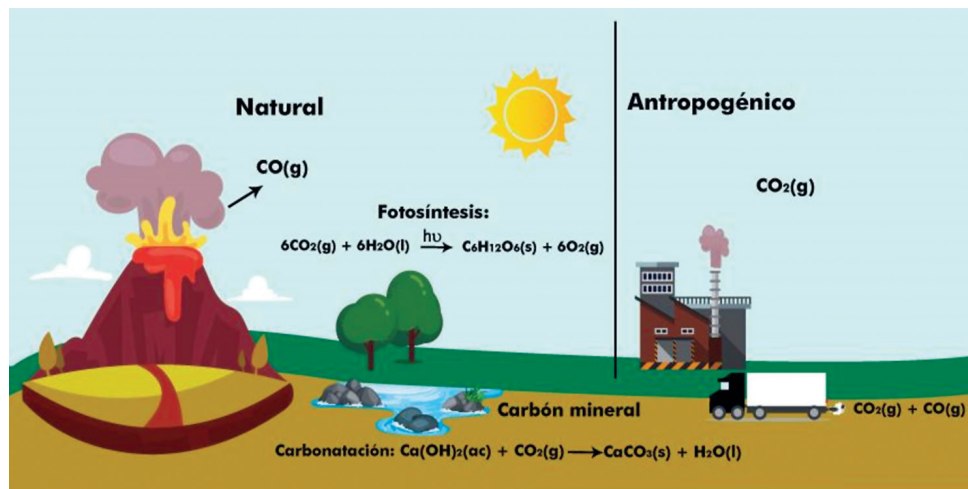


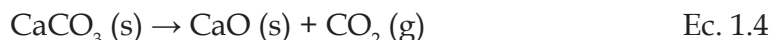
Figura 1.3. El ciclo de carbono. Tomado y adaptado de S. E. Manahan. Introducción a la Química Ambiental. Madrid: Editorial Reverté, 2011, pp. 725.

bono presente en el agua o en el suelo puede reaccionar con hidróxidos metálicos, tales como hidróxidos de calcio, de sodio y de magnesio para formar carbonatos. Este proceso se conoce como **carbonatación** (ver ecuación 1.3). El proceso inverso, donde se quema el carbonato, formando óxido de calcio (cal viva) y liberando dióxido de carbono gaseoso se conoce como **calcinación** (ver ecuación 1.4). Éste último proceso es el primer paso en la preparación del *clinker*, un material de construcción, por lo que esta actividad se considera como contaminante y el producto como un material no sostenible. Este proceso de descarbonatación de la roca caliza representa entre el 50-60 % de las emisiones de dióxido de carbono de todo el proceso de obtención del cemento.

Carbonatación:



Calcinación:



El metano, CH_4 , es un gas, producto de la digestión anaerobia presente en los animales rumiantes, tales como reces y caballos (ver ecuación 1.5). El CH_4 es el segundo gas, detrás del dióxido de carbono, con mayor incidencia en el **calentamiento global** (ver detalles en capítulo 4). Esto im-

plica que 1 kg de CH₄ atrapa 21 veces más radiación infrarroja que 1 kg de CO₂. A nivel global se estima, que la ganadería extensiva contribuye, al menos, con el 37 % de las concentraciones de metano en la atmósfera. Alternativas como la quema de este combustible, usado como gas domiciliario, se ha planteado para el uso de las heces de ganado y porcino en diferentes partes del país, aunque las dificultades en la recolección de las heces han hecho que el tratamiento de heces de porcinos sea más popular.

Digestión anaerobia:



La cantidad de compuestos de carbono que se encuentran en la naturaleza están en constante cambio: mientras unos se han formado durante años, otros requieren de menos tiempo. Algunos ejemplos de compuestos de carbono que se encuentran en la naturaleza se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1

Compuestos de carbono de origen natural y antropogénico presente en los tres componentes de la naturaleza

Componente de la Naturaleza	Compuestos de carbono de origen natural	Compuestos de carbono de origen antropogénico
Atmósfera	CO ₂ (g), CO (g), CH ₄ (g)	CO ₂ (g), CO (g), CH ₄ (g)*, Compuestos orgánicos volátiles (COV's), etc.
Suelo	Carbonatos (CO ₃ ⁻²), Carbon mineral (C), petróleo, grafito, diamante, etc.	Hidrocarburos, gasolina, plásticos, pinturas, etc.
Agua	CO ₂ (g), Carbohidratos, proteínas, lípidos, etc.	Hidrocarburos, bifenilos policlorados, compuestos aromáticos, halometanos, etc.

Fuente propia.

*Aunque el metano se forma biogénicamente, la ganadería extensiva propuesta por el hombre ha hecho que aumente considerablemente su concentración en la atmósfera.

1.2.3 El ciclo de nitrógeno

El ciclo de nitrógeno es exógeno, ya que encontramos compuestos nitrogenados en la atmósfera (NO₃⁻, N₂, NH₄⁺, N₂O) y en el agua y suelo como

iones de amonio (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-) (ver Figura 1.4). Los principales procesos microbianos descritos en la producción de N_2O corresponden a la **nitrificación** (Ecuación 1.6) y la **desnitrificación** (Ecuación 1.7). La desnitrificación heterótrofa es un proceso de respiración anaeróbica (sin presencia de oxígeno) de la materia orgánica, donde los aceptores de electrones corresponden a NO_3^- , NO_2^- , NO y N_2O . Si la desnitrificación es completa, se produce N_2 ; mientras que, si la desnitrificación es parcial, la reacción finaliza en el N_2O . La nitrificación es la reacción inversa para la producción de los iones de NO_3^- , NO_2^- y NO . Finalmente, la fijación biológica de nitrógeno (Ecuación 1.8) en el suelo (necesaria para el crecimiento de las plantas) se le conoce a la reducción de nitrógeno gaseoso (N_2) a partir de microorganismos **diazótrofos** o algunas especies vegetales (leguminosas y algunas leñosas no leguminosas).

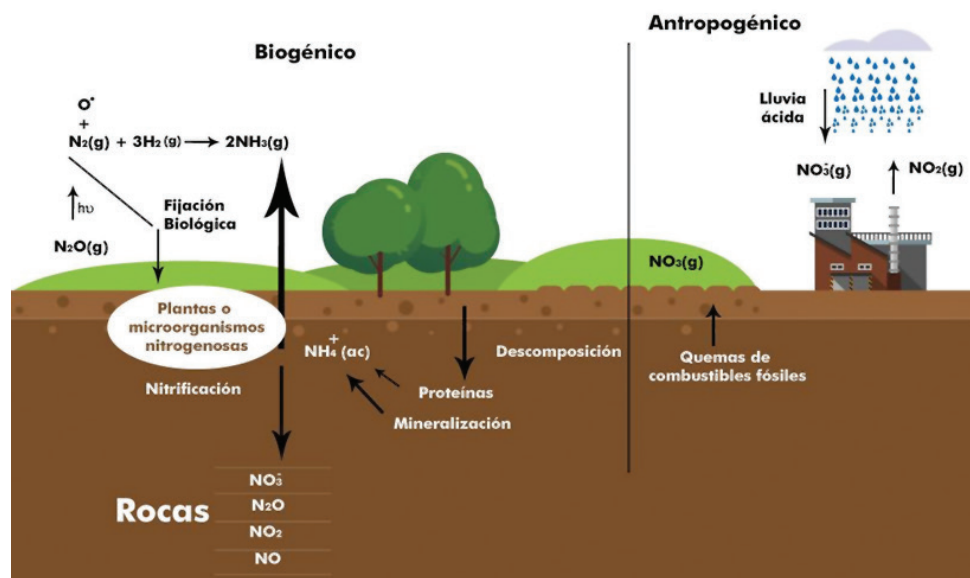
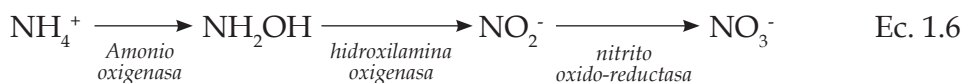


Figura 1.4. El ciclo de nitrógeno. Tomado y adaptado de S. E. Manahan. Introducción a la Química Ambiental. Madrid: Editorial Reverté, 2011, pp. 725.

Nitrificación:



Desnitrificación:



Fijación de nitrógeno:



1.2.4 El ciclo de oxígeno

El oxígeno es uno de los principales componentes de los minerales de silicato y, como resultado, compone una fracción significativa de los mantos y costras de los planetas terrestres. En el suelo, el oxígeno ha reaccionado durante millones de años con diversos metales para formar óxidos de metales (Fe_2O , Al_2O_3 , Fe_2CO_3 , CaO) que hacen partes de diferentes minerales. A pesar de que estos minerales participan en el ciclo de oxígeno (ver Figura 1.5), su explotación no ha incidido significativamente en la proporción del oxígeno en el aire. El oxígeno también es un componente estable de muchos gases y líquidos que pueden estar presentes en el planeta, incluyendo oxígeno molecular (O_2), dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y ozono (O_3), y es un componente importante de la atmósfera, criósfera e hidrósfera del planeta. El oxígeno hace parte de diferentes procesos biológicos, tales como la respiración de animales

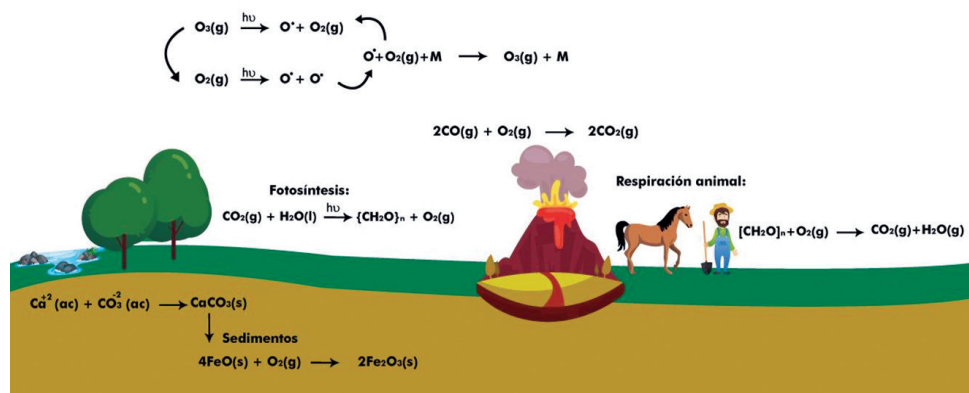
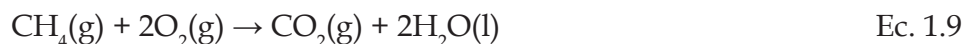


Figura 1.5. El ciclo de oxígeno. Tomado y adaptado de S. E. Manahan. Introducción a la Química Ambiental. Madrid: Editorial Reverté, 2011, pp. 725.

y plantas, la fotosíntesis y la descomposición de la materia orgánica. Mayores detalles de la interacción del oxígeno en el aire se verán en el capítulo 4. El hombre también usa el oxígeno en todos los procesos de quema de combustibles fósiles, como por ejemplo en la combustión de metano (Ver ecuación 1.9).



1.2.5 El ciclo de fósforo

El fósforo (P) está presente en cantidades mínimas en la corteza terrestre (0.09% en peso) y es el nutriente limitante en el crecimiento de plantas y animales. Una vez que el P se libera de los minerales durante la meteorización, se secuestra rápidamente en varias fases más **recalcitrantes**, lo que limita su accesibilidad diaria a las plantas y organismos. El fósforo no tiene fases gaseosas atmosféricas estables (**endógeno**), así que, a diferencia del caso de otros bionutrientes críticos, como el nitrógeno y el carbono, los ecosistemas tienen que depender de la transferencia acuosa de este nutriente (ver Figura 1.6). Las únicas excepciones son los ecosistemas empobrecidos en P, donde se debe adicionar fósforo si su fin

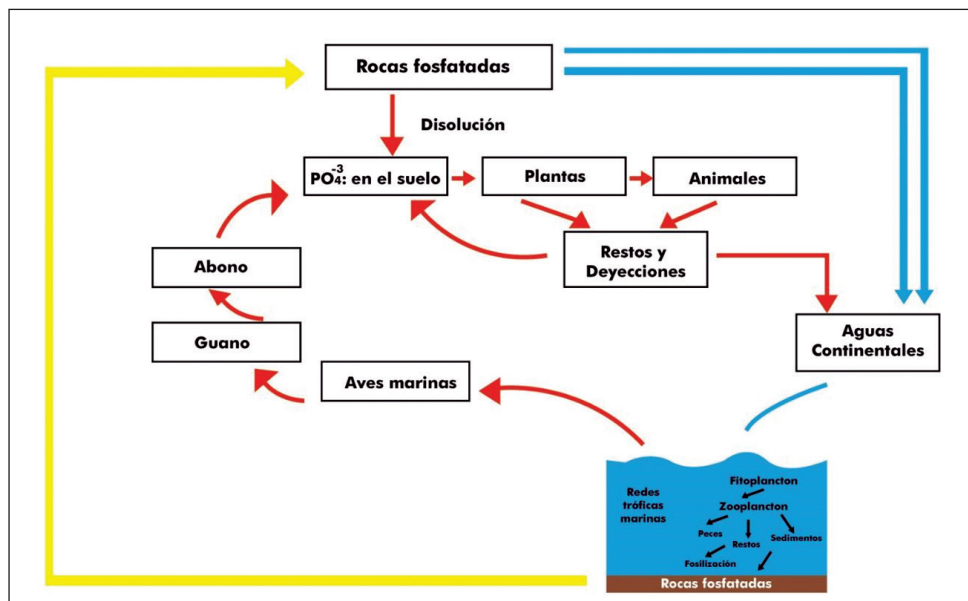
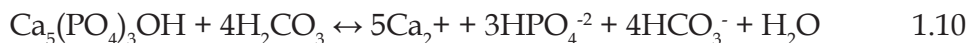


Figura 1.6. El ciclo de fósforo. Tomado y adaptado de S. E. Manahan. Introducción a la Química Ambiental. Madrid: Editorial Reverté, 2011, pp. 725.

inmediato es la agricultura. El principal compuesto con fósforo que se aprovecha en la naturaleza es el mineral de la roca fosfórica $P_2O_5 \cdot CaSO_4$. La roca fosfórica es un recurso no renovable que se usa como fuente de fósforo en la agricultura. Sin embargo, a nivel mundial se presenta como un problema ya que sólo el 30% de fósforo en la roca fosfórica es soluble en agua, por lo que su excedente contribuye a modificar las características del suelo.

En algunos casos el fósforo en exceso es arrastrado por escorrentía o lixiviación natural contribuyendo a la **eutrofización** (que es el incremento de algas por exceso de un nutriente), convirtiendo lagos en pantanos. Adicional a lo anterior, la roca fosfórica por su origen geológico puede tener metales pesados, tales como el Cd, Hg y Pb y presentar elementos radioactivos como el uranio. El fósforo también puede formar compuestos de calcio (apatita o fluoroapatita), que aparecen como pequeños cristales euhédricos asociados con minerales ferromagnesios o fosfatos de hierro, de manganeso o de aluminio, que son poco solubles en el agua. Los minerales de apatita se meteorizan congruentemente (es decir, el mineral se degrada completamente a productos disueltos en un solo paso) como resultado de la reacción con dióxido de carbono disuelto en la forma de ácido carbónico (Ec. 1.10).



El fósforo puede estar en dos formas posibles: orgánica e inorgánica. En los suelos, la meteorización libera el fósforo inorgánico más reactivo desde los minerales, conocido como ortofosfato. Esta liberación y consecuente absorción por parte de las plantas ocurre por varios procesos, a saber: primero, la respiración bioquímica de las plantas libera CO_2 , aumentando la acidez alrededor de la materia orgánica en descomposición y de **micorrizas** que se encuentran en las vellosidades de las raíces de las plantas (ver Figura 1.7). Así que los minerales con contenido de P poco cristalinos se disuelven rápidamente en este ambiente ácido, liberando P en forma de PO_4^{-3} . En segundo lugar, los exudados de los ácidos orgánicos de las raíces de las plantas también pueden disolver la apatita y liberar P a los espacios de los poros del suelo. Tras la disolución, el fósforo se transforma mediante varios procesos en formas que se pueden incorporar al tejido vegetal para convertirlo en una forma orgánica. Las plantas incorporan activamente fosfato para formar biomoléculas críticas para la fotosíntesis y el metabolismo, tales como el ADN (ácido desoxirribonu-

cleico) y el ATP (Adenosina Trifosfato). Cuando los animales consumen las plantas, usan el fósforo para formar los huesos en forma de fosfatos y como fosfolípidos en la membrana celular y en el cerebro.

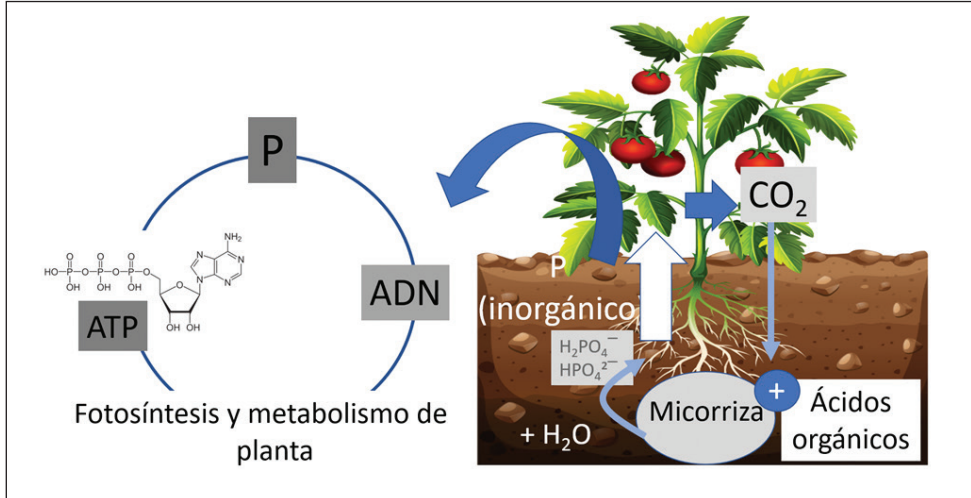


Figura 1.7. Absorción de fósforo por parte de las plantas. Tomado y adaptado de freepick.es

1.2.6 El ciclo de azufre

El azufre se presenta en la naturaleza en forma de sulfuros metálicos y combinado con otros elementos en forma de sulfatos, SO_4^{2-} ; en el aire se presenta en forma de dióxido de azufre, SO_2 , proveniente de emisiones volcánicas o antropogénicas, tal como la combustión de combustibles fósiles, lo cual contribuye negativamente al ciclo de azufre (ver Figura 1.8) y con la subsecuente formación de la **lluvia ácida** (tema que se ampliará en el capítulo 4). En el lecho marino existen emisiones de ácido sulfhídrico, H_2S , que se convierten en el alimento de las bacterias anaerobias. El H_2S también se encuentra en gases volcánicos y manantiales de aguas termales, tales como los de los municipios de Rivera o Paipa en Colombia; y en el petróleo, por lo que en los procesos de extracción se suelen emitir grandes cantidades, contaminando aire de zonas urbanas aledañas. El H_2S es un gas incoloro, combustible y con olor a huevos descompuestos. En pequeñas concentraciones (por debajo de 0.3 ppm) puede tener propiedades antiinflamatorias; pero a altas concentraciones es un gas venenoso para el ser humano. Por esta razón, no se recomienda fines recreativos para los manantiales térmicos.

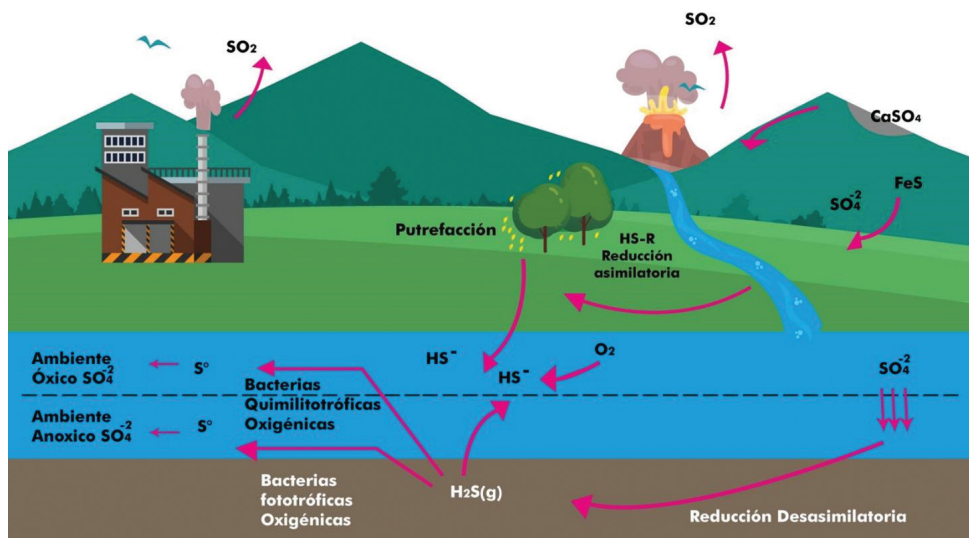


Figura 1.8. El ciclo de azufre. Tomado y adaptado de S. E. Manahan. Introducción a la Química Ambiental. Madrid: Editorial Reverté, 2011, pp. 725.

1.3 Propósitos de la química sostenible o química verde

La química verde se plantea como una estrategia para prevenir la contaminación ambiental a través de 12 principios. Esta necesidad se plantea con la incursión acelerada de sustancias peligrosas desde la revolución industrial que incluyó la manufactura y la obtención de medicamentos. La filosofía de la química verde consiste en replantear todas las reacciones químicas existentes y volverlas más amigables con el ambiente, reduciendo subproductos, usos de solventes, catalizadores, etc. Los doce principios se presentan a continuación:

1. Prevención	2. Economía del átomo	3. Reducción de derivados	4. Diseño de eficiencia energética	5. Síntesis de químicos menos peligrosos	6. Diseño de productos degradables
7. Diseño de químicos más seguros	8. Química más segura en la prevención de accidentes	9. Uso de material renovable	10. Nuevos catalizadores	11. Prevención de la polución	10. Uso de solventes seguros

La implementación de la química verde tiende a reducir y eliminar sustancias peligrosas para el medio ambiente y la salud del ser humano desde la industria química. En este sentido, se han propuesto prácticas destinadas a favorecer la sostenibilidad del planeta, mediante la conservación y uso racional de bienes y servicios medio ambientales, así como la planificación y administración eficiente de los recursos naturales por parte de las autoridades competentes, teniendo en cuenta tres aspectos fundamentales: el ambiente, la economía y la sociedad, y, por ser éstos, las bases de la sostenibilidad y aplicabilidad de los principios de la química verde.

En algunos procesos químicos industriales, no solo los productos de desecho, sino también los reactivos utilizados para la producción, pueden ser una amenaza para el medio ambiente. De acuerdo con los principios de la química verde, una amenaza puede eliminarse de una manera más simple, aplicando materias primas seguras para el proceso de producción. Por ejemplo, en la producción de nailon, poliuretanos, lubricantes y plastificantes se usan grandes cantidades de ácido adípico cada año y para la síntesis de este ácido se usa benceno, un compuesto con propiedades cancerígenas. Para reemplazar el uso de benceno en la fabricación del ácido adípico, químicos de la Universidad de Michigan desarrollaron una síntesis verde utilizando glucosa, lo cual es un sustrato menos tóxico y una fuente casi inagotable, y como catalizador usaron una enzima aislada en bacterias genéticamente modificadas. De esta manera, la producción de este ácido es una ruta verde ya que se protege a los trabajadores y al ambiente, evitando la exposición a sustancias químicas peligrosas.

1.4 Huella de carbono

La huella de carbono representa la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos hacia la atmósfera y que han sido derivados de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios, cuantificadas en toneladas equivalentes de dióxido de carbono. Esta herramienta de medición se creó debido a que las mayorías de las actividades antropogénicas producen CO₂ o porque a estas actividades se les puede establecer una relación con estos GEI, lo cual sirve para estimar la huella de carbono en cada producto que se vende en el mercado. Por ejemplo, en Cuba algunos estudios reportan en una central azucarera, una huella

de carbono de 0,27kg de CO₂/ kg de azúcar como el total de las etapas involucradas en la refinación del azúcar, desde la preparación del terreno, el uso de fertilizantes y de combustibles hasta el producto final, lo que representa un bajo consumo de combustibles fósiles para el proceso completo de producción de azúcar en Cuba.

Preguntas de consulta

1. ¿Cuál es la diferencia entre medio ambiente y ambiente?
2. ¿En qué consiste la economía de materiales? ¿Por qué se considera un sistema lineal? ¿Cuáles son las etapas?
3. ¿Qué es obsolescencia planificada y percibida? De un ejemplo para cada caso.



Lectura adicional

Alternativas para la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la producción de cemento

El cemento es un componente básico en las economías emergentes y en muchos países, desde Asia hasta la Europa del Este, es el cohesionador del progreso y el elemento fundamental para la construcción de edificios y carreteras. Solamente China emplea el 45% de la producción mundial y en Ucrania se dobla la fabricación de cemento cada cuatro años.

La producción de cemento se encuentra entre las mayores fuentes de emisiones antropogénicas de GEI, aproximadamente el 5% de las emisiones globales de CO₂. La producción de Clinker (producto intermedio obtenido en el proceso de fabricación del cemento) es la responsable del total de las emisiones directas de CO₂ en esta industria. Aproximadamente el 60% de estas emisiones se deben a las reacciones químicas que sufren las materias primas en el horno, y el 40% restante son debidas a la combustión. El resto de las emisiones de dicho GEI (6-10%) proviene

del consumo energético (tanto térmico como eléctrico) de las diferentes fases del proceso, que comprenden desde la extracción de la materia prima hasta la expedición de los productos fabricados. En el 2012 la producción mundial fue de 3859 Mt/año, lo que equivale a un consumo per cápita de 548 kg/año y se espera que para el 2050 su producción se multiplique por un factor de 2.5; es decir, una producción aproximada de 9650 Mt/año.

Entre las medidas destinadas a reducir las emisiones de CO₂, el uso de recursos materiales y energéticos alternativos se convierte en pieza clave de la gestión del CO₂ en la producción del cemento. Entre estas, la valorización de residuos se contempla como una de las alternativas con mayor potencial de reducción de las emisiones de CO₂.

La utilización progresiva de residuos en la producción de cemento, en el marco legal correspondiente (relativo tanto a la normativa reguladora de las especificaciones y exigencias para su fabricación como al relativo uso y consumo de residuos en el sector analizado), permite fabricar Clinker, sin disminuir la calidad ni las prestaciones de los productos fabricados y a la vez, reducir su impacto sobre la atmósfera. Aunque las posibilidades de aplicación en este campo son muchas y variadas, el nivel de la valorización de residuos en la producción del cemento difiere en cuanto al margen de mejora, según la localización de las instalaciones. Además de las limitaciones derivadas de las propiedades físicas y químicas de los residuos empleados (como el bajo poder calorífico, alto contenido en humedad, alta concentración de trazas de cloro para el caso de los combustibles y contenido mínimo de óxidos de calcio y magnesio para el caso de la materia prima), hay que añadirle las condiciones económicas, legales, técnicas, comerciales y sociales requeridas para su uso.

En relación con otra de las vías de ajuste disponibles para disminuir las emisiones de CO₂ en la producción del cemento procedente del consumo energético, se han propuesto diferentes medidas para reducir el consumo de energía eléctrica, cuya aplicación y valoración han sido abordadas en diferentes trabajos. El consumo de energía eléctrica está condicionado por la composición y las propiedades del material empleado (facilidad de molturación y finura, principalmente) y por la eficiencia energética de los equipos utilizados en las diferentes fases del proceso de producción del cemento.

Las anteriores actuaciones, acompañadas de la implantación de medidas destinadas a aprovechar diferentes residuos generados en la propia producción del cemento (cogeneración, reciclado, uso de la energía térmica de los gases de escape, etc.) y de mecanismos de prevención y control de la contaminación, redundarán en una mejora de la eficiencia productiva de las instalaciones de cemento.

Otra de las medidas viables para reducir las emisiones de CO_2 , en relación también con la composición química y propiedades del cemento, es la producción de cementos que tengan menor impacto medioambiental; bien a través de mejoras en la producción de los existentes (con la sustitución parcial de Clinker o mejorando las propiedades de los cementos mezclados) o desarrollando nuevos productos con menor proporción de Clinker y de material calcáreo, y que requieran menos tiempo de procesamiento.

Entre las alternativas consideradas en la industria se encuentran:

- a) Sustituir la piedra caliza como materia prima por residuos sólidos de las centrales eléctricas (principalmente, cenizas volantes).
- b) Desarrollar cementos ecológicos, entre los que se encuentran compuestos principalmente, por silicato de magnesio que permite absorber mayores cantidades de dióxido de carbono, durante la producción del cemento.
- c) Mineralización de carbonatos vía precipitación acuosa.
- d) Valoración de los residuos producidos en la planta.

Adicional a las alternativas anteriores, la industria le apuesta a la producción ecoeficiente, invirtiendo en I+D (Investigación + Desarrollo) para la fabricación y comercialización de los denominados “eco-cementos” o “cementos ecológicos”; contribuyendo de esta manera al desarrollo de tecnología innovadora para una economía respetuosa con el medio ambiente y el desarrollo sostenible.

Literatura citada:

- A. G. Perera y M. P. Sancha Dionisio, "Alternativas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la producción de cemento. Propuesta de un modelo de evaluación", *Innovar*, vol 26, no 60, pp. 51-66, 2016. DOI: <https://doi.org/10.15446/innovar.v26n60.55532>.
- J.C. Restrepo, O.J. Restrepo y J.I. Tobón, Reducción de CO₂ en la industria cementera por medio de procesos de síntesis química, *Revista Colombiana de Materiales*, no 5, pp. 54-60, 2014.

Literatura citada (según normas IEEE)

- A. Fernandez, A.T. Martínez, and F.J. Ruiz-Dueñas, "Experimental recreation of the evolution of lignin-degrading enzymes from the Jurassic to date", *Biotechnol Biofuels.*, vol 10, no 67, pp. 1-13, 2017.
- A. Odagiu, I. Gh. Oroian and T. Mihaiescu, A. Maxim and M.C. Mirza, "The environmental fingerprint. A case study", *Bulletin UASVM Agriculture*, vol 69, no 2, pp. 189 – 192, 2012.
- C.V. Escalares-Cifuentes, "Origen y ciclaje del óxido nitroso (N₂O) en cultivos monoclonales de microalgas marinas: el caso de las clorófitas *Micromonas pusilla* y *Nannochloris sp*", Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias con mención en Oceanografía, Universidad de Concepción, Chile, 2015.
- Comisión Europea. (2019, febrero 7). Oficina europea de prevención y control integrados de la contaminación [en línea]. Disponible en Internet: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/>.
- D. S. Schimel, "Terrestrial ecosystems and the carbon cycle", *Glob Change Biol.*, vol 1, no 1, pp. 77-91, 1995.
- G.M. Filippelli, "The global phosphorus cycle: past, present, and future", *Elements*, vol 4, pp. 89 -95, 2008.
- H.W. Heldt, B. Piechulla & F. Heldt, (Eds). (2010). *Plant biochemistry*, Elsevier Science & Technology, ISBN 9780123849861, London, 4th Edition.
- I. Horváth and P.T. Anastas, "Innovations and green chemistry", *Chem Rev.*, vol 107, no 6, pp. 2169 – 2173, 2007.
- J. Zhang, Q. Zhang, Y. Wang, J. Li, Z. Bai, Q. Zhao, D. He, Z. Wang, J. Zhang, Y. Chen, " Toxicity, bioactivity, release of H₂S in vivo and pharmaco-kinetics of H₂S donors with thiophosphamide structure, *European J Med Chem.*, vol 176, no 1, pp. 456-475, 2019.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP y Cancillería. (2015). Inventario Nacional de gases de efecto invernadero (GEI) (Tercera comunicación nacional de cambio climático

- de Colombia). [en línea]. Disponible en Internet: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023421/cartilla_INGEI.pdf.
- J. Farquhar and D. T. Johnston, "The oxygen cycle of the terrestrial planets: insights into the processing and history of oxygen in surface environments", *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, vol. 68, 16-30, 2007.
- J. Manley, P. Anastas, and B. Cue, "Frontiers in Green Chemistry: meeting the grand challenges for sustainability in R&D and manufacturing", *J. Cleaner Prod.*, vol 16, no 6, pp. 743-750, 2008.
- L. Wei, D. Jun-jun, X. Chun-ying, L. Qiao-zhen, Z. Qian, Z. Shan and L. Yu-zhong, "Effects of organic and inorganic fertilizers on emission and sources of N₂O in vegetable soils", *Chin J Appl Ecol.*, vol 29, no 5, pp. 1470-1478, 2018.
- M. Reinoso-Valladares, J. Canciano-fernández, A. Hernandez-Garcés y Y.C. Ordoñez-Sanchez, "Huella de carbono en la industria azucarera. Caso de estudio", *RTQ*, vol 38, no 2, pp. 516-526, 2018.
- N. Tyson, *The lost world: 9th Chapter* [TV Video documentary]. United States: Cosmos- A Spacetime Odyssey, 2014.
- R. Andrew, "Global CO₂ emissions from cement production, 1987-2017", *Earth Syst Sci Data*, vol 10, no 4, pp. 2213-2239, 2018.
- S. E. Manahan. *Introducción a la Química Ambiental*. Madrid: Editorial Reverté, 2011, pp. 725.
- S. Kaneco, Y. Shimizu, K. Ohta & T. Mizuno. Photocatalytic reduction of high pressure carbon dioxide using TiO₂ powders with a positive hole scavenger. *Journal of photochemistry and photobiology a-Chemistry*, vol 115, no 3, pp. 223-226, 1998.
- S. Ravichandran, "Implementation of green chemistry principles into practice", *International Journal of ChemTech Research*, vol 3, no 3, pp. 1046-1049, 2011.
- S. Yan, S.B. Subramanian, R. D. Tyagi, R.Y. Surampalli and T.C. Zhang, "Emerging contaminants of environmental concern: source, transport, fate, and treatment", *Pract Period Hazard Toxic Radioact Waste Manage*, vol 14, no 1, pp. 2-20, 2010.
- T.I. Moiseenko, "Evolution of biogeochemical cycles under anthropogenic loads: limit impacts", *Geochemistry International*, vol 55, pp. 841-860, 2017.
- V. García-Morales, F. Montero, D. Gonzales-Forero, G. Rodríguez-Bey, L. Gómez-Pérez, M.J. Medialdea-Wandossell, G. Domínguez-Vías, J.M. García-Verdugo, and B. Moreno-López, "Membrane-derived phospholipids control synaptic neurotransmission and plasticity", *PLOS Biol.*, vol 13, no 5, pp. 1-30, 2015.

2.1 Generalidades

Capítulo 2

Hidrosfera

El planeta Tierra lo podemos organizar en cuatro esferas de la naturaleza, a saber: Geósfera, Hidrosfera, Atmósfera y Biósfera. Cada una de estas esferas interactúa entre sí, produciendo los recursos naturales que pueden ser renovables (madera, agua) y no renovables (petróleo, carbón, minerales). Los recursos renovables se caracterizan porque pueden recuperarse en un tiempo corto. Así, por ejemplo, el agua se considera un recurso renovable siempre y cuando las actividades antropogénicas (humanas o derivadas de actividad industrial) no influyan en su recuperación o alteración del ciclo del agua. Por otro lado, los recursos **No renovables** se caracterizan porque tardaron millones de años en su formación; así que su sobreexplotación no le proporciona el tiempo suficiente para su regeneración. En este capítulo estudiaremos la hidrosfera que consiste en el estudio del agua y todos los procesos físicos y químicos involucrados.

2.2 Características y propiedades físicas del agua

De los 510 millones de km² de la superficie del globo terráqueo, los océanos cubren el 70.8% (360 millones de km²) y las tierras cerca del 29.2%. La visión habitual da una idea bastante falsa de la disposición real de los océanos: es un manto discontinuo de agua que ocupa el 70% de la superficie del planeta. De ese 70,8 % que corresponde de agua al planeta Tierra, el 97,2% corresponden a mares y océanos y el 2,8% a agua dulce. Esta agua dulce a su vez, está constituida en un 85% por los polos y glaciares, la humedad del aire y suelo (0,2%), 14% de agua subterránea y sólo un 0,8 % de agua superficial de donde se obtiene principalmente el agua potable. El agua superficial la componen: 52% lagos, 38% hume-

dad de los suelos, 8% vapor de agua atmosférico, 1% agua de los seres vivos y 1 % agua de los ríos. *El agua de los ríos es el agua que se usa principalmente en las plantas de tratamiento de agua, así que si consideramos estos datos estamos realmente usando sólo un 0,0003% de agua para el consumo humano.*

El agua en estado puro no tiene color (incolora), sabor (insípida) ni olor (inodora). Estas propiedades organolépticas son parámetros de calidad del agua; sin embargo, no son un factor concluyente para estimar la calidad del agua, ya que existen algunas sustancias que se presentan como contaminación “invisible”, que no se detectan a simple vista, y podrían conservar el agua sin alteración en estas propiedades. El agua sólida tiene una densidad menor que la del agua líquida, por eso el hielo flota (por ejemplo: un iceberg flotando en el océano) o por eso se estallan las botellas de agua en el congelador. Las diferencias de las densidades entre el agua sólida y líquida garantizan la preservación de la vida bajo el agua congelada en lagos y mares. La explicación del por qué la densidad del agua disminuye en estado sólido se debe al reordenamiento de las posiciones de las moléculas de agua en estado cristalino que están más cerca, en comparación con el estado líquido. Una explicación más detallada de este tema se puede encontrar en Osamu Mishima & H. Eugene Stanley, 1998.

El agua es un gran disolvente, por eso la mayor parte del agua de la hidrósfera no está en estado puro, sino mezclada con otras sustancias que se presentan en disolución, esto se debe a una propiedad llamada **solvatación**, la cual se ilustra en la Figura 2.1, y que consiste en las interacciones entre cargas que se presenta entre la molécula de agua y un ion. De tal manera, que si es un catión (sustancia con carga positiva) las moléculas de agua se reordenaran para que el oxígeno, con carga negativa interaccione con el catión; por lo contrario, si es un anión (sustancia con carga negativa), los hidrógenos que tienen deficiencia de carga estarán más cerca del anión.

A pesar de las exploraciones espaciales en búsqueda de agua en nuestro sistema solar, el planeta Tierra es el único planeta que la tiene agua en abundancia sobre su superficie y en sus tres estados: líquido, sólido y gaseoso. En estado sólido, la encontramos en los glaciares de los polos y en las cumbres de las montañas como nieves perpetuas, tal como la Sierra Nevada del Cocuy; en estado líquido, forman los océanos, mares,

ríos, lagos y aguas subterráneas y en estado gaseoso, está presente en la atmósfera en forma de vapor de agua.

Los seres vivos presentamos entre 65-70 % de agua como parte de su composición, donde presenta diferentes funciones biológicas, tales

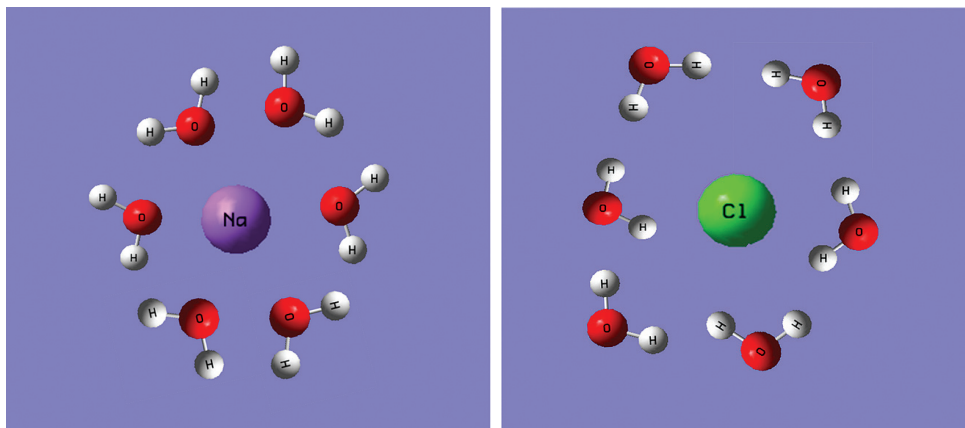


Figura 2.1. Moléculas de agua solvatando iones de NaCl. Fuente propia.

como transporte de nutrientes, medio necesario para diversas reacciones, absorción de nutrientes y fotosíntesis en las plantas, amortiguación térmica y transpiración. La amortiguación térmica consiste en la resistencia que tiene una sustancia de elevar su temperatura a medida que se calienta. En el caso del agua, para elevar 1°C la temperatura de 1 kg de agua se necesita más energía que para la mayoría de las sustancias. Esta propiedad es aprovechada por los seres vivos para controlar la temperatura corporal o es la razón por la cual un globo lleno de agua no se estalla y uno de aire sí.

El agua tiene una característica muy aprovechada en los procesos biológicos de los seres vivos, conocida como **puentes de Hidrógeno**. Los puentes de hidrógeno se presentan entre diferentes moléculas de agua o moléculas de agua y otras sustancias, tales como las proteínas. La interacción se presenta entre el oxígeno que está cargado negativamente y un hidrógeno deficiente electrónicamente. Las moléculas de agua en los sistemas vivos rodean las enzimas formando puentes de hidrógeno. Estas interacciones hacen posible que las enzimas tengan su estructura terciaria o cuaternaria (forma tridimensional) y sus sitios activos, de tal

manera que sin ello no fuera posible que se degradaran otras sustancias en los organismos (ver Figura 2.2).

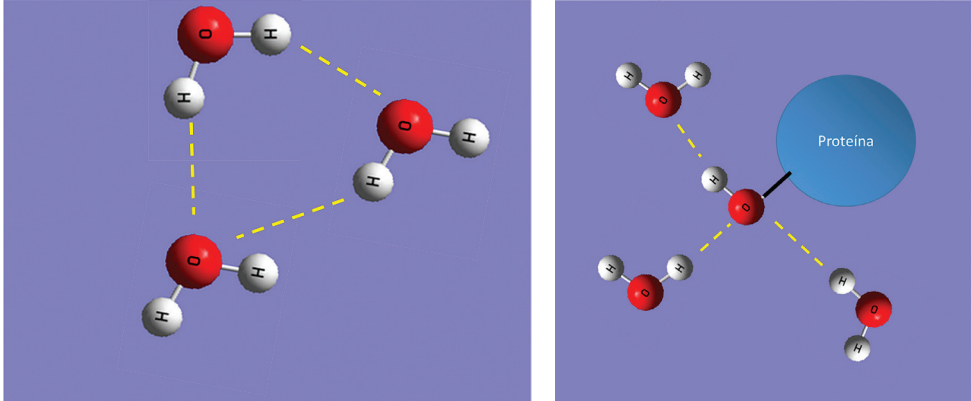


Figura 2.2. Interacciones puente de hidrógeno entre a) molécula de agua -agua b) molécula de agua - enzima. Fuente propia.

Una propiedad física del agua que permite la miscibilidad o no miscibilidad con otras sustancias es la **polaridad**. Un modelo usado para comprender la polaridad es teniendo en cuenta las diferencias electrónicas que existen entre el hidrógeno y el oxígeno *en la misma molécula de agua* (ver Figura 2.3). La polaridad del agua permite explicar por qué se calientan los alimentos (que tienen agua) en un horno microondas o el por qué agua es soluble en etanol (que también es polar) y no soluble con

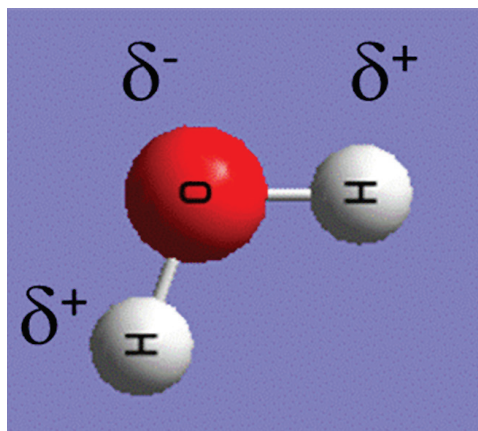


Figura 2.3. Diferencias de carga en una molécula de agua. Fuente propia.

petróleo (que es apolar). Usted podría hacer un pequeño experimento en su casa: introducir una pequeña cantidad de licor y una de aceite mineral en el horno microondas, ¿cuál esperaría que se caliente?

El agua también puede moldear el paisaje, erosionando suelos o montañas. En la cueva de los guácharos, por ejemplo, se encuentran formaciones calcáreas, conocidas como estalagmitas y estalactitas: las estalactitas son las que se encuentran en el techo y las estalagmitas en el suelo. Estas formaciones se presentan porque algunos carbonatos son arrastrados por el agua a través de la porosidad del techo de la caverna, originando las estalactitas húmedas, que van goteando y arrastrando las sales que terminan en el suelo formando las estalagmitas (ver Figura 2.4).



Figura 2.4. Formaciones calcáreas en las cavernas. Foto tomada en cueva de Guácharos, Colombia. Fuente propia.

2.3 Fuentes naturales de agua

El agua se obtiene de diferentes fuentes naturales; así que conocer las características físicas y químicas de estas fuentes son de gran interés para su cuidado. A continuación presentaré alguna de ellas:

2.3.1 Mares y océanos

Los **mares y océanos** representan el 97% del agua del planeta Tierra. El agua contiene una gran cantidad de iones, tales como cloruros (54.3%), sodio (30.2%), sulfato (7.6%), magnesio (3.7%) calcio (1.2 %), potasio (1.1%) y otros (1.9%). Los océanos contribuyen al control de la temperatura del planeta y se estima que contienen un tercio del oxígeno del planeta. La razón de esta producción de oxígeno en los océanos se debe principalmente a la reproducción de **diatomeas**, que son unas microalgas con un caparazón de sílice. La reproducción de estas algas en los océanos se ha presentado durante períodos que pueden durar décadas, ya que los nutrientes que usan llegan a través de los ríos voladores que se originan desde la selva del Amazonas (en el caso del mar Caribe). En los océanos se presentan diferentes gradientes de temperatura y de salinidad que permiten la formación de las corrientes marinas. Esta condición contribuye a los cambios de temperatura del planeta. En la formación de las corrientes marinas también pueden influir los vientos, la energía del sol y el efecto Coriolis, que es una fuerza producto de la rotación terrestre. Adicionalmente, los mares se caracterizan por ser más salados que los océanos.

2.3.2 Glaciares

El **polo Norte** se encuentra en el mar ártico, no tiene tierra y es el hábitat de los osos polares y el **Polo sur** se encuentra cerca de la Antártida sobre un terreno de aproximadamente de 14 millones de km² de tierra y es el hábitat de los pingüinos. Las actividades antropogénicas como la quema de combustible que contribuyen al calentamiento global (ver Capítulo 4) inciden significativamente en el derretimiento de los glaciares. Algunas de las consecuencias de este hecho sería el incremento de la línea de costa, la desaparición de algunos pueblos costeros o islas del pacífico, así como algunas especies marinas. Por ejemplo, la UNESCO ya ha advertido del peligro de que Venecia (Italia) desaparezca por el posible

aumento de inundaciones, debido al incremento del cambio climático en los próximos 100 años.

En el año 2017 se desprendió parte del glaciar de la Antártida del tamaño de República Dominicana, conocido como Larsen C. A pesar de que es uno de los icebergs más grandes registrados que se han desprendido de uno de los polos, sus consecuencias ambientales aún no han sido registradas. Diferentes científicos hacen monitoreo vía satelital y evalúan el deshielo de superficie de este iceberg y no ha superado el 3%. La importancia de estos registros radica en los impactos que podría tener el deshielo sobre la formación de hielo marino, la circulación oceánica, los ecosistemas marinos y la navegación de barcos. Además, los procesos evolutivos de los icebergs pueden ser clave para encontrar las causas de la descomposición continua de las plataformas de hielo antárticas con el cambio del nivel del océano y del mar.

El **permafrost**—suelos congelados permanentemente— se encuentra en la zona Sur de Argentina y Chile, en países de la Europa Oriental y en Siberia. El derretimiento del permafrost contribuye al aumento de los gases de invernadero, al ser una fuente rica en dióxido de carbono, y facilita la erosión de las laderas y deslizamientos. Estos sucesos generarán grandes cambios en las comunidades de montañas y próximas generando modificaciones en sus economías, por lo que se hace cada vez más necesario tener un conocimiento concreto de las regiones que podrán ser afectadas y generar mecanismos de prevención de riesgos y disminución de vulnerabilidad regional.

2.3.3 Aguas subterráneas

Las **aguas subterráneas** estuvieron usando durante mucho tiempo como fuente de agua potable por las comunidades del campo. A medida que los límites de las zonas urbanas estuvieron más cerca del campo, estas aguas empezaron a contaminarse. Principalmente, porque se construyeron pozos sépticos cerca de estas fuentes y por el crecimiento de la población que incidió en el aumento de aguas residuales domésticas. Las aguas subterráneas presentan un nivel máximo de alcance del caudal que se conoce como **nivel freático**. Este nivel es importante en el momento de hacer excavaciones o explotaciones petroleras, tal como el *fracking* (este tema se ampliará en el próximo capítulo), ya que indica la posibilidad de una fuente posible de agua dulce.

2.3.4 Ríos, quebradas y riachuelos

Los ríos, quebradas y riachuelos se diferencian por el tamaño del caudal del agua. En una **cuenca hidrográfica**, las quebradas y riachuelos (y algunos pequeños ríos) alimentan a otros –más grandes. Dependiendo del tipo de movimiento de agua, se denomina **afluente**, cuando el agua entra y **efluente**, cuando el agua sale de un cuerpo mayor. Por ejemplo, el río Magdalena, tiene varios afluentes entre los cuales se encuentran el río Sogamoso y Las Ceibas.

Una **cuenca hidrográfica** de un río corresponde a todo el territorio que incluya sus afluentes naturales; de tal manera, que sus aguas den al mar a través de un único río, o que vierta sus aguas a un único lago **endorreico** (sin desagüe al mar).

Los ríos presentan diferentes funciones ecosistémicas dentro de las cuales se observa el transporte de sedimentos y nutrientes al suelo; el mantenimiento de hábitat para peces, aves y otras formas de vida silvestre. Las propiedades físicas y químicas del agua inciden sobre la biodiversidad y la calidad del agua. En algunas partes, se usan los ríos para crear hidroeléctricas o represas de agua lo cual genera efecto negativos social, cultural, económico y ambientalmente.

Las **represas** reducen el caudal del río, impiden el transporte de sedimentos y nutrientes, afectan la vida de los peces interrumpiendo su ciclo reproductivo y generan problemas sociales y económicos a las comunidades aledañas. Una alteración en el régimen de caudales – por ejemplo, la reducción de caudal aguas abajo de una represa – podría interrumpir el comportamiento migratorio de varias especies. En particular, las fluctuaciones en las comunidades de fitoplancton de muchos ríos regulados se ven afectadas por los aumentos en el flujo de agua debido a la descarga de la represa. La liberación de agua retenida detrás de una represa puede eliminar gran parte de la biomasa de fitoplancton, aguas abajo de la represa. En contraste, el estancamiento del flujo de agua puede aumentar la densidad de las poblaciones de fitoplancton.

Históricamente, los seres humanos han utilizado los ríos como recursos indispensables para su desarrollo. Así, por ejemplo, las grandes civilizaciones antiguas como la de los egipcios y sumerios crecieron y prosperaron a lo largo de ríos enormes como el Nilo, el Tigris y el Éufrates, que les proveían agua para servicios básicos como la agricultura y el

transporte. Pero a pesar de su importancia, los ríos también han sido utilizados como caños de desperdicios y, como consecuencia, ríos como el Támesis, el Rin y otros grandes ríos europeos se convirtieron en basurales y caños de aguas negras, por lo que finales del siglo XIX, especialmente en Europa, se dejó de utilizar estas fuentes de aguas putrefactas y contaminadas que generaban malos olores y enfermedades graves para la población.

2.3.5 *Páramos*

Los **páramos** se caracterizan por ser reservorios de agua dulce, de nacimiento de ríos y contribuyen a la fijación de carbono a través de la necromasa adherida a las plantas gracias a la lenta descomposición de la materia orgánica, dada la característica humífera de su suelo. No obstante, los páramos vienen sufriendo serios procesos de transformación y degradación, debido principalmente al uso antrópico de sus recursos bióticos y físicos por parte del hombre quién los utiliza como leña para combustible y cercas vivas; techado de casas de campo; alimento del ganado; actividades agrícolas y ganaderas inadecuadas; explotación comercial de turbas y desecación de turberas para incrementar la frontera agrícola; utilización de depósitos lacustres, lagos y lagunas en programas de generación eléctrica; explotación en exceso del recurso hídrico para consumo humano; programas de reforestación inapropiados y turismo mal dirigido, entre otros.

Según el IDEAM, los páramos en Colombia han perdido entre el 60 % - 80 % de su superficie de hielo durante los últimos 100 años. En los páramos colombianos se encuentran humedales como las **turberas**, estrechamente relacionadas con los pantanos e innumerables lagunas localizadas entre los 3000 y 3500 msnm. Las turberas allí son antiguas lagunas o cubetas lacustres con gruesas capas de suelo orgánico saturado que constituyen la esponja de páramo, de donde el agua fuertemente adherida se va filtrando y liberando poco a poco formando hilos de agua, quebradas y finalmente ríos. Las turberas desempeñan diversas funciones tales como el control de inundaciones, puesto que actúan como esponjas almacenando y liberando lentamente el agua de lluvia, recargando y descargando acuíferos, controlando la erosión, reteniendo sedimentos y nutrientes.

2.3.6 *Humedales*

Estos sistemas hidrológicos constituyen un mecanismo regulador de caudales entre épocas de invierno y verano y soporta una gran cantidad de recursos ecológicos significativos para el desarrollo socio-económicos de las zonas aledañas. Estas fuentes de aguas se encuentran en contacto con aguas subterráneas, corrientes superficiales y aguas marinas (cuando están cercas) e incluyen ciénagas, pantanos y manglares de agua dulce o salada. Esta situación es de gran interés porque para su conservación ya que cada vez son mayores las actividades antropogénicas cerca de estos sistemas que no sólo contaminan los humedales sino también eventualmente otra fuente acuífera. En el caso de Colombia, por ejemplo, no existe un control gubernamental serio, ya que cada vez son mayores las construcciones que se hacen en humedales. A pesar de que existen pocos estudios de las reacciones o fenómenos de transporte presente en los humedales, se conoce que son zonas naturales de inundación de ríos, hábitats de peces y fauna, participan en el mejoramiento de la calidad del agua natural y protegen contra la erosión de la costa.

Los humedales se encuentran entre los ecosistemas más productivos del mundo, comparables a los bosques lluviosos y los arrecifes de coral. También son una fuente de biodiversidad sustancial para el apoyo de numerosas especies de la mayoría de los grupos principales de organismos, desde microbios hasta mamíferos. Las características físicas y químicas como el clima, la topografía (forma del paisaje), la geología, los nutrientes y la hidrología (la cantidad y movimiento de agua) ayudan a determinar las plantas y animales que habitan en diferentes humedales. Los humedales en Texas, Carolina del Norte y Alaska, por ejemplo, difieren sustancialmente el uno al otro por su naturaleza física y biótica variable.

Los humedales pueden considerarse como “supermercados biológicos”. Producen grandes cantidades de alimentos que atraen muchas especies animales. Las complejas y dinámicas relaciones de alimentación entre los organismos que habitan en ambientes de humedales se conocen como **redes alimenticias**. La combinación de aguas poco profundas, altos niveles de nutrientes inorgánicos y altas tasas de productividad primaria (la síntesis de nueva biomasa vegetal a través de la fotosíntesis) en muchos humedales es ideal para el desarrollo de organismos que forman la base de la red alimentaria; por ejemplo, muchas especies de insectos,

moluscos y crustáceos. Algunos animales consumen la vegetación que está en el suelo (red alimenticia herbívoro-carnívoro red); otros utilizan las hojas y los tallos de las plantas muertas, que se descomponen en el agua para formar pequeñas partículas enriquecidas con nutrientes de material orgánico, llamados **detritos**.

A medida que el material vegetal continúa descomponiéndose en partículas cada vez más pequeñas, se vuelve cada vez más enriquecido (nutritivo) debido a la actividad de bacterias, hongos y protozoos. Este material proteico enriquecido, incluye los diversos microbios que lo colonizan, que alimenta a muchos peces e invertebrados pequeños, los cuales, a su vez, sirven como alimento para anfibios, reptiles, peces, aves y mamíferos que son depredadores más grandes. Numerosas especies de aves y mamíferos dependen de los humedales para obtener alimento, agua y refugio, especialmente durante la migración y la cría.

Una de las funciones del ciclo biogeoquímico, en los humedales, involucra las transformaciones biológicas, físicas y químicas de varios nutrientes dentro de la biota, suelo, agua y aire. Los humedales están relacionados particularmente con nitrógeno, azufre y fósforo. Un buen ejemplo es la reducción química y anaeróbica (no oxigenada) de suelos de humedales y fangos de hábitats acuáticos similares a estuarios, lagos y arroyos, los cuales soportan microorganismos que participan en el ciclo de nitrógeno y azufre. En la muerte y decaimiento, el nitrógeno y el azufre presente en la biomasa de plantas y animales son liberados a través del proceso de la mineralización.

Gran cantidad de la biomasa se transforman en sustancias de forma gaseosa y se liberan a la atmósfera, donde una vez más queda disponible para ciertas plantas y a sus bacterias fijadoras de nitrógeno asociadas en el suelo. Estos procesos químicos son una defensa importante para el lodo, ya que son las condiciones de reducción química y anaeróbica en el sustrato, junto con varios microorganismos, los que aseguran la liberación gaseosa del nitrógeno y el azufre. Por otro lado, el fósforo no tiene forma gaseosa; pero las plantas vasculares en los humedales transforman en formas inorgánicas del fósforo (que de otro modo podrían derivarse en floraciones de algas indeseables) dentro de formas orgánicas en su biomasa a medida que crecen. *Por lo tanto, los humedales proporcionan las condiciones necesarias para la eliminación de nitrógeno y fósforo de las aguas superficiales.* Los científicos también señalan que el mantenimiento

atmosférico es una función adicional del humedal. Los humedales almacenan carbono dentro de su biomasa vegetal viva y preservada (turba) en lugar de liberarla a la atmósfera como dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero que afecta los climas globales. Por lo tanto, los humedales de todo el mundo ayudan a moderar las condiciones climáticas globales; contraria a las actividades antrópicas, tales como el relleno o el drenaje de los humedales que termina liberando dióxido de carbono.

Los humedales mejoran la calidad del agua porque remueven o retienen nutrientes inorgánicos, procesan desechos orgánicos, reducen los sedimentos suspendidos e interceptan la escorrentía superficial. También reducen los problemas ambientales tales como la floración de algas, zonas muertas, mortandad de peces, que son asociados generalmente con excesos de nutrientes. Mantiene un rol en el ciclo hidrológico del agua, ya que recibe, almacena y libera agua en numerosos caminos; pueden mantener una corriente de agua durante periodos secos y reponer aguas superficiales.

2.4 Tratamiento de agua potable y agua residual

El ser humano es un gran consumidor de agua dulce, libre de sales inorgánicas. Las plantas potabilizadoras transforman las aguas dulces en agua potable, que es el agua apta para el consumo humano. El proceso de potabilización y distribución para la población se desarrolla en una planta diseñada para este tipo de tratamiento, tal como se presenta en la Figura 2.5. La planta presenta unas rejillas y gravas que impiden el ingreso de materia orgánica o sedimentos a la planta; luego, sigue un tra-

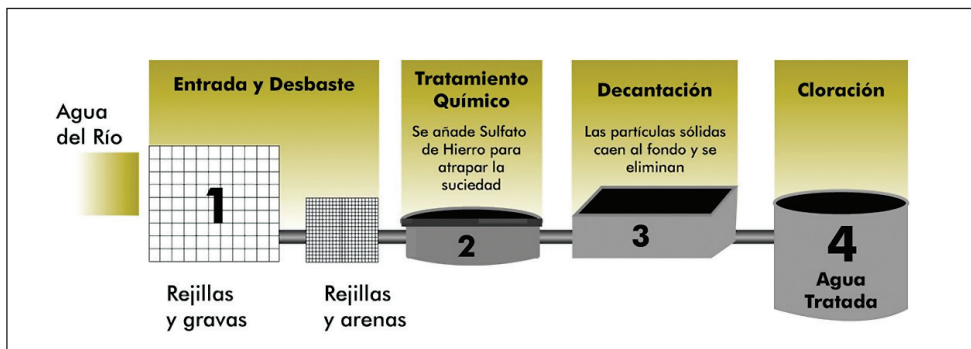


Figura 2.5. Planta de tratamientos de agua potable. Tomado y adaptado de N.P. Cheremisinoff, N. Handbook of water and wastewater treatment. Pollution engineering: Oxford, 2002, pp. 636.

tamiento químico con sulfato de aluminio, conocido como **floculación**, que permite atrapar la materia orgánica que logra ingresar a la planta en flóculos y precipitarla al fondo de tanque diseñados para este proceso. El siguiente paso consiste en la decantación que es la eliminación de toda la materia orgánica que se encuentra en fondo del recipiente; y el último paso, es la cloración que se usa para la eliminación de los microorganismos patógenos que se puedan presentar. La cantidad de cloro debe ser lo suficiente para garantizar que el cloro actúe sobre los microorganismos que se puedan encontrar en las tuberías de agua y no lleguen a las aguas domésticas. Algunos países como Irán usan un sistema diferente de potabilización de agua, conocido como ósmosis inversa. En este proceso se usa el agua de mar, que es presionada por un pistón a través de membranas semipermeables que permiten pasar únicamente el agua pura (libre de sales marinas).

Uno de los problemas que más aqueja al agua potable es que las **bocatomas** (lugar donde se toma el agua dulce) deben ser agua que esté libre de contaminación urbana o procedente del agro. Sin embargo, se han reportado casos donde por la cercanía de cultivos a estas bocatomas, el agua incrementa los iones de calcio o magnesio, por el exceso de agroquímicos usados. Esto va a incidir en la dureza del agua y afectar la salud humana, principalmente en problemas asociados con los riñones. Existen otros ejemplos de contaminantes presentes en agua potable, tal como los trihalometanos, que son compuestos orgánicos volátiles que se generan por la reacción entre el cloro (usado en la cloración) con la materia orgánica que pueda estar aún presente. En otros casos se han reportado la presencia de estrógenos, residuos de medicamentos o pseudomonas. Estos últimos contaminantes se conocen, hoy en día, como **contaminantes emergentes**.

Las aguas residuales domésticas o industriales tienen un tratamiento diferente a una planta de tratamiento de agua potable (ver Figura 2.6). Los tres primeros pasos de esta planta son similares a las de tratamiento de agua potable; sin embargo, los lodos residuales generados se pueden aprovechar como abono siempre y cuando no contengan metales pesados. La cuarta etapa consiste en la introducción de unos reactores biológicos aeróbicos que permiten que los microorganismos degraden la materia orgánica. En la siguiente etapa se presenta nuevamente una decantación (decantación secundaria) y finalmente, una etapa de cloración

para la eliminación de todos los microorganismos. Las aguas residuales tratadas no son consideradas agua potable por tal razón su destino final son los ríos.



Figura 2.6. Planta de tratamiento de aguas residuales. Tomado y adaptado de N.P. Chermisinoff, N. Handbook of wáter and wastewater treatment. Pollution engineering: Oxford, 2002, pp. 636

Es importante aclarar que el método representado en la figura es un método tradicional; sin embargo, puede haber cambios dependiendo del tipo de agua residual que se vaya a tratar. En el caso de aguas residuales o lodos originarios de la industria del petróleo se usan técnicas más sofisticadas como la **biorremediación**, la **microfiltración** o la **ósmosis inversa**.

La presencia de contaminantes emergentes que comprenden una gran cantidad de sustancias químicas, tales como productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, agentes tensoactivos, plastificantes y aditivos industriales, y otros que no están incluidos en el monitoreo actual de programas de tratamientos de aguas residuales, obliga a revisar continuamente los procedimientos establecidos en estas plantas. El análisis y la determinación de estos contaminantes emergentes se han vuelto una necesidad de hoy en día. Investigadores de la Universidad Libre de Amsterdam desarrollaron una técnica de análisis usando bioensayos donde monitorearon simultáneamente sustancias con actividad androgénica, antiandrogénica, estrogénica, glucocorticoide y progestogénica, en aguas residuales de la planta de tratamiento de la ciudad.

2.5 Contaminantes del agua y parámetros de calidad del agua

Un contaminante es una sustancia que altera las propiedades físicas y químicas del agua, provenientes de diferentes fuentes naturales. En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de algunos ejemplos de contaminan-

tes, fuente de contaminación y los indicadores de calidad en el agua. Los indicadores son los observables medibles en el agua que pueden indicar que tipo de contaminación presentan. Por ejemplo, un cambio de color puede deberse a sustancias disueltas o suspendidas en el agua. La coloración también me podría indicar posibles contaminantes, así por ejemplo, en las aguas dulces, el color amarillo se debe a sustancias húmicas, los colores rojizos se deben a compuestos de hierro, las tonalidades negras se deben a la presencia de manganeso; y así sucesivamente. Los Bifenilos Policlorados, PCB's, son un grupo de 209 compuestos químicos sintetizados, de muy distinta toxicidad y se usan como líquidos refrigerantes y lubricantes en transformadores y otros equipos eléctricos, en la fabricación de pinturas y plásticos y como aceites hidráulicos, etc. Estos compuestos se acumulan en los tejidos grasos, tienen una toxicidad moderada, pero hay serios indicios que como en el caso de las dioxinas y los PAH's (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos), puedan inducir cáncer y dañar el sistema nervioso y el desarrollo embrionario. Los PAH's son un grupo de más de 100 compuestos químicos que se forman en la combustión incompleta del carbón, petróleo, gas y otras sustancias orgánicas; y se suelen utilizar para la fabricación de algunos plásticos, medicinas, colorantes y pesticidas.

Tabla 2.1

Tipos de contaminantes, fuentes de contaminación e indicadores de calidad en el agua*.

Contaminantes	Ejemplos	Fuentes	Indicadores
Sedimentos y sólidos	Fragmentos de roca, polvo, desechos, etc.	Suelo, actividad del hombre, industria	Turbidez
Radiactivos	Uranio, plutonio, etc.	Natural, clínico, etc.	Enfermedades tipo cáncer.
Microorganismos Patógenos	Bacterias, virus, protozoos y otros que transmiten enfermedades (cólera, tifus, hepatitis, etc.)	Heces y restos orgánicos infectados	Número de coliformes. Cero colonias de coliformes por 100 mL de agua.
Desechos orgánicos	Heces de hombre y animales (ganado, etc.) Residuos de comidas u otros originados por el hombre.	Actividad humana	Oxígeno disuelto, DBO, DQO. Eutrofización.

*Tomado y adaptado de UNESCO, WHO, UNEP. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring. 2nd. ed. Cambridge: WHO by F&FN Spon, 1996, pp. 651

2.6 Métodos de análisis de parámetros de calidad

Los parámetros de calidad de agua permiten establecer las características físicas y químicas del agua y conocer si la fuente de agua es apta para el consumo humano. Algunos de estos parámetros son las propiedades organolépticas: color, sabor y olor, la temperatura, los sólidos suspendidos, disueltos, turbidez, etc. La temperatura del agua determina sus propiedades físicas, químicas y biológicas; es importante en la solubilidad de las sales, y de los gases por lo tanto influye en la conductividad y en el pH. Una contaminación térmica (vertido de efluentes con temperatura alta) se detecta por un aumento de más de 3 °C en una zona respecto de las adyacentes. Las propiedades organolépticas son el primer indicador de calidad y se pueden observar con una simple inspección; sin embargo, en la mayoría de los casos no es suficiente ya que puede existir algún tipo de contaminación “invisible” que requiera un análisis más detallado, como los que se muestran a continuación:

2.6.1 Sólidos totales

Los sólidos totales (ST) incluyen partículas de suelo insolubles, sedimento, material sólido orgánico e inorgánico que están suspendidos en el agua y que en términos de masa total es la mayor fuente de contaminación acuática. En muchos ríos la carga de sedimentos ha aumentado bruscamente a causa de la erosión acelerada de campos de cultivos, deforestación, construcciones y explotaciones mineras. Los sedimentos originados por los sólidos suspendidos destruyen los lugares de alimentación y reproducción de peces. Los sólidos totales pueden ser sólidos suspendidos y sólidos disueltos. Los sólidos disueltos comprenden las sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que están disueltas en el agua. Según la OMS, en el año 2006, recomendó para el agua potable un valor de sólidos disueltos por debajo de los 600 mg/L. El método de análisis de sólidos totales depende del tipo de sólido a analizar: mientras que los sólidos disueltos se determinan por la diferencia de peso que hay en la muestra de agua y el recipiente vacío; los sólidos suspendidos se determinan por el peso de sólidos obtenidos después de filtrar la muestra de agua.

La concentración de SD (sólidos disueltos) está correlacionada con la CE (conductividad eléctrica), que es una medida de la capacidad líquida

para conducir la carga eléctrica, que depende de la concentración de iones, fuerza iónica y la temperatura de la muestra. En algunas regiones, especialmente en zonas costeras, investigadores han realizado estudios para encontrar la correlación matemática precisa entre esos dos parámetros, así que la concentración de ST puede ser calculada fácilmente desde un valor de conductividad. La correlación de esos parámetros puede ser estimada por la siguiente ecuación:

$$ST \left(\frac{mg}{L} \right) = k \times EC \left(\frac{\mu S}{cm} \right) \quad 2.1$$

El valor de la constante k incrementará con el incremento de los iones en agua. Sin embargo, la relación entre la conductividad y SD no es necesariamente lineal; esto depende de la actividad del promedio de iones disueltos específicos, y la fuerza iónica. Las constantes en las correlaciones lineales podrían variar entre 0.5 - 0.8, dependiendo del tipo de agua y el contaminante analizado.

2.6.2 pH, conductividad eléctrica y dureza

El pH indica la concentración de iones hidronios en el agua y se usa como una medida de la naturaleza ácida o alcalina de una muestra acuosa. Un pH de 7 indica una solución neutra, un pH < 7 medio ácido y un pH > 7 medio básico. El pH en el agua natural depende de la concentración de CO_2 , así por ejemplo, las aguas con pH entre 6 a 7, permiten el desarrollo de una gran biomasa. De tal manera, que la contaminación con sustancias químicas (*i.e.* hidrocarburos) podría incidir en un valor ácido de una muestra de agua y afectar la biomasa de la fuente de agua. La medición del pH se hace usando un potenciómetro, o en su defecto un multiparámetro (ver Figura 2.7). La conductividad eléctrica, parámetro que depende de la



Figura 2.7. Foto de multiparámetro. Fuente propia.

temperatura, es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad, e indica la materia ionizable total. Las unidades de la conductividad eléctrica se dan en siemens/cm. La dureza y la conductividad son dos parámetros que están muy relacionados, ya que las sales de calcio y magnesio son las más abundantes en la naturaleza y pueden presentarse en las fuentes naturales de forma natural o antropogénica (a través del uso de agroquímicos). La conductividad y la dureza reflejan el grado de mineralización de las aguas y su productividad potencial.

La dureza del agua también puede ser producida por otros cationes metálicos polivalentes disueltos como Ba^{+2} , Sr^{+2} , Fe^{+3} y Zn^{+2} . Tradicionalmente, la dureza total se define como la suma de las concentraciones de Ca^{+2} y Mg^{+2} expresados como $mg\ L^{-1}$ de $CaCO_3$. Desde el punto de vista sanitario, las aguas duras son tan satisfactorias para el consumo humano como las aguas blandas; sin embargo, un agua dura requiere demasiado jabón para la formación de espuma y crea problemas de lavado; además deposita lodo e incrustaciones sobre las superficies con las cuales entra en contacto, así como en los recipientes, calderas o calentadores en los cuales se calienta. La clasificación del agua según el valor de dureza se presenta en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2
Clasificación del agua según su dureza

Tipo de agua	Dureza total $mg\ L^{-1}$ de $CaCO_3^*$
Suave	0-50
Moderadamente suave	50-100
Ligeramente duro	100 - 150
Moderadamente duro	150 - 250
Duro	250 - 350
Muy duro	>350

* Tomado de UNESCO, WHO, UNEP. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring. 2nd. ed. Cambridge: WHO by F&FN Spon, 1996, pp. 651.

Según el IDEAM, el límite para dureza en agua potable es de $160\ mg\ CaCO_3/L$. Para aguas de caldera de presión intermedia el límite es $1\ mg/L$ y de presión alta, $0.07\ mg\ CaCO_3/L$, en aguas de enfriamiento es de $650\ mg\ CaCO_3/L$. El análisis más común de la dureza del agua se

basa en el método volumétrico con el reactivo de la sal sódica del ácido etilendiaminotetracético (EDTA), usando la ecuación 2.2.

$$[\text{dureza total}], \frac{\text{mg CaCO}_3}{L} = \frac{V_{\text{EDTA}} \times M_{\text{EDTA}}}{V_{\text{MUESTRA}}} \times 100091 \quad 2.2$$

Donde:

V_{EDTA} = Volumen de titulante (EDTA) para valorar dureza, mL.

M_{EDTA} = Concentración de EDTA, mol/L

V_{MUESTRA} = Alícuota de muestra titulada, mL

100091 = Peso atómico de carbonato de calcio (100,091 g/mol) \times 1000 mg/g.

En la mayor parte de las aguas se considera que la dureza total es aproximadamente igual a la dureza producida por la suma de los iones calcio y magnesio, es decir:

$$[\text{dureza total}], \frac{\text{mg CaCO}_3}{L} = \frac{V_{\text{EDTA}} \times M_{\text{EDTA}}}{V_{\text{MUESTRA}}} \times 100091 \quad 2.2$$

Las concentraciones muy bajas o altas de calcio (Ca) y magnesio (Mg) o la dureza total en el agua potable han sido reconocidas empíricamente como la causa de los problemas de corrosión, descamación o sabor del agua. Una gran cantidad de evidencia científica en los últimos 60 años también ha atribuido problemas de salud a ambos extremos de estos minerales en el agua. Por ejemplo, beber agua baja en Mg aumenta significativamente la probabilidad de mortalidad cardiovascular. Este conocimiento no se considera adecuadamente en las regulaciones de calidad del agua potable, especialmente porque cada vez se produce más agua por desalinización que altera su composición mineral natural. A raíz de lo anterior, diferentes investigadores han propuestos tratamientos para regular las concentraciones de Mg y Ca en el agua, que incluyen nano partículas de plata y zeolitas.

2.6.3 Turbidez

La turbidez del agua es una medida de la transparencia del agua. La radiación que entra al agua se dispersa por la presencia de sustancias insolubles en suspensión, coloides, microorganismos. Una turbidez elevada puede proteger a los microorganismos de los efectos de la desinfección, estimular la proliferación de bacterias y generar una demanda

es consumido rápidamente por la oxidación de la materia orgánica, formando dióxido de carbono más agua. También puede ser consumido por la biooxidación de compuestos nitrogenados, oxidación química o bioquímica de agentes reductores. En el análisis de oxígeno disuelto se establecen dos mediciones, principalmente, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Mientras que el DQO está relacionado con la oxidación química de los contaminantes del agua por dicromato en ácido sulfúrico; la DBO se refiere al grado de consumo de oxígeno durante la oxidación de contaminantes en el agua, llevada a cabo por microorganismos durante cinco días.

La determinación de algunos de estos dos parámetros permite establecer la naturaleza del contaminante: orgánico o inorgánico. Sin embargo, en muchas ocasiones se hace necesario recurrir a otros tipos de análisis de oxígeno, que permitan corroborar la información. Por ejemplo, la Demanda de oxígeno inmediato (DOI) que es el consumo inmediato de oxígeno (durante 15 min) sin oxidante químico o bacteriano o el DBO_5 que es la demanda biológica de oxígeno equivalente a 5 días a 20 °C de incubación. En la determinación de contaminantes en aguas residuales, la relación entre DBO/DQO indica la biodegradabilidad de la materia contaminante, así si la relación de DBO/DQO es menor que 0,2 el vertido es de tipo inorgánico; mientras que, si la relación de DBO/DQO es mayor que 0,6, el vertido es de tipo orgánico.

Nuevas tecnologías se están desarrollando para monitorear y evaluar la calidad del agua a un ritmo rápido para mantenerse al día con las crecientes demandas de gestión creadas por el entorno cambiante. Los desarrollos recientes en tecnologías de sensores permiten el monitoreo continuo *in situ* de la calidad del agua. Las tecnologías de sensores tienen una clara ventaja sobre los métodos de muestreo tradicionales, que no permiten un muestreo seguro o simple durante condiciones climáticas menos que deseables. La recopilación continua de datos sobre el agua permite realizar estudios sobre la dinámica de los nutrientes inorgánicos en el agua y los efectos de los incendios forestales en la calidad del agua.

2.6.5 *Análisis de nitrógeno*

Los iones que contienen nitrógeno pertenecen a los iones más comunes en las aguas y, por lo tanto, son uno de los principales indicadores de

calidad. Por lo general, ingresan al agua desde la fertilización de los campos con agroquímicos que contienen nitrógeno y como productos de la contaminación fecal e industrial. Iones que contienen nitrógeno que ocurren comúnmente en el agua incluyen iones de amonio, nitritos y nitratos. Los nitritos son perjudiciales para la salud de adultos y niños. Las aguas superficiales bien aireadas no deben contener amonio y en las aguas abajo de descargas de aguas servidas se encuentra amonio en concentraciones de hasta 4 mg/L. La presencia de amonio indica contaminación reciente; los nitritos provienen de la oxidación del amonio o reducción del nitrato y el nitrato proviene principalmente del uso de fertilizantes. La determinación de nitratos, nitritos y amonio se puede hacer usando un equipo de espectroscopia UV-VIS (ver Figura 2.9). Este equipo tiene dos lámparas (una de tungsteno y otra de deuterio), un portamuestras y un detector. La muestra de agua se ubica en el portamuestras y se irradia con radiación electromagnética en el rango de ultravioleta -visible (200-800 nm), usando la lámpara adecuada: deuterio para UV y tungsteno para visible. Cuando la muestra es irradiada, una fracción de esta radiación la atraviesa, conocida como **transmitancia**, y se representa como una señal eléctrica. La muestra debe ser una disolución diluida para que pueda ajustarse a la ley de Beer y de esta manera, se pueda cuantificar la cantidad de iones presentes usando patrones de referencias para cada ion.



Figura 2.10. Equipo de Espectroscopia UV-Vis. Fuente propia.

Otros métodos de análisis de nitritos y nitratos incluyen equipos más complejos como la electroforesis capilar, usando una solución tampón de Tris-HCl con una adición de cloruro de onil etiltrimetilamio para revertir el flujo electroosmótico. Este método electroforético puede detectar hasta 0.003 mg L^{-1} (es decir, 65 nM) para nitritos y 0.010 mg L^{-1} (es decir, 160 nM) para nitratos, que son suficientemente bajos para el control de calidad de agua potable. A pesar de la buena detección de este método su uso no es tan popular, por los costos de análisis.

2.6.6 *Análisis de fósforo soluble*

El fósforo soluble que está presente en muestras de agua tiene un origen orgánico (humus y materia orgánica) o inorgánica (roca fosfórica, minerales de hierro, aluminio, calcio y flúor). Las especies de fósforo más comunes en aguas naturales incluyen compuestos inorgánicos y orgánicos disueltos o suspendidos. Las especies inorgánicas incluyen ortofosfatos, polímeros lineales o polifosfatos y polímeros cíclicos o metafosfatos. Los compuestos orgánicos comprenden ésteres, fosfonatos, ácidos nucleicos, fosfolípidos, azúcares, proteínas, ácido aminofosfórico, fosfoamidas y otros. Los iones pirofosfato y tripolifosfato ($\text{O}_7\text{P}_2^{+4}$ y $\text{O}_{10}\text{P}_3^{-5}$, respectivamente) son el primero y la segunda unidad de las cadenas lineales de polifosfatos formadas a partir de la condensación de ortofosfato. La estructura molecular de estas especies consiste en iones PO_4^{-3} compartiendo un átomo de oxígeno común en cada uno de los extremos del tetraedro. El fósforo es un factor limitante en el crecimiento de algas o fitoplancton, su presencia favorece la **eutrofización** y trae como consecuencia el aumento de materia orgánica, bacterias heterótrofas y finalmente disminución del oxígeno disuelto.

Existen diferentes métodos para medir fósforo soluble, que implica una medida de la concentración del fósforo biológicamente disponible. No todo el fósforo disuelto está realmente disponible para los organismos; la disponibilidad biológica del elemento depende de muchos factores, incluyendo las especies presentes y sus concentraciones. El método estándar para la determinación de fósforo soluble consiste en la reacción del fósforo con iones molibdeno y antimonio para formar un complejo, el cual puede ser reducido utilizando cloruro de estaño o ácido ascórbico para producir un complejo de color azul, que puede ser cuantificado usando colorimetría. La absorbancia a 882 nm se relaciona directamente

con la concentración de ortofosfato. El fósforo orgánico generalmente se determina mediante la diferencia entre dos mediciones de fósforo soluble, antes y después de la digestión de la materia orgánica. El P disuelto total (PDT) incluye especies solubles como ortofosfato, polifosfato y fósforo orgánico así como también especies coloidales y polímeros.

2.6.7 *Análisis de contaminantes orgánicos usando cromatografía*

Existe una gran familia de contaminantes orgánicos polares y apolares según la fuente de contaminación. Los compuestos orgánicos con pesos moleculares menores que 300 g/mol y que no excedan temperaturas de ebullición de 300 °C pueden analizarse usando cromatografía de gases. La cromatografía es una técnica de separación de sustancias orgánicas para diferentes matrices, tales como líquida, sólida o gaseosa. Esta técnica se puede acoplar con diferentes detectores que permiten el análisis de una gran cantidad de contaminantes orgánicos, tales como pesticidas organoclorados y organosfosforados, hidrocarburos, bifenilos policlorados, hidrocarburos poliaromáticos, polifenoles, etc. La mayoría de estos compuestos tienen propiedades teratogénicas, carcinogénicas y mutagénicas. Las muestras necesitan un pretratamiento para poder hacer el análisis en el equipo, que puede determinar hasta una parte por billón de un contaminante en una muestra. La técnica más usada para el pretratamiento de la muestra acuosa es la extracción líquido-líquido.

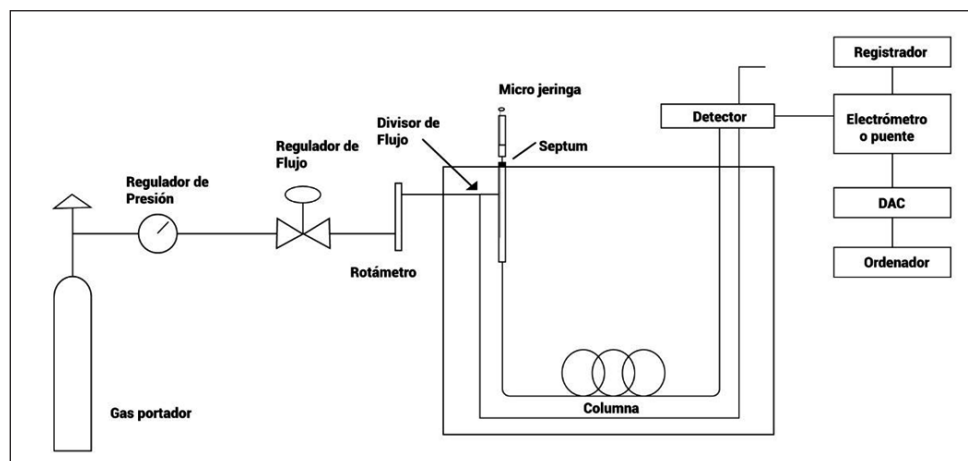


Figura 2.10. Esquema general del funcionamiento de un equipo de cromatografía de gases. Tomado y adaptado de Grob, R. *Modern Practice of gas chromatography*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004, Fourth edition, pp.1045.

Los contaminantes orgánicos, productos de fuentes antropogénicas, que tienen altos pesos moleculares, tales como productos farmacéuticos, pesticidas, hormonas esteroides (andrógenos, progestinas y glucocorticoides), productos para el cuidado personal y compuestos polifluorados (PFC) se pueden analizar usando cromatografía líquida. La técnica de preparación de la muestra, más común usada, es extracción en fase sólida (SPE). Esta técnica se puede aplicar a una variedad de matrices de agua, y aunque el principio es el mismo que la de gases, se diferencia en el sistema de fases y detección usadas.

2.6.8 Análisis de metales pesados usando espectroscopia de absorción de llama

Las aguas residuales que contienen metales pesados producidos por las industrias se liberan directamente en los recursos acuáticos, incluidos los ríos, sin ninguno o con pretratamiento parcial. Los metales pesados así descargados persisten en los cuerpos acuáticos y se bioacumulan a lo largo de la cadena alimentaria. Los metales presentes en el medio ambiente en pequeñas cantidades se convierten en parte de varias cadenas alimentarias a través de la biomagnificación y su concentración aumenta a tal nivel que puede resultar tóxico tanto para los humanos como para otros organismos vivos. La bioacumulación de metales pesados peligrosos en especies de peces de diferentes sistemas acuáticos está relacionada con sus hábitats de alimentación.

La toxicidad de los metales pesados está relacionada con daños en el sistema nervioso central de los organismos vivos, lo cual se ve reforzado por su bioacumulación y su biomagnificación, ya que puede llegar a todo el ecosistema. Por ejemplo, el cadmio se acumula principalmente en los riñones y su semivida biológica en el ser humano es prolongada, de 10 a 35 años. Hay pruebas de que el cadmio es cancerígeno por inhalación, y el Centro Internacional de Investigaciones contra el Cáncer, CIIC, ha clasificado el cadmio y los compuestos de cadmio en el Grupo 2A. La Organización Mundial de Salud, OMS, recomienda un valor de 3×10^{-3} mg/L para el Cd en aguas residuales.

En un embalse, la evidencia de contaminación reside no solo en el agua sino también en el sedimento, la transferencia entre las dos fases está controlada por diferentes mecanismos (adsorción, precipitación, intercambio iónico). Esta transferencia también está influenciada por dife-

rentes configuraciones como el pH, el potencial redox, los microorganismos. El análisis de los metales pesados en aguas residuales es muy importante, porque son sustancias que son neurotóxicos y se bioacumulan en los organismos vivos.

El método de análisis más usado para la detección de metales pesados, tales como Hg, Cd y Pb es la espectrometría de llama. Este método consiste en una llama, por lo general formada por una mezcla de acetileno/aire, que permite la excitación de los componentes de la muestra y en la emisión de un rayo de luz que es traducida en una señal eléctrica. La muestra por su naturaleza no puede ser analizada directamente en el equipo por lo que se la somete a un proceso previo de preparación que permite obtener una disolución del analito adecuada para la atomización. Dentro de los métodos más comunes de preparación se incluyen métodos de digestión: húmeda, seca o asistida por microondas. De esta manera, este método espectroscópico tiene una amplia aplicación en lo que refiere a la cuantificación de metales pesados, ya que permite el análisis de prácticamente todos los elementos de la tabla periódica.



Figura 2.11. Equipo de Absorción atómica. Laboratorio de investigación -CORHUILA. Fuente propia.

Investiga:

1. ¿Cuáles son los valores permitidos en agua potable para otros metales pesados y contaminantes orgánicos?

Preguntas de consulta

1. ¿Consulte qué es un contaminante? ¿Qué tipo de contaminantes de agua existen? Defina partículas sólidas, partículas suspendidas y disueltas; y aguas residuales.
2. Explique en qué consiste la contaminación domiciliar, la contaminación urbana, la contaminación industrial, la contaminación agroindustrial. Haga un cuadro comparativo donde se presente sus similitudes y diferencias
3. ¿Cuáles de los siguientes elementos son liberados en forma gaseosa en un humedal? a) fósforo y hierro b) oxígeno y fósforo c) Nitrógeno y azufre d) Manganeso y dióxido de carbono.

**Lectura adicional**

¿Qué son las diatomeas y cómo se afectan con el calentamiento global?

Las diatomeas son microalgas unicelulares que tienen una pared celular hecha de polipéptidos, proteínas y de sílice. La capa externa de sílice que protege las diatomeas tiene poros muy pequeños con diferentes tamaños y formas, que varían según los géneros y especies. Entre las microalgas, las diatomeas son responsables de fijar el 41-50% de CO_2 en los océanos y son ricas fuentes para la obtención de diversos productos de bajo y alto valor como los biocombustibles, los carotenoides y los ácidos grasos. El éxito ecológico de las diatomeas en el medio ambiente se basa en su pared celular de sílice (formada sin carbonos asimilados) que responde a varios climas de luz, ya que sobreviven eficientemente bajo diferentes intensidades de luz y cualidades de luz.

En las últimas décadas, los lagos de todo el mundo han experimentado un aumento de la temperatura de las aguas superficiales. Los impactos de este calentamiento son numerosos, pero incluyen cambios en la estructura térmica vertical de la columna de agua y estaciones más largas sin hielo, junto con cambios en la estructura y función del ecosistema. Algunos cambios en la composición de la comunidad biótica conocidos son los que suceden a gran escala en el plancton con aumentos en los taxones, como las picocianobacterias. Estos cambios no se limitan exclusivamente a cuerpos de agua pequeños y medianos, ya que lagos muy grandes, incluyendo el gran lago Laurentian, Tahoe (Norteamérica) y Tanganica (África Oriental), también han experimentado cambios en sus comunidades biológicas y en su producción primaria autóctona.

Al mismo tiempo, los ecosistemas lacustres también son sensibles a los impactos del calentamiento climático en los procesos de las cuencas hidrográficas, lo que puede conducir a alteraciones de los aportes fluviales, incluido el flujo de nutrientes a los lagos y el oscurecimiento de las aguas del lago debido al aumento de la materia orgánica disuelta. Tales cambios pueden influir en las comunidades bacterianas y de algas autótrofas a través de cambios en el ciclo de nutrientes y la disponibilidad de luz.

El lago Baikal, el lago más antiguo, profundo y voluminoso del mundo, está sufriendo los impactos del calentamiento climático. Las temperaturas atmosféricas en la región alrededor del lago Baikal en el sur de Siberia han aumentado significativamente en las últimas décadas, con una temperatura media anual en la superficie del aire en la ciudad cercana de Irkutsk, que aumentó de -5.85°C a 0.3°C en los últimos 20 años.

Un mayor calentamiento del siglo XXI desencadenará cambios en la comunidad de plancton, como alteraciones en la producción de diatomeas endémicas y altamente ricas en silicio hacia diatomeas litorales más livianas y picoplancton autotrófico. Por ejemplo, se ha predicho que las futuras reducciones en la duración del hielo asociadas con el calentamiento regional darían como resultado un transporte mejorado de diatomeas como *Stephanodiscus meyerii* y *Synedra acus* a regiones pelágicas, concomitante con la disminución de especies pelágicas endémicas como *Aulacoseira baicalensis* y *Cyclotella minuta*. Estos cambios pueden verse potenciados por la escorrentía elevada de la primavera debido al aumento de la precipitación, el aumento de la entrega de silicio y otros

nutrientes al lago, lo que fomentaría aún más el crecimiento de especies como *Synedraacus*, al tiempo que alteraría el ciclo del carbono en el lago debido a la mayor entrega de carbono orgánico disuelto y partículas de carbono orgánico.

Hasta la fecha, estas predicciones en el lago Baikal se han realizado en gran medida a partir de registros de diatomeas recopilados a principios de la década de 1990. Aquí se examinan los cambios de diatomeas más recientes, ya que el lago Baikal ha experimentado cambios limnológicos y biológicos con el aumento de la temperatura del agua del lago y la reducción de la duración de la capa de hielo. Además, se ha vuelto cada vez más evidente que durante la última década, la eutrofización cultural de los asentamientos de la costa también ha impactado las regiones litorales del lago, dando lugar al potencial de múltiples factores estresantes que afectan su resiliencia ecológica.

Literatura citada:

- V. Kumar, M. Kashyap, S. Gautam, P. Shukla, K. Ballabh and V. Vinayak, Fast Fourier infrared spectroscopy to characterize the biochemical composition in diatoms, *J. Biosci*, vol 43, no 4, pp. 717-729, 2018.
- S. Roberts, G. Swann, S. McGowan, V. N. Panizzo, E. G. Vologina, M. Sturm and A. Mackay, Diatom evidence of 20th century ecosystem change in Lake Baikal, Siberia, *PLOS ONE*, vol 13, no 2, 1-20, 2018.

Literatura citada (según normas IEEE):

- A. Encalada, "Funciones eco sistémicas y diversidad de los ríos", *Polemika*, vol 5, no 1, pp. 1-10, 2010.
- A. Gupta, D. Rai, R. Pandey and B. Sharma, "Analysis of some heavy metals in the riverine water, sediments and fish from river Ganges at Allahabad", *Environ Monit Asses.*, vol 157, pp.449-458, 2009.
- A. Rusydi, "Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review", *G.C.G.E.*, vol 118, pp. 1-6, 2018.
- A. Zirakrad, S. Jamalodin and M. Taghi, "Perfomance study of reverse osmosis plants for water desalination in Bandar-Lengeh, Iran", *J Community Health Res.*, vol 2, no 1, pp. 8-13, 2013.

- C.-L. Chen, K. Thoen, F. Uckun, "High-performance liquid chromatographic methods for the determination of topoisomerase II inhibitors", *J. Chromatogr. B*, vol 764, pp. 81-119, 2001.
- C. Chen, Z. Xia, M. Wu, Q. Zhang, T. Wang, L. Wang and H. Yang, "Concentrations, source identification, and lung cancer risk associated with springtime PM_{2.5}- bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Nanjing, China", *Arch Environ Contam Toxicol.*, vol 73, no 3, pp. 391 - 400, 2017.
- C. J. Houtman, B. Rob and A. Brouwer, "Steroid hormonal bioactivities, culprit natural and synthetic hormones and other emerging contaminants in waste water measured using bioassays and UPLC-tQ-MS", *Sci Total Environ.*, vol 616/617, pp. 187 -197, 2017.
- C.J. Post, M. P. Cope, P. D. Gerard, N. M. Masto, J. R. Vine, R. Y. Stiglitz, J. O. Hallstrom, J. C. Newman and E. A. Mikhailova, "Monitoring spatial and temporal variation of dissolved oxygen and water temperature in the Savannah River using a sensor network", *Environ. Monit. Assess.*, vol. 190, no 5, pp. 1-14, 2018
- D. P. Santa, D. C. Martínez y T. B. Vargas, "Uso de hidroquímica e isótopos ambientales para la evaluación de la conexión hidrológica entre el agua subterránea y el humedal ciénaga Colombia", *Gestión y Ambiente*, vol 11, no 2, pp. 21-37, 2008.
- D. Tagliapietra. The ecological implications of climate change on the lagoon of Venice. Venice: UNESCO, 2011, pp. 45.
- EPA. (2016). Wetland functions and values [online]. Available: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-02/documents/wetlandfunctionsvalues.pdf>.
- E. Martínková, T. Krizek and P. Coufal, "Determination of nitrites and nitrates in drinking water using capillary electrophoresis", *Chem Papers*, vol 68, no 8, 1008-1014, 2014.
- F. Kozisek, "Regulations for calcium, magnesium or hardness in drinking water in the European Union member states", *Regul Toxicol Pharm.*, vol 112, pp. 1-8, 2020.
- H. Han, S. Lee, J.-I. Kim, S. H. Kim and H.-C. Kim, "Changes in a giant iceberg created from the collapse of the Larsen C ice shelf, Antarctic peninsula, derived from sentinel -1 and cryostat-2 data" *Remote Sens*, vol 11, no 404, 1-14, 2019.
- J. Drewes, "permafrost activity and atmospheric warming in the Argentinian Andes", *Environ. Geol.*, vol 323, 13-24, 2018.
- J. Ma, Y. Yuan, T. Zhou and D. Yuan, "Determination of total phosphorus in natural waters with a simple neutral digestion method using sodium persulfate: simple neutral digestion method", *Limnol Oceanogr Methods*, vol 15, no 4, pp.372-380, 2017.

- M. Dussán. El Quimbo: extractivismo, despojo, ecicidio y resistencia. Neiva: Planeta Paz, 2017, pp.277.
- M. Topalián, P. Castañé, M. Rovedatti, A. Salibián, "Principal component analysis of dissolved heavy metals in water of the Reconquista River (Buenos Aires, Argentina)", *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* vol 63, pp. 484 - 490, 1999.
- M.R. Jumat, N. A. Hasan, P. Subramanian, C. Heberling, R.R. Colwell and P.-Y. Hong, "Membrane bioreactor-based wastewater treatment plant in Saudi Arabia: Reduction of viral diversity, load and infectious capacity", *Water*, vol 9, no 7, pp. 1-19, 2017.
- M. Shariati-Rad, S. Heidari, "Classification and determination of total hardness of water using silver nanoparticles", *Talanta*, Vol 219, pp. 121-297, 2020.
- M.T. Pereira, J.M Silva-Alves, A. Martins-José, J.C.D. Lopes and M.M. Santoro, "Thermodynamic evaluation and modelling of proton and water exchange associated with benzamidine and berenil binding to B-trypsin", *Braz J Med Biol Res.*, vol 38, no 11, pp. 1593-1601, 2005.
- M.H. Garnett, P. Ineson and C. Anthony, "Stevenson and David C. Howard, Terrestrial organic carbon storage in a British moorland", *Glob Change Biol.*, vol 7, no 4, pp. 375-388, 2001.
- Minambiente. (2002). Programa para el manejo sostenible y restauración de ecosistemas de la alta montaña colombiana (segunda edición) [en línea]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co>.
- N.P. Cheremisinoff, N. Handbook of wáter and wastewater treatment. Pollution engineering: Oxford, 2002, pp. 636.
- O. Mishima and E. Stanley, "The relationship between liquid, supercooled and glassy water", *Nature*, vol. 396, pp. 329 -335, 1998.
- O.V. Polyakova, D.M. Mazur, V.B. Artaev, and A.T. Lebedev, "Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in water by gas chromatography/mass spectrometry with accelerated sample preparation", *J Anal Chem.*, vol 68, no 13, pp. 1099 -1103, 2013.
- P. Nagy, J. Fekete and V.K. Sharma, "Monofluorinated polycyclic aromatic hydrocarbons: surrogate standards for HPLC analysis of surface water and sediment samples", *J Liq Chromatogr Relat Technol.*, vol 31, no 2, pp. 240-249, 2008.
- R. Grob, Modern Practice of gas chromatography. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004, Fourth edition, pp.1045.
- S. E. Manahan. Introducción a la Química Ambiental. Madrid: Editorial Reverté, 2011, pp. 725.
- S. W. Jung, O. Y. Kwon, S. M. Yun, H. M. Joo, J-H. Kang and J. H. Lee, "Impacts of dam discharge on river environments and phytoplankton communities in a

regulated river system, the lower Han River of South Korea", *J Ecol Environ.*, vol 37, no 1, pp. 1-11, 2014.

UNESCO, WHO, UNEP. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring. 2nd. ed. Cambridge: WHO by F&FN Spon, 1996, pp. 651.

Y. Hailu, E. Tilahun, A. Brhane, H. Resky, O. Sahu, "Ion exchanges process for calcium, magnesium and total hardness from ground water with natural zeolite", *Groundw. Sustain. Dev.*, vol 8, pp. 457 - 467, 2019.

Y. He, L. Peng, Y. Huang, X. Peng, S. Zheng, C. Liu and K. Wu, "Association of breast adipose tissue levels of polychlorinated biphenyls and breast cancer development in women from Chaoshan, China", *Environ Sci Pollut Res.*, vol 24, no 5, pp. 4778 -4790, 2017.

Capítulo 3

Suelo

3.1 Las capas de la geósfera

Las capas de la Tierra son la **corteza** continental (**litósfera**) con una profundidad de 20 a 70 km, el **manto** (**mesósfera**) que incluye el **inferior** (700 a 2900 km) y el **superior** (70 a 700 km de profundidad) y el **núcleo** (**endósfera**) (2900 a 6000 km) (ver Figura 3.1). El núcleo se encuentra a altas temperaturas debido a la energía residual generada desde la formación del planeta y se caracteriza, principalmente, por la presencia de Fe y Ni fundido. Algunos científicos han sugerido la presencia P en el núcleo de la Tierra, debido a su naturaleza siderófila y la ubicuidad de las aleaciones de hierro que contienen P en análisis de meteoritos de hierro.

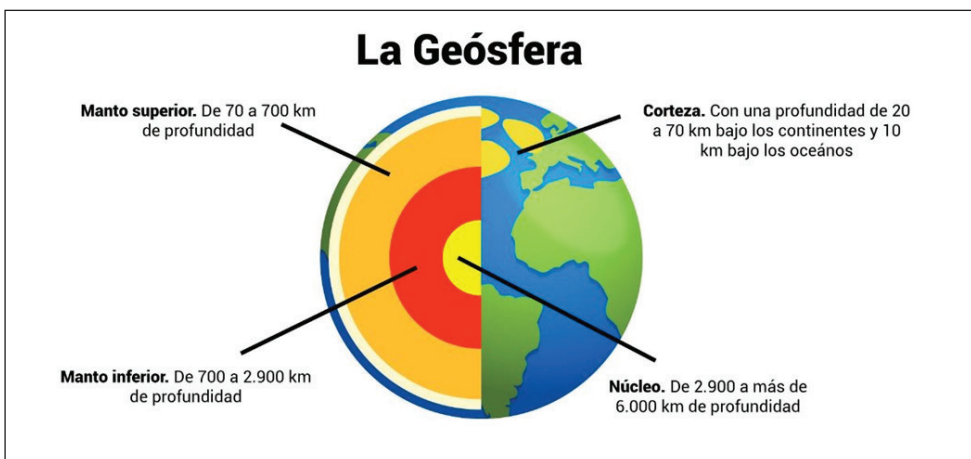


Figura 3.1. Capas de la geósfera. Tomado y adaptado de R. Carlson, M. Garcon, J. O'Neil, J. Reimink, and H. Rizo, "The nature of Earth's first crust" *Chem. Geol.*, vol 530, 2019.

El núcleo se mantiene en movimiento, generando un campo magnético en el planeta que lo protege del viento solar, que incluye electrones, protones y partículas alfa con energías térmicas entre 1 y 10 keV. Algunas aves se orientan a través de las líneas del campo magnético y el hombre lo aprovecha para sus sistemas de navegación y de comunicaciones.

El manto está compuesto de silicatos de magnesio y de otros minerales y la corteza está compuesta de diferentes minerales (35-45%), de materia orgánica (5-15%), agua (25%) y aire (25%). La cantidad de minerales en el manto es aún desconocida, su formación geológica está relacionada con los diferentes valores de presión y temperatura que existen a bajas profundidades. Estudios recientes de la Academia Rusa de Ciencias identificaron nuevas fases cristalinas de los siguientes minerales: bridgmanita - $(\text{Mg}, \text{Fe}) \text{SiO}_3$, jeffbenita - $(\text{Mg}, \text{Fe}^{+2}, \text{Ca})_3 (\text{Al}, \text{Fe}^{+3}, \text{Cr})_2 (\text{Si}, \text{Ti})_3 \text{O}_{12}$, breyita - una forma triclinica de CaSiO_3 , y ellinaita - CaCr_2O_4 , incrustados en diamantes extraídos del manto inferior.

La corteza terrestre tiene una cantidad de minerales y su materia orgánica se estima que puede alcanzar hasta 8 metros de profundidad, desde su formación geológica. Entre los minerales más conocidos se encuentran: cuarzo, SiO_2 ; los feldspatos, silicatos de alúmina y potasa, gaseosa o lima, incluidos la ortoclasa potásica, la albita sódica, y la anortita cálcica, con mezclas isomorfas de éstos; los piroxenos, metalizados de calcio, magnesio y hierro, a veces con aluminio o sodio; los anfíboles, en composición química muy parecida a los piroxenos, pero difieren en forma de cristal y de otra manera; las micas, aluminosilicatos, principalmente la moscovita potásica o la biotita de potasio-hierro-magnesio, todas conteniendo hidroxilo; las olivinas, ortosilicatos de hierro y magnesio; nefelita, un ortosilicato de sodio y aluminio; leucita, un metasilicato de potasio y aluminio; magnetita, ferroso: óxido férrico e ilmenita, óxido de hierro y titanio; y apatita, un fosfato de calcio que contiene un poco flúor o cloro.

3.2 Características, origen y tipos de suelo

Las características de cada suelo dependen de varios factores. Los más importantes son el tipo de roca que los originó, su antigüedad, el relieve, el clima, la vegetación y los animales que viven en él, además de las modificaciones causadas por la actividad humana. Los canales y cavidades que generan los animales (roedores y lombrices) e insectos (escarabajos

y avispas) en la corteza permiten el transporte o difusión de diferentes sustancias; entre las cuales están el dióxido de carbono, el oxígeno, el agua, etc.

Las bacterias, hongos, ácaros, hormigas participan en la degradación de la materia orgánica, obteniendo el **humus**. El humus tiene las funciones de reparar el suelo, necesario para la fijación de nitrógeno para las plantas, aumenta el rendimiento de los cultivos, absorbe la contaminación, etc. El humus está formado por diferentes vías de polimerización de los precursores que incluyen polifenoles, compuestos de quinonilo, azúcares reductores, sacáridos y compuestos nitrogenados. Sin embargo, sin importar qué ruta húmica se presente, la formación del humus es finalmente logrado por la condensación de compuestos nitrogenados con otros precursores. Incluso la mayoría de los estudios actuales relacionados con la formación de humus tienen como objetivo mejorar la concentración de precursores. De hecho, hay pocas investigaciones centradas en la promoción de NH^{+4} - N.

El tamaño de las partículas de los minerales que forman el suelo determina sus *propiedades físicas*: textura, estructura, capacidad de drenaje del agua y aireación. Los gránulos son más grandes en los *suelos arenosos*; son sueltos y se trabajan con facilidad, pero los surcos se desmoronan y el agua se infiltra rápidamente; y, además, tienen pocas reservas de nutrientes aprovechables por las plantas.

Las *propiedades químicas* del suelo dependen de la proporción de los distintos minerales y sustancias orgánicas que lo componen. El contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio debe ser abundante y equilibrado. La materia orgánica siempre contiene carbono, oxígeno e hidrógeno, además de otros elementos. Al descomponerse las plantas y los animales muertos a través de los microorganismos, se liberan los nutrientes al suelo facilitando su biodisponibilidad para ser usados nuevamente.

Las propiedades físicas y químicas del suelo, unidas a los factores climáticos, determinan los vegetales y animales que pueden desarrollarse y la forma en que se debe cultivar la tierra. La acidez del suelo recomendable para la agricultura debe ser de un valor de 7. Ya que los suelos muy ácidos no son recomendables para actividades de agricultura, se debe adicionar una sal, tal como el carbonato calcio, obtenido de dolomita,

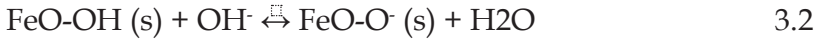
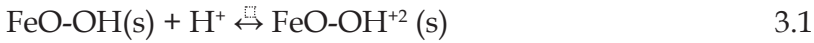
para ajustar su pH. De igual manera, un suelo muy básico se le adiciona sulfato férrico para volverlo más ácido.

La estructura del suelo depende de la forma como está agregado cada componente en el suelo y su coloración, la salinidad y la alcalinidad es debido a los minerales. Las sales se originan por la disolución de minerales, por las obtenidas de ríos o mares.

Diferentes reacciones se presentan en el suelo, que favorecen el transporte de nutrientes para las plantas. La reacción de intercambio catiónico entre el suelo y las raíces de los árboles permite que los cationes de Ca^{+2} o Mg^{+2} sean absorbidos por las raíces de las plantas, con la consecuente eliminación de hidrógeno, lo que incide en un aumento de la acidez del suelo. El transporte y las interacciones de los productos químicos disueltos en el perfil del suelo son procesos importantes que influyen en la calidad del agua subterránea y la disponibilidad de nutrientes en la zona de la raíz del suelo. La capacidad de describir la movilidad de las especies iónicas presentes en la solución del suelo es un requisito previo para ser responsable uso de productos químicos agrícolas y eliminación en tierra de desechos químicos.

La adsorción de oligoelementos sobre minerales del suelo y materia orgánica es un proceso importante que controla las concentraciones de sus soluciones. La fuerza de la adsorción a una fase sólida depende de las propiedades químicas del oligoelemento y la solución del suelo, y las propiedades superficiales de los minerales del suelo y la materia orgánica. Por lo tanto, la solubilidad y biodisponibilidad de estos elementos varían bajo diferentes condiciones ambientales.

Los óxidos metálicos hidratados de hierro (Fe), aluminio (Al) y manganeso (Mn), y los bordes fracturados de las arcillas de filosilicatos son los adsorbentes más activos de los oxianiones. Los grupos hidroxilos superficiales en los minerales del suelo desarrollan carga en función del pH y la fuerza iónica. La carga superficial puede ser positiva, negativa o sin carga. A medida que el pH disminuye, la carga positiva aumenta y la adsorción tiende a aumentar. Los grupos funcionales orgánicos cargados positivamente, como los grupos amina, también adsorben elementos traza de oxianión. El desarrollo de carga superficial positiva y negativa en los oxihidróxidos de hierro (III), como la goetita (FeOOH), se puede representar de la siguiente manera (3.1y 3.2):



donde el FeO-OH indica un grupo hidroxilo en la superficie sólida de goetita expuesta a la solución del suelo.

3.3 Meteorización o intemperismo

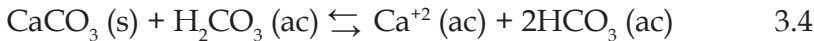
La **meteorización** se refiere a los cambios físicos, químicos o biológicos que puede tener la roca o el suelo debido a factores externos, tales como el agua, el viento, la nieve, el oxígeno, etc. Por ejemplo, algunas nieves perpetuas del Parque Nacional Torres del Paine en Chile han cambiado su paisaje debido a la fuerza de la nieve sobre sus montañas, haciendo que la montaña se divida en dos. La meteorización química puede ser hidratación, carbonatación, oxidación e hidrólisis. Algunos ejemplos de estas reacciones se presentan a continuación:

Hidratación:



Yeso anhidrita

Carbonatación:

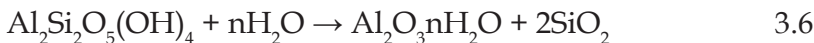


Oxidación:



óxido de hierro (hematitas)

Hidrólisis:



La **meteorización física** incluye la haloclastia, gelifración, la insolación, la alternancia humedad y la disolución. La **haloclastia** consiste en la fragmentación de la roca debido al aumento de volumen originado por los cristales salinos que se encuentran incrustados en las fisuras o poros de la roca. La **gelifración** está relacionada con los cambios internos que

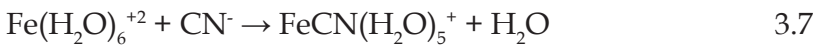
presenta una roca porosa húmeda por efecto de los cambios de temperatura, haciendo que existan cambios de volumen y tensiones que inciden en las propiedades de la roca. La **insolación** contribuye al cambio de la roca por su exposición prolongada a los rayos del sol y la **disolución** se presenta en acumulaciones de disoluciones salinas, tal como el caso de la formación de estalagmitas o estalactitas en cavernas o cuevas (ver capítulo 2).

La erosión corresponde al desgaste del suelo por la acción del agua, del viento o la acción humana. Cuando se arrastran las partículas que componen la capa fértil del suelo, el terreno deja de ser apto para sostener la vida vegetal. Adicionalmente, las prácticas agropecuarias inadecuadas favorecen la erosión o pérdida del suelo, al facilitar la acción del viento y el agua. Existen dos tipos de erosión: la **erosión natural** y la **erosión antropogénica** o causada por el hombre. Durante la erosión, el suelo pierde nutrientes, obstruye los ríos y arroyos con sedimentos y termina convirtiendo los terrenos en desiertos. En la mayoría de los casos, un suelo erosionado se puede evitar a través de procesos de reforestación, ya que los árboles cohesionan el suelo a través de sus raíces. La erosión puede variar dependiendo del grado de desgaste del suelo: entre mayor pérdida de las funciones bióticas y de los horizontes del suelo será la gravedad de la erosión.

La **meteorización biológica** puede ser **bioturbación**, **quelación**, **intercambio catiónico** y **disolución**. La **bioturbación** se produce por microorganismos (bacterias, hongos, protozoos, arqueas.), raíces de plantas, musgos y animales. Los microorganismos se transportan en las raíces de los árboles contribuyendo a las transformaciones físicas y químicas del suelo. La quelación consiste en la formación de complejos metálicos a partir de la degradación de materia orgánica por parte de los microorganismos. El nombre quelación proviene del hecho que cada especie unida al catión metálico se conoce como **quelato**. Los agentes quelantes en la rizósfera son benéficos para las plantas porque incrementan el total de cationes metálicos (nutrientes) en disolución, aumentan los gradientes de difusión y eliminan las zonas de escasez del nutriente cerca de las raíces de las plantas. En la ecuación 3.7 se puede observar la quelación del Fe^{+2} por medio del quelato-ión cianuro. Los pastos han desarrollado vías biosintéticas para las moléculas quelantes de metales de amplio espectro denominadas fitosideróforos, que incluyen ácidos muginéicos,

ácidos desoximugineicos, ácido avénico y ácido disticónico. Estrategias similares han evolucionado en muchos microbios del suelo. Las especies dentro de la *Ascomycota* y *Basidiomycota phyla* que dominan las poblaciones fúngicas de pastizales producen comúnmente sideróforos de hidroxamato que pertenecen a las clases estructurales ferricromos, fusarininas y coprógenos.

Quelación de Fe^{+2}



La **disolución** se presenta en la respiración de animales y plantas del suelo, donde se produce CO_2 , y en consecuencia se forma ácido carbónico y la reducción del suelo. Finalmente, el intercambio catiónico se presenta cuando las plantas absorben nutrientes del suelo, principalmente cationes metálicos con la liberación de H^+ , contribuyendo a la acidez del suelo.

3.4 Tipos de suelo

Un suelo agrícola está dividido por horizontes: el **horizonte A** corresponde a la materia orgánica y el humus; el **horizonte B** a la capa donde se presenta la lixiviación mineral, el **horizonte C** que es la roca fragmentada y degradada y el **horizonte D** que es la roca madre. El suelo agrícola puede estar presente en zonas protegidas como páramos, bosques y parques naturales, lo cual reduce su uso para la agricultura. Esto crea la necesidad de conservar el suelo y de buscar estrategias para su renovación. El suelo puede dividirse dependiendo del diámetro del material de partículas entre arcilla, limo, arena, grava y guijarros (ver Tabla 3.1).

Tabla 3.1
Componentes de un suelo agrícola según su diámetro*

Nombre	Diámetro (mm)
Arcilla	<0.002
Limo	0.002 - 0.005
Arena	0.005 - 2
Grava	2 - 20
Guijarros	>20

* Tomado y adaptado de S. Zhong, C. Wei, J. Ni, D. Xie and C. Ni. Characterization of clay rock-derived soils containing multi-mineral sand particles in upland areas of Sichuan Basi, China. *Catena*, vol 194, pp. 1-13, 2020.

La arcilla se adhiere a los dedos, es cohesiva (pegajosa), es moldeable, tiene una alta plasticidad y tiene una superficie brillante luego de apretarla entre los dedos. La arcilla está constituida por montmorillonita $\text{Ca}_{0,2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, muscovita $(\text{K,Ca,Na})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, cristobalita SiO_2 y cuarzo, SiO_2 . El limo se adhiere a los dedos; pero no es pegajoso, es débilmente moldeable, tiene una superficie áspera y rasposa luego de apretarlo entre los dedos y una sensación harinosa (como el polvo del talco). La arena no se puede moldear, no se adhiere a los dedos y se siente muy granuloso. Un suelo rocoso no posee horizonte A ni B por lo que la roca se puede apreciar directamente en la superficie. Son suelos duros e impermeables, por lo que siempre permanecen secos. Un suelo arenoso no presenta horizonte A, tiene sus partículas muy finas, por ende, son muy porosos y dejan pasar el agua con facilidad, sin retenerla. Ejemplos de éstos hay en el mundo, como los desiertos de Sahara, Gobi y la Guajira. Al ser la arena tan fina es fácilmente arrastrada por el viento generando diferentes acumulaciones, conocidas como **dunas**. El viento a través de cientos de años ha arrastrado y transportado la arena del desierto del Sahara a través del Océano Atlántico para generar las playas del mar Caribe. Un suelo arcilloso posee una textura blanda y son más compactos que los arenosos, son menos permeables, y retienen más la humedad, tal como el “desierto” de la Tatacoa en el Huila. Un suelo orgánico se caracteriza por poseer abundante materia orgánica en su superficie, lo que los hace permeables y esponjosos. De esta manera retienen mucha humedad y son muy fértiles.

El suelo minero está constituido por rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas. Las rocas ígneas se formaron por endurecimiento del magma; las rocas sedimentarias se formaron por restos de materia orgánica e inorgánica y que con el tiempo forman sedimentos o capas y las rocas metamórficas están constituidas por rocas ígneas y sedimentarias que se han transformado mediante cambios físicos y químicos como la presión, temperatura y la erosión. Estos cambios que se presentan en las rocas se conocen como el ciclo de la roca (ver Figura 3.2).

Un suelo agrícola es necesario para el crecimiento adecuado de plantas que requieren materia orgánica, agua y determinados minerales, a través de la absorción de nutrientes usando sus raíces. Algunos de los minerales más abundantes son la ortoclasa $(\text{KAlSi}_3\text{O}_8)$, el cuarzo (SiO_2) , la albita $(\text{NaAlSi}_3\text{O}_8)$, la epidota $(4\text{CaO} \cdot 3(\text{AlFe})_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O})$, la geotita

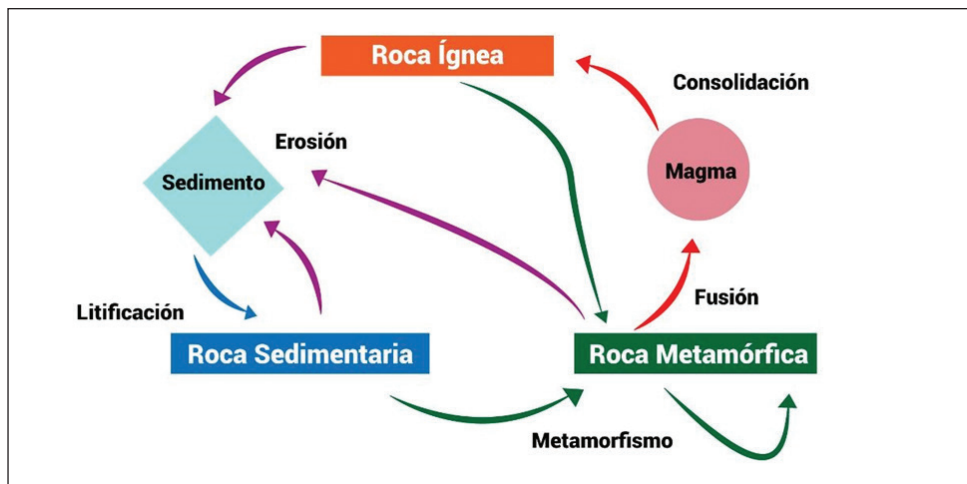


Figura 3.2. El ciclo de la roca. Tomado y adaptado de S. E. Manahan. Introducción a la Química Ambiental. Madrid: Editorial Reverté, 2011, pp. 725.

(FeO(OH)) y la magnetita (Fe_3O_4). Las evaporitas, tales como, NaCl, KCl, Na_2SO_4 y CaSO_4 son solubles en agua, pero precipitan en condiciones ácidas. Un resumen de los principales grupos clasificados de acuerdo con su grupo funcional se encuentra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2
Principales grupos de minerales en el suelo

Grupo de minerales	Ejemplos	Fórmula
Silicatos	Cuarzo	SiO_2
	Olivino	$(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$
	Feldespato de Potasio	KAlSi_3O_8
Óxidos	Corindón	Al_2O_3
	Magnetita	Fe_3O_4
Carbonatos	Calcita	CaCO_3
	Dolomita	$\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3$
Sulfuros	Pirita	FeS_2
	Galena	PbS
Sulfatos	Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Haluros	Halita	NaCl
	Fluorita	CaF_2
Elementos nativos	Cobre	Cu
	Azufre	S

Tomado de H.D. Belitz and W. Grosch. Minerals. In: Food Chemistry. Springer, Berlin, Heidelberg, 1999, pp. 395-401.

Las plantas consiguen del aire y del agua algunos elementos que necesitan, como el carbono, el hidrógeno y el oxígeno. Otros nutrientes esenciales están en el suelo: aquellos que los vegetales requieren en grandes cantidades se llaman nutrientes principales. Son el nitrógeno, el fósforo, el potasio, el calcio y el magnesio. Proceden de las rocas que dieron origen al suelo y de la materia orgánica descompuesta por los microorganismos. Los nutrientes deben estar siempre presentes en las cantidades y proporciones adecuadas.

La materia orgánica del suelo se puede clasificar como

- a) humus
- b) grasas, resinas y ceras
- c) azúcares
- d) compuestos orgánicos que contienen nitrógeno
- e) compuestos orgánicos que contienen fósforo

El **humus** es el producto de la descomposición de la materia orgánica realizada, principalmente, por organismos que habitan en el suelo como las lombrices y microorganismos (hongos y bacterias). La composición química del humus es carbono, hidrógeno y oxígeno y su característica más importante es la de ser un depósito de nitrógeno en el suelo, lo cual es necesario para la planta. Las **grasas, resinas y ceras** son los lípidos presentes en los organismos vivos; constituyen una pequeña proporción de la materia orgánica en el suelo. Los lípidos al ser **hidrofóbicos** (no solubles en agua) podrían ser fitotóxicos cuando son absorbidos por las plantas. Los **azúcares**, tales como el almidón, celulosa y hemicelulosa, son la fuente principal de alimento para los microorganismos del suelo y ayudan a estabilizar los agregados del suelo. Las proteínas y aminoácidos son los principales compuestos que contienen nitrógeno y los ésteres de fosfato y fosfolípidos los compuestos orgánicos que contienen fósforo, siendo las fuentes orgánicas de nutrientes para las plantas de nitrógeno y fósforo, respectivamente.

Entre las características más importantes de un suelo fértil se encuentran su consistencia y profundidad que permiten un buen desarrollo y fijación de las raíces, los nutrientes necesarios, su capacidad de absorber y retener agua, su porosidad que permita una apropiada aireación y no tener sustancias tóxicas. Una característica importante de los suelos fértiles es la facilidad de que pueda presentarse la **lixiviación natural**

(ver Figura 3.3) a través de sus horizontes A y B que permita el transporte adecuado de los nutrientes al suelo. El inconveniente de este fenómeno se presenta con las actividades de agricultura, cuando el hombre adiciona agroquímicos en exceso generando lixiviados que luego van a contaminar suelos o fuentes de aguas subterráneas. También se conocen como lixiviados a los contaminantes generados en rellenos sanitarios o los productos generados por acumulación en el suelo de subproductos de la agricultura, tal como las cáscaras de cacao, café u otros. En la mayoría de los casos, se aplican diferentes tratamientos para disminuir las sustancias tóxicas en los lixiviados agrícolas. El método más común es la biorremediación, que consiste en usar microorganismos con funciones específicas para la degradación o bioacumulación de la sustancia de interés.

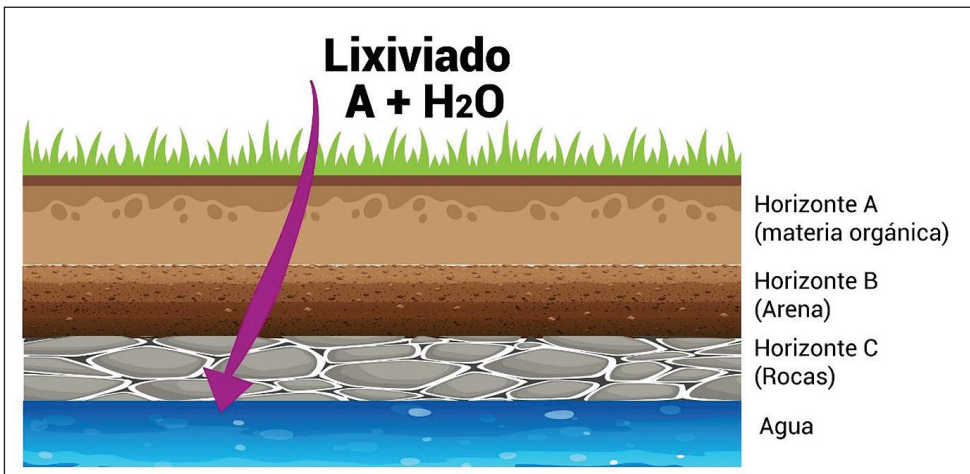


Figura 3.3. Lixiviación natural de un componente a través del suelo. Fuente propia.

3.5 Macronutrientes y micronutrientes

Los elementos reconocidos como macronutrientes necesarios para las plantas son el carbono (C), el hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca), potasio (P), magnesio (Mg) y azufre (S). Mientras que el C, H y O se obtienen del aire a través de la fotosíntesis; los otros elementos se obtienen del suelo.

Sobre la base de sus funciones, los macronutrientes se han clasificado en dos grupos: macronutrientes primarios, es decir, N, P y K, y macronu-

trientes secundarios, es decir, Ca, Mg y S. Las cantidades necesarias de los macronutrientes dependen de cada planta cultivada y de las características del suelo.

Los macronutrientes primarios y secundarios desempeñan un papel importante durante toda la vida de la planta, ya que realizan diversas actividades beneficiosas en su metabolismo; además de protegerla de diversos agentes abióticos y bióticos, como la contaminación con los metales pesados, la sequía, el calor, las radiaciones UV, las enfermedades y los ataques de plagas.

En general, mientras que las cantidades de Ca, Mg y K intercambiables aumentan en el suelo mientras aumenta su PH; las cantidades de N y P disminuyen. El nitrógeno hace parte de las proteínas y enzimas de las plantas; el potasio se requiere para el crecimiento de la planta. El Ca es esencial, no sólo para corregir la acidez del suelo sino también es un nutriente necesario para el crecimiento adecuado de la planta.

Las deficiencias de estos macronutrientes en las plantas ocasionan cambios en sus características. Cuando las plantas tienen deficiencias en nitrógeno, se atrofian y aparece una coloración amarilla en las hojas más viejas. La deficiencia de fósforo produce un retraso en el crecimiento de las plantas y una pigmentación púrpura o rojiza en las hojas mayores. Las plantas deficientes de potasio también se desarrollan lentamente, ocasionan necrosis de los márgenes de las hojas más viejas y un sistema deficiente de raíces.

Los **micronutrientes** son boro, cloro, hierro, zinc, molibdeno y manganeso. La mayoría de estos componentes pueden estar conformando enzimas; aunque el hierro, el manganeso, el zinc y el cloro pueden participar en la fotosíntesis. Las plantas necesitan pequeñas cantidades de estos micronutrientes ya que en exceso pueden limitar su crecimiento en el suelo. El contenido de varios micronutrientes en las plantas varía según las especies y variedades de plantas y depende del suministro total de micronutrientes en los suelos y de los factores que controlan su disponibilidad para las plantas. Por lo tanto, los límites críticos de deficiencia o toxicidad establecidos para una especie de planta no se pueden aplicar a otras, y sería necesario desarrollar diferentes sistemas de interpretación analítica para casi todas las especies de plantas. Algunos valores estimados para el maíz son los siguientes: B (0.5 -5 ppm); Cu (1.0-25 ppm); Fe (30-35 ppm); Mn (2-220 ppm) y Zn (1.5 - 30 ppm).

3.6 Fertilizantes

Los fertilizantes son preparados a partir de minerales o productos químicos, considerando los requerimientos del suelo y de la planta a cultivar. Los fertilizantes son los nutrientes primarios usados en la agricultura moderna para mejorar los rendimientos del cultivo. El hecho de que la adición de fertilizantes puede aumentar la productividad ha sido reconocido durante mucho tiempo por varios autores. Se cree que la incorporación de sólo el fertilizante puede incrementar el rendimiento en un 40 % en las actividades de producción agrícola, generando contribuciones significativas para la seguridad alimentaria. Con el uso eficiente de fertilizantes, se puede alcanzar un incremento en el rendimiento del cultivo del 50-70% cuando se usa sólo nitrógeno y un 10-15% cuando es fósforo. La mayor parte de las investigaciones actuales han demostrado que la adición de fertilizantes puede alterar las propiedades del suelo, el ciclo del nitrógeno del suelo y las reservas de carbono del suelo, lo que puede dar lugar a una disminución en la diversidad de especies y grupos funcionales. Además, los cambios en la biomasa aérea están acompañados por cambios en los procesos microbianos del suelo, que están estrechamente relacionados con su fertilidad. Sin embargo, la adición de fertilizantes también puede causar problemas ambientales como la lixiviación de nutrientes, la contaminación de las aguas subterráneas, la eutrofización y la acidificación del suelo. En algunos casos, los fertilizantes presentan trazas de metales pesados o de otros componentes que pueden deteriorar el suelo. Este es el caso de la roca fosfórica (una fuente rica de fósforo que se aplica sola o en mezcla) que puede contener metales pesados, tales como Cd, Pb y Hg. Cualquiera de los fertilizantes que se utilicen tendrán tres elementos principales: nitrógeno, fósforo y potasio, y para poder elegir la composición adecuada se debe conocer qué efecto tendrá cada uno de ellos en el cultivo. La urea ($\text{H}_2\text{N-CO-NH}_2$) es la principal fuente para proporcionar nitrógeno; la roca fosfórica (P_2O_5) o mezclas derivadas para proporcionar fósforo.

A modo de resumen, podemos encontrar que el nitrógeno promueve la coloración de las hojas verdes y la ausencia de este elemento puede ocasionar que las plantas tengan un color amarillento y las hojas se vean con aspecto viejo y desgastado; el fósforo promueve la proliferación de células sanas y es recomendado, por ingenieros agrícolas, aplicarlo justo antes de la floración; y el potasio ayuda a mantener las raíces

sanas, así que su ausencia en el suelo hace que la planta crezca débil y lentamente.

3.7 Plaguicidas

Según la EPA (*Environmental Protection Agency*), los plaguicidas, son: "Cualquier sustancia o mezcla de éstas que tenga por objeto prevenir, destruir, repeler o mitigar cualquier tipo de insecto, roedor, nemátodo, hongo, yerba o cualquier otra forma de vida declarada como plaga. También, cualquier sustancia o "mezcla hecha para ser usada como regulador de plantas, defoliante, o deshidratante". La clasificación del tipo de plaguicida depende de la plaga a controlar; así insecticidas para controlar insectos, fungicidas para hongos, herbicidas para malezas, rodenticidas para ratas y nematicidas para nematodos. La clasificación según las características químicas de los pesticidas es organoclorados, organofosforados, carbamatos y piretroides (ver Figura 3.4).

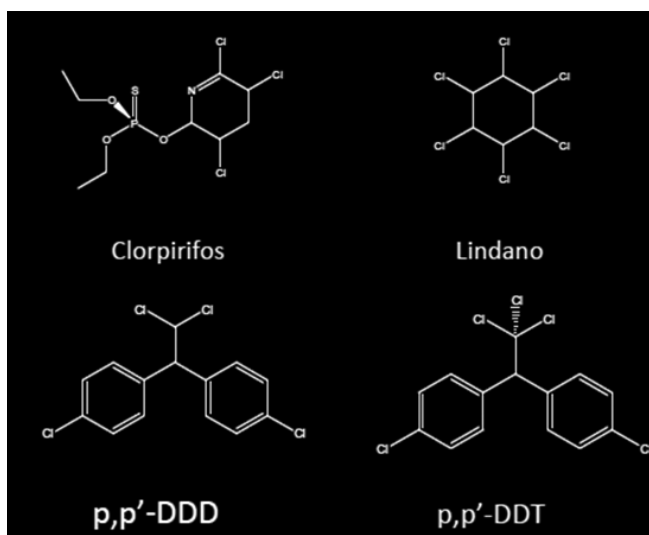


Figura 3.4. Ejemplos de plaguicidas organofosforados y organoclorados. Fuente propia.

Los pesticidas organoclorados como el p,p'-DDD o DDT fueron sintetizados en la década de los 40. En un principio, estos pesticidas fueron considerados como benéficos para el hombre y en muchos países se promovía su uso, incluso como fumigante para el ser humano, como una forma de combatir enfermedades venéreas. Es el caso del reporte de

audio de Winston Churchill quien animaba a los militares a usarlos antes de partir a la segunda guerra mundial. Muchos de estos plaguicidas organoclorados fueron usados durante mucho tiempo en EE.UU hasta que fueron prohibidos en 1972; sin embargo, lo siguieron vendiendo a otros países en Latinoamérica y África, donde sus gobiernos los prohibieron muchos años después. Luego, cuando la legislación de cada uno de estos países los prohibía, muchos de estos pesticidas fueron almacenados de la manera inadecuada: recipientes de cartón, cerca de fuentes acuíferas o sin las normas de prevención de riesgos pertinentes.

La mayoría de los pesticidas organoclorados han sido reportados en la literatura como potencialmente bioacumulables (pueden persistir en el ambiente durante más de 15 años) y con una alta toxicidad, en algunos casos carcinógenos o mutagénicos. Debido a esto, han sido sustituidos por los pesticidas organofosforados; aunque éstos últimos son más tóxicos y su persistencia en el ambiente es de sólo semanas.

Aproximadamente el 47% del pesticida aplicado a los cultivos se deposita en suelos, agua y aire. El porcentaje incrementa dependiendo del modo de aplicación del pesticida. En algunos países aún se aplica desde avionetas causando gran dispersión del pesticida en el ambiente. La EPA ya ha hecho recomendaciones sobre este tipo de práctica considerándola nocivas para el ambiente. Por ejemplo, en algunos lugares de Colombia, donde se cultiva arroz, se usan plaguicidas cuyo ingrediente activo es el clorpirifos y su modo de aplicación se hace en avioneta, práctica que ha sido prohibida por la EPA.

Los pesticidas son sustancias fotoestables, térmicamente no lábiles y no biodegradables por lo que su persistencia en el ambiente contribuye a aumentar los peligros para el ambiente y la salud humana. Hace algunos años se confirmó la relación del uso de plaguicidas en el hogar con la leucemia infantil, lo que hace que cada vez existan mayores restricciones en el uso y modo de aplicación de los plaguicidas.

Un caso bastante sonado en la opinión pública en el uso recurrente del glifosato, un herbicida conocido comercialmente como *Roundup* y que ha sido objeto de polémica por su actividad carcinogénica. En el caso de Colombia, lo siguen usando ampliamente en la erradicación de cultivos de coca y son aplicados desde avioneta por las dificultades de acceso a estos lugares. Esto ha significado una cantidad de conflictos socio-eco-

nómicos y ha incidido en la salud de las comunidades aledañas a estas regiones de fumigación. Incluso en el año 2007, Colombia tuvo un conflicto con Ecuador por fumigaciones con glifosato en la frontera causando daños en otros cultivos. El caso llegó a la Corte Penal internacional de justicia y el estado colombiano tuvo que pagar 15 millones de dólares por indemnización a Ecuador. Este caso se trae a colación para dar una muestra del reconocimiento internacional de los daños que hace el glifosato en el suelo y la salud; pero aun así existen intereses políticos y económicos en seguirlo usando.

3.8 Ingeniería genética y productos transgénicos

El término ingeniería genética se usa para describir el proceso mediante el cual se puede alterar la composición genética de un organismo utilizando "tecnología de ADN recombinante (RDT)". Esto implica el uso de herramientas de laboratorio para insertar, alterar o cortar fragmentos de ADN que contienen uno o más genes de interés. Existen ya investigaciones en animales con fines industriales, por ejemplo, la seda de la araña tiene propiedades únicas pero pensar en cultivar arañas con fines industriales se hace impensable, sobre todo porque las arañas son carnívoras; sin embargo, unos investigadores de la Universidad Estatal de Utah encontraron una solución desde la ingeniería genética: extrajeron el gen encargado de producir la seda en la araña y lo introdujeron en la información genética de las cabras de granjas para producir leche con seda. La población de cabras aún es pequeña; pero el proyecto ha llamado mucho la atención de empresas que quieren financiarlo y escalarlo a nivel industrial.

En el caso de la agricultura, la modificación genética de diversos cultivos se ha hecho de una forma natural a través de cientos de años y con la intervención del hombre por medio de cruces de plantas o con la selección de las mejores semillas para una nueva siembra, cambiando la apariencia del producto final. Este es el caso del maíz que consumimos -hoy en día- que es más grande y con una gran diversidad de especies, y que dista mucho del maíz consumido por los pueblos indígenas de América. En algunos otros casos también se han hecho cruces de plantas para aumentar el crecimiento de la producción, tenemos ejemplo como el arroz, café y frutas. A pesar de las anteriores estrategias y con la intención de aumentar el rendimiento de los cultivos, en la agricultura se

han desarrollado otro tipo de alimentos conocidos como los **productos transgénicos**. Estos alimentos son modificados genéticamente mediante la incorporación de genes de otros organismos para producir las características deseadas. Muchos alimentos, tales como el arroz, el maíz, la soya se han modificado usando información genética de virus o bacterias para hacerlos más resistentes a las plagas. El argumento más usado en la producción de alimentos de esta forma es la necesidad de producir rápido y en grandes cantidades. Sin embargo, existen bastantes críticas para esta estrategia en la obtención de alimentos, entre los cuales tenemos:

- Los riesgos sanitarios a largo plazo de los transgénicos presentes en nuestra alimentación o en la de los animales cuyos productos consumimos no han sido analizados y su alcance sigue siendo desconocido. Nuevas alergias, y aparición de nuevos tóxicos son algunos de los riesgos que corremos al consumirlos. Investigaciones de este tipo requieren años de estudio y muchos productos transgénicos ya existen en el mercado, lo cual no ha permitido el tiempo suficiente para estas investigaciones.
- Una vez liberados al medio ambiente, los cultivos transgénicos no se pueden controlar. La contaminación genética pone en peligro las variedades y especies cultivadas tradicionalmente, y es irreversible e impredecible, ya que no se puede volver a la misma situación de partida.
- Muchos productos transgénicos no permiten que las semillas germinen, lo cual incide en una problemática social y económica para el agricultor y hace que se pierda la herencia genética y tradicional obtenida a través de cientos de años, favoreciendo a unos pocos monopolios productores de semillas transgénicas.

3.9 Agricultura sostenible

La biodiversidad es la suma de todos los ecosistemas, especies y diversidad genética terrestre, marino y otros acuáticos. Incluye la variabilidad dentro y entre los organismos vivos y los complejos ecológicos de los que forman parte. El desafío clave de hoy es cómo aumentar la producción para satisfacer la creciente demanda de alimentos, piensos y bioenergía, a la vez que se conserva la biodiversidad y se reduce la presión

sobre los recursos naturales y los ecosistemas. La agricultura sostenible es aquella que, a largo plazo, contribuye a mejorar la calidad ambiental y los recursos básicos de los cuales depende la agricultura, satisface las necesidades básicas de fibra y alimentos humanos, es económicamente viable y mejora la calidad de vida del productor y toda la sociedad. Teniendo en cuenta el efecto perjudicial de la aplicación continua de fertilizante mineral en la estructura del suelo, la agricultura orgánica podría considerar un reemplazo adecuado del fertilizante inorgánico para mejorar la población microbiana y la materia orgánica del suelo. Un manejo sostenible de los agroecosistemas queda definido por una equilibrada combinación de tecnologías, políticas y actividades, basada en principios económicos y consideraciones ecológicas, a fin de mantener o incrementar la producción agrícola en los niveles necesarios para satisfacer las crecientes necesidades y aspiraciones de la población mundial en aumento, pero sin degradar el ambiente.

Hace 28 años la Comisión Brundtland acuñó el término desarrollo sostenible, entendido como aquel que satisface las necesidades de la actual generación sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

La conservación de los recursos productivos y del medio ambiente constituyen las dos exigencias básicas de la variable ecológica de la agricultura sostenible. La oferta de alimentos sanos y seguros a un costo razonable de los sistemas de producción son las dimensiones socioeconómicas de la agricultura sostenible.

Un buen ejemplo de aplicación de una agricultura sostenible se hizo en Cuba. En esta isla se ha logrado implementar una agricultura orgánica auspiciada por un movimiento cooperativo agrícola fuerte. Cuba alivió su economía ante el bloqueo de Estados Unidos importando la mayoría de sus insumos (fertilizantes y combustibles) desde la unión soviética. Cuando la unión soviética se desintegró en 1991, Cuba tuvo que implementar políticas de desarrollo de su agricultura urbana y sostenible, siendo el único país que produce casi el 90% de sus alimentos para consumo local. Así que uno de los más notables proyectos actuales de Cuba fue expandir sus prácticas agroecológicas, o su sistema de agricultura basada en principios ecológicos y conciencia ambiental, a toda la isla.

3.10 Monocultivos

Los **monocultivos** son grandes extensiones de tierra dedicadas al cultivo de una sola especie. En la historia de la agricultura se presentaron de una manera silvestre diferentes cultivos, tales como el sorgo, los pastos, el arroz, el trigo entre otros. Estos monocultivos silvestres han predominado en diferentes áreas, de una manera natural, haciendo que no germine ninguna otra especie y conservando el suelo durante mucho tiempo. Por ejemplo, el caso de las plantaciones de arroz silvestre (*Oryza coarctata*) que crecen en los pantanos de Asia y que son regados por los ríos provenientes del Himalaya, que al ser ricos en nutrientes han preservado este cultivo durante mucho tiempo sin grandes alteraciones.

Con base en estas experiencias naturales y con la necesidad de incrementar la producción de alimentos con la cada vez mayor demanda de la población, muchos países en vías de desarrollo vieron el monocultivo como una estrategia de desarrollo. Sin embargo, este modelo implementado en los últimos 30 años está siendo duramente cuestionado por un amplio sector de la sociedad científica, por sus graves impactos sociales, ambientales y económicos. Un caso muy característico de cómo puede afectar un monocultivo, sucedió en la provincia chilena de Petrorca, donde se usaron grandes extensiones de terreno para un monocultivo de aguacate. Estos cultivos necesitan grandes cantidades de agua para riego, lo que incidió en una problemática de escasez de agua, ya que en la región escaseaba este recurso y el suelo usado no tenía las características adecuadas para el cultivo.

Otros ejemplos de estos monocultivos son el maíz en algunas partes de América, eucalipto en España, banano en Centroamérica y la palma africana en Colombia. Algunos de los impactos negativos a considerar dentro de la técnica del monocultivo son los siguientes:

- La expansión de la frontera agrícola bajo el modelo del monocultivo significó, en diferentes regiones de América Latina, altas tasas de deforestación, eliminación de la cobertura vegetal, pérdida de la fertilidad del suelo y erosión de grandes áreas naturales.
- La intensificación del uso del suelo llevó a un mayor requerimiento de fertilizantes sintéticos de diferentes tipos como fuente de

nutrientes, provocando problemas en la fertilidad química como la acidificación y la salinización del suelo, y pérdida de su fertilidad biológica.

- La homogenización del sistema productivo, propio del monocultivo, automáticamente significó la reducción de los componentes productivos del predio, generando la pérdida de biodiversidad y la erosión genética.
- El uso del paquete tecnológico de la agricultura convencional es causante de los problemas de contaminación en los suelos, el agua y el aire. La contaminación agroquímica repercute directamente en la salud de la población, ya sea al estar expuestos o por consumir alimentos con residuos. Por ejemplo, los plaguicidas anualmente causan un aproximado de 3 millones de intoxicaciones y 220.000 muertes en el mundo, según la organización mundial de salud.
- Con la expansión de la agricultura de monocultivos se extendió ampliamente el uso de los agroquímicos, provocando el incremento de la resistencia de los insectos a los plaguicidas en los últimos 50 años. Algunos autores estiman que, de 25 especies de insectos resistentes a los plaguicidas reportados en 1954, a inicios de la década de los 90' éstos habían aumentado a más de 500 especies.
- Asimismo, este modelo se ha convertido en uno de los causantes primarios del desequilibrio de los agroecosistemas con altos costos sociales y ambientales. Sólo en los Estados Unidos se estiman que los costos causados por el uso de plaguicidas representan más de ocho mil millones dólares, anualmente.
- La nutrición y la seguridad alimentaria han estado relacionadas directamente con la diversidad productiva y con la expansión del monocultivo, los riesgos nutricionales en los diferentes grupos sociales se han hecho más evidentes.
- Con el monocultivo la estabilidad económica de los productores es vulnerable por la inestabilidad de los precios en el mercado y por los riesgos ambientales. En este sentido la diversificación representa una estrategia que permite mitigar estos riesgos.

3.11 Fracturación hidráulica o *Fracking*

El *fracking* o fracturación hidráulica es una técnica no convencional usada durante más de 65 años para extraer el gas y el petróleo del subsuelo, a través de la ruptura de **esquistos** y otras formaciones de roca. La perforación se hace a través de un pozo entubado y cementado hasta una profundidad de un kilómetro, para luego hacer pequeñas perforaciones a nivel horizontal usando una mezcla típica de agua (90%), arena (9,5%) y aditivos químicos (0,5%). Algunas de estas sustancias químicas usadas en la fracturación incluyen ácido clorhídrico, N,N-dimetil formaldehído, persulfato de amonio y sales de borato. La cantidad y el tipo de

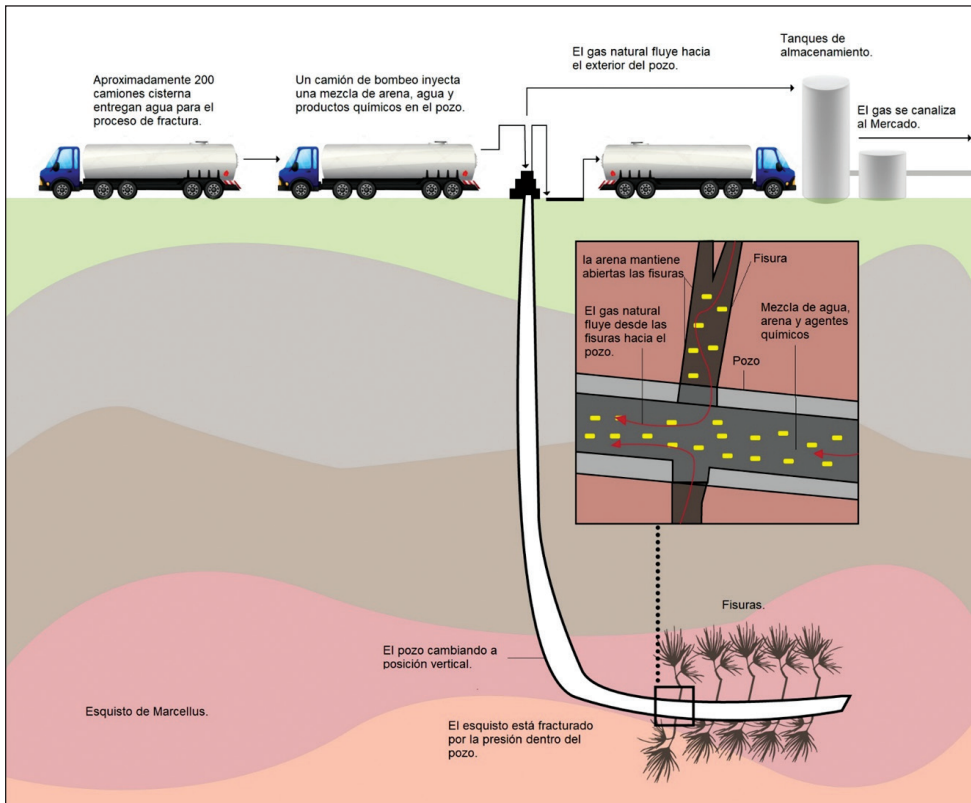


Figura 3.5. Fracturación hidráulica o fracking. Tomado y adaptado de D. Healy. (2012). Hydraulic Fracturing or 'Fracking': A Short Summary of Current Knowledge and Potential Environmental Impacts: A Small Scale Study for the Environmental Protection Agency (Ireland) under the Science, Technology, Research & Innovation for the Environment (STRIVE) Programme 2007 - 2013. Environmental Protection Agency (Ireland) [online]. Available: www.epa.ie

sustancias químicas dependen de la legislación de cada país, ya que, en algunos casos, las empresas no están obligadas a informar la totalidad de los aditivos usados.

Las estimaciones del volumen de agua requerido para el *fracking* varían entre 90000 y 1350000 litros por pozo. Las grandes cantidades de agua necesarias se deben en parte a la gran variación de la vida útil del pozo, con operaciones que pueden durar sólo cuestión de días a otras que alcanzan muchos años. La extracción local de agua de pequeñas cuencas podría tener un impacto en la ecología e hidrología de los ríos en estas áreas. Por esta razón, encontrar fuentes sostenibles para estos volúmenes de agua es claramente un desafío.

Entre los riesgos del *fracking* se encuentra la eventual contaminación del agua subterránea, ya sea por escape de los aditivos químicos usados, así como por fugas de metano o del gas que se extrae de la roca de esquisto. También destaca que la primera porción del entubamiento en el caso del *fracking* debe estar recubierta de una triple capa de acero y cemento para proteger los acuíferos más superficiales, que la capa de roca de esquisto (ver **Figura 3.5**).

3.12 Minería

La minería es la actividad que se usa para la explotación y procesamiento de materiales del subsuelo o suelo con fines industriales, tales como: caliza para cemento, carbón mineral para combustible, extracción de metales (Au, Ag, tierras raras, etc), materiales de construcción como arena y grava y piedras preciosas como la esmeralda, rubí y otras. La minería explota estos **recursos No renovables** usando diferentes procesos dentro de los que se incluye la extracción, almacenamiento, procesamiento, transporte y transformación de los minerales.

La minería puede afectar cuerpos de agua, aire, suelo, de flora y fauna. El impacto ambiental depende del tipo de mineral a extraer, ya que se pueden generar vertimientos, exposición, emisión o una disposición de residuos inadecuada. Las aguas superficiales y subterráneas se pueden contaminar con metales, elementos, microorganismos provenientes de los desagües; el aire podría contaminarse con material particulado cuando se extrae materiales de construcción, emisiones de SO² con metales pesados, incluyendo plomo, mercurio y cadmio y los suelos cuando se

precipitan algunas sustancias tóxicas suspendidas en las emisiones atmosféricas. Las sustancias químicas usadas o producidas en la actividad minera dependen del mineral a explotar.

La problemática ambiental de la actividad minera es un tema álgido, ya que más del 90% de la población mundial usamos metales en los accesorios que se usan: celulares, relojes, medio de transporte, etc. Así que decir qué la minería no se debería hacer, sería ir en contra del desarrollo tecnológico y el estilo de vida de más de 6000 millones de personas. Sin embargo, la necesidad de explotar los minerales en toneladas y en el menor tiempo posible para satisfacer la demanda mundial, ha traído mayores problemas que los que ya se tenían como la minería tradicional.

Este es el caso de la **minería a cielo abierto** que es una manera de explotar a gran escala los recursos naturales. Esta estrategia de explotación representa grandes impactos negativos sociales, ambientales, visuales, humanos y culturales, ya que se basa en la explotación de recursos *no renovables* encontrados debajo de la corteza superficial de la tierra y su grado de impacto depende del tipo de mineral que se pretenda extraer.

Existen diversas técnicas para practicar esta actividad, una de ellas es la aplicación de químicos para la lixiviación del terreno mediante el uso de **cianuro, mercurio y ácido sulfúrico**, estas sustancias son altamente tóxicas y se encargan de disolver los compuestos indeseados, con el objetivo de obtener los minerales que se desean extraer de la tierra; se ejecuta en extensas áreas de terreno, se crean cráteres de grandes diámetros y se van profundizando a medida que se avanza en el proceso. La mayoría de las veces, las empresas de minería a cielo abierto no están obligadas a tapar los cráteres, lo que hace que el viento arrastre material particulado a la atmósfera.

El método de minería a cielo abierto genera **enormes impactos ambientales** en el territorio sobre el cual se desarrolla, algunos de éstos son:

1. *Daños a la superficie de la tierra, destruye y cambia* la forma de la corteza terrestre, formando grandes cantidades de material de desecho, alterando la morfología local.
2. *Contamina el aire*, durante esta actividad se generan grandes cantidades de materia fina “polvillo” tóxico, constituidos por químicos pesados que son absorbidos por animales y seres humanos.

3. *Contaminación de las aguas superficiales*, si los residuos químicos no son debidamente tratados y almacenados pueden filtrarse hasta los caudales de agua fresca, contaminándolos y disminuyendo la vida presente en los mismos.
4. *Daños a acuíferos subterráneos*, los desechos contaminados suelen ser lavados por el agua de lluvia, la cual se filtra hacia el subsuelo, ocasionando la contaminación de los yacimientos de **agua subterráneos**.
5. *Impactos sobre la flora y fauna*, el proceso de excavación elimina todo tipo de flora existente en la corteza terrestre, además los animales se ahuyentan por el ruido, cambios en su hábitat y contaminación de fuentes de agua.
6. *Conflictos entre comunidades y empresas*, las comunidades aledañas se ven afectadas y pueden generarse disputas por el **uso indebido** de las tierras, además de la posible sobrepoblación debido a la nueva fuente de trabajo.
7. *Cambios visuales*, luego de terminada la explotación quedan **inmensos cráteres** en el área, disminuyendo el atractivo de la zona, afectando negativamente el turismo.

3.13 Contaminantes del suelo

La contaminación del suelo se caracteriza por aquellas sustancias que puedan alterar los ciclos biogeoquímicos y simultáneamente puedan aparecer cantidades anómalas de determinados componentes que originan modificaciones importantes en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. El grado de **vulnerabilidad** (grado de sensibilidad del suelo) depende del **poder de amortiguación** del suelo, es decir, de la capacidad que tiene el suelo de inactivar los efectos negativos del contaminante. El suelo tiene diferentes actores bióticos que pueden absorber o degradar un contaminante dependiendo de la susceptibilidad que tenga frente al contaminante, esta situación es conocida como **biodisponibilidad**. Algunos ejemplos de contaminantes (algunos ya vistos en detalle) son los metales pesados (Cd, Hg, Pb...), vertidos ácidos o de hidrocarburos, agroquímicos (fertilizantes en exceso y plaguicidas) y agua del mar usada para riego.

3.14 Métodos de análisis de parámetros de calidad de suelo

La calidad del suelo se define con base en la determinación de varios parámetros tales como, pH, conductividad eléctrica, humedad y ceniza, determinación de Fe^{+2} , de fósforo. Algunos de estos parámetros ya fueron estudiados en el capítulo 2 por lo que no hay necesidad de volverlos a estudiar. Sin embargo, sí hay algunas consideraciones generales que se deben tener en cuenta en el análisis de suelos, tales como: mantener la misma cantidad de muestra en el momento de los diferentes análisis; disolver las muestras de suelo en la misma cantidad de agua y agitar durante un tiempo para aumentar la solubilidad de los iones de interés.

En la determinación de humedad y cenizas, que es un análisis muy común para suelos, se usa una estufa para humedad y un horno a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ para cenizas. En el caso de la determinación de humedad, se lleva una muestra de suelo con peso conocido a sequedad usando la estufa a 100°C , durante dos horas. La diferencia de peso de la muestra del suelo me indica el porcentaje de humedad. El análisis de cenizas es similar sólo que se usa un horno a 500°C para encontrar la cantidad de ceniza que permanece y de esta manera encontrar la cantidad de materia orgánica que se quemó.

La medición del contenido de humedad del suelo se puede clasificar en métodos directos e indirectos. Los métodos directos tienen una alta precisión, pero también son destructivos y, por lo tanto, no repetitivos, como el método descrito anteriormente. Los métodos indirectos, por otro lado, se basan principalmente en mediciones con sensores no destructivos. La reflectometría de dominio de tiempo (TDR), la reflectometría de dominio de frecuencia (FDR), el sensor capacitivo y de resistividad son los más populares para medir indirectamente la humedad del suelo. TDR y FDR tienen una alta resolución temporal, pero su implementación es costosa y lo hace insostenible. El sensor de resistividad es económico de implementar con una salida del sensor de manera inequívoca y directa, mientras que proporciona mediciones relativamente precisas.

El contenido de humedad del suelo es un índice útil para tomar decisiones de manejo para la agricultura y la vegetación natural porque influyen en la variedad de procesos relacionados con la producción agrícola, el crecimiento de las plantas, los cambios en los regímenes hidrológicos, así como una variedad de procesos del suelo. El contenido de humedad del suelo actúa como un nutriente y sirve como solvente para otros nu-

trientes y tiene un impacto significativo en el crecimiento de las plantas, la evaporación, la descomposición microbiológica de la materia orgánica y la percolación del suelo.

Desde el punto de vista de la agricultura, el contenido de humedad del suelo es esencial para muchas aplicaciones, como la programación del riego, el estrés de las plantas y para mejorar el rendimiento de los cultivos. Por lo tanto, la accesibilidad y la información sobre el contenido de humedad del suelo alterarán el destino de la asignación de agua y recursos para diversas necesidades humanas, incluidos los usos industriales, domésticos y agrícolas.

Investiga:

- ¿Cuáles son los valores permitidos de metales pesados para suelos?

Preguntas de consulta

1. ¿Consulte qué es un contaminante? ¿Qué tipo de contaminantes de suelo existen?
2. ¿En qué consiste la fijación foliar para las plantas y cuál es su implicación para el suelo?



Lectura adicional

El glifosato, un agente quelante, ¿relevante para la evaluación del riesgo ecológico?

El glifosato es un activo herbicida de amplio espectro activo contra plantas mono y dicotiledóneas. Los herbicidas a base de glifosato (GBH, por sus siglas en inglés) son los herbicidas más utilizados a nivel mundial, debido en gran parte a la producción, en millones de hectáreas en todo el mundo, de cultivos resistentes a glifosato, modificados genéticamente (GR) (por ejemplo: soja, maíz, algodón, colza y otros). El ingrediente activo declarado glifosato no se aplica solo, sino en combinación con varios ingredientes con la intención de incrementar su acción. El uso de GBH también ha aumentado significativamente en la Unión Europea,

donde los cultivos de GR no están autorizados para el cultivo. Aquí, el herbicida se aplica antes de la siembra, después de la cosecha, para fines de desecación (restringido en algunos países) y en entornos no agrícolas.

Los procedimientos de aprobación de ingredientes activos de herbicidas, como el glifosato, están regulados en la UE por marcos legales específicos, que definen también los requisitos para la nueva aprobación. La Agencia Europea de Sustancias Químicas (ECHA), la agencia competente de la UE para la evaluación de expedientes para la clasificación de sustancias químicas presentó su dictamen final en junio de 2017, donde dice textualmente: “no se garantiza la clasificación de mutagenicidad, carcinogenicidad y toxicidad para el desarrollo de células germinales”

El glifosato inhibe la enzima 5-enolpiruvil shikimato-3-fosfato sintasa (EPSPS), que participa en la ruta del ácido shikímico de la síntesis de ácidos aromáticos como la fenilalanina, el triptófano y la tirosina y una variedad de otras sustancias. Como esta vía está presente solo en plantas y microorganismos, se consideró –durante mucho tiempo– que el glifosato es de baja toxicidad para humanos y animales. No obstante, investigaciones más recientes han generado preocupaciones sobre el daño que puede generar el glifosato en animales y humanos.

El glifosato también se conoce como un potente quelante de minerales, una propiedad que se ha observado hace décadas, incluso antes de que se descubriera el efecto herbicida del glifosato. Si el glifosato, de hecho, se une a los minerales esenciales de manera efectiva, su aplicación podría conducir a un suministro insuficiente de minerales que son cofactores esenciales en muchos procesos biológicos en plantas tratadas y potencialmente también en organismos que se alimentan de tales plantas. Esto a su vez podría afectar la resistencia de las plantas a las enfermedades y afectar la salud humana y animal. Aunque las propiedades quelantes son bien conocidas, este riesgo ambiental adicional potencial nunca se consideró adecuadamente en la evaluación de riesgos regulatorios.

Algunas investigaciones adicionales han sugerido que el glifosato puede mediar la inhibición de la enzima citocromo P450 en humanos junto con un efecto negativo sobre la biosíntesis de aminoácidos por el microbioma intestinal (mediado por la enzima objetivo del glifosato). En la literatura, se considera que la exposición continua y a largo plazo al gli-

fosato es responsable de algunas de las enfermedades humanas modernas, incluidos los trastornos gastrointestinales, la obesidad, la diabetes, las enfermedades cardíacas, la depresión, el autismo, la infertilidad, el cáncer y la enfermedad de Alzheimer. Además, un mayor conocimiento con respecto a la fuerte capacidad que tiene el glifosato para quelar con hierro, cobalto, molibdeno, cobre y otros metales raros; y el deterioro de muchas enzimas del citocromo P450 (involucradas en la desintoxicación de toxinas ambientales, activando la vitamina D3, catabolizando la vitamina A y manteniendo la producción de ácido biliar y el suministro de sulfato al intestino) mostraron su participación en la enfermedad celíaca y la intolerancia al gluten.

Literatura citada:

Martha Mertens, Sebastian Höss, Günter Neumann, Joshua Afzal, Wolfram Reichenbecher, Glyphosate, a chelating agent – relevant for ecological risk assessment? *Environmental Science and Pollution Research*, vol 25, pp. 5298-5317, 2018.

Daniel O. Aikhuele and Faiz M. Turan, Is the herbicide glyphosate really safe? *Current Science*, vol 112, no 1, pp. 11-13, 2017.

Literatura citada (según normas IEEE):

A.C. Chang and D. Brawer (eds.), *Salinity and Drainage in San Joaquin Valley, California: Science, Technology, and Policy*, Global Issues in water Policy 5, Springer Science, 2014. Cap 5. Biogeochemistry of trace elements: reactions in soils.

A. Hubert, "Control: the extractive ecology of corn monoculture, cultures studies", vol 31, no 2-3, pp. 232 -252, 2017.

A. Martins (2012, enero 12). Cabras que producen seda de telaraña [online]. Disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2012/01/120119_cabra_arana_utah_am.

A. Molano. (2013, octubre 20). El acuerdo entre Colombia y Ecuador: glifosato, secretos y contradicciones (en línea). Disponible en: www.razonpublica.com

B. Al-Mansour, D. Kalaivanan, M. A. Suryanarayana, K. Umesha and A. K. Nair, "Influence of organic and inorganic fertilizers on yield and quality of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.)", *J Spices Aromatic crops*, vol 27, no 1, pp. 38-44, 2018.

B.M. Teklu, P.I. Adrianse, H.M. Ter, J.W. Deneer and B.J. Van-den, Surface water risk assessment of pesticides in Ethiopia, *Sci Total Environ.*, vol 508, pp.566-574, 2014.

- C. Colombo, G. Palumbo, J-Z. He, R. Pinton and S. Cesco, "Review on iron availability in soil: Interaction of Fe minerals, plants, and microbes", *J. Soils Sediments*, vol 14, no 3, 2013.
- C. P. Malik and D. Sanadhya, "Genetic engineering and GM crops", *J Pl Sci Res.*, vol 34, no 2, pp. 251 – 258, 2018.
- D. Healy. (2012). Hydraulic Fracturing or 'Fracking': A Short Summary of Current Knowledge and Potential Environmental Impacts: A Small Scale Study for the Environmental Protection Agency (Ireland) under the Science, Technology, Research & Innovation for the Environment (STRIVE) Programme 2007 – 2013. Environmental Protection Agency (Ireland) [online]. Available: www.epa.ie
- D. Tripathi, V. Singh, D. Chauhan, S. Prasad and N. Dubey. Role of macronutrients in plant growth and acclimation: Recent advances and future prospective. New York: Springer, 2014, pp. 457.
- E. Cacan, "Effect of different fertilizer treatments on botanical composition, herbage yield and herbage quality in the eastern Anatolia region pasture of Turkey", *Appl Ecol Env Res*, vol 16, no 4, pp. 4051 -4063, 2018.
- E.P. Perry and A.P. Gysi, "Rare earth elements in mineral deposits: Speciation in hydrothermal fluids and partitioning in calcite", *Geofluids*, vol 1, no 1, pp. 1-19, 2018.
- EPA. (2014). Report about risk in health of chlorpyrifos [Online]. Available: www.epa.gov.co.
- F. Funes, L. Gacía, M. Bourque, N. Perez and P. Rosset. Sustainable agriculture and resistance: transforming food production in Cuba. Oakland: Food First Books, 2002, pp. 320.
- F. He, Z. Tong, L. Wang, G. Zheng and X. Li, "Effect of fertilizer additions on plant communities and soil properties in a temperate grassland steppe", *Pol J Environ Stud.*, vol 27, no 4, pp.1533-1540, 2018.
- F. Kaminsky, "Basic problems concerning the of the Earth's lower mantle" *Lithos*, vol. 364 -365, pp. 1-8, 2020.
- FAO. (2016, 5 December). Sustainable agriculture for biodiversity [online]. Available: www.fao.org.
- H.D. Belitz and W. Grosch. Minerals. In: Food Chemistry. Springer, Berlin, Heidelberg, 1999, pp. 395-401.
- J. Yang, J. Liu, C. Wu, P. Kerr, P.-K. Wong, and Y. Wu, "Bioremediation of agricultural solid waste leachates with diverse species of Cu (II) and Cd (II) by periphyton", *Bioresource Technology*, vol 221, pp. 214-221, 2016.
- J. Wu, Z. Wei, Z. Zhu, Y. Zhao, L. Jia, Pin Ly, "Humus formation driven by ammonia-oxidizing bacteria during mixed materials composting" *Bioresource Technology*, vol 311, pp. 1-5, 2020.

- L. DeFrancesco, "How safe does transgenic food need to be, *Nature biotechnology*", vol 31, no 9, pp. 794 – 802, 2013.
- M. C. Turner, D.T. Wigle and D. Krewski, "Residential pesticides and childhood leukemia: a systematic review and meta-analysis" *Ciencias & Salud Colective*, vol 16, no 3, pp. 1915-1931, 2011.
- M. Sillanpaa. Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study. Rome: FAO soils bulletin, 1982, pp. 445.
- O. Mishima and H. Stanley, "The relationship between liquid, supercooled and glassy water", *Nature*, vol 396, no 6709, pp. 339 – 335, 1998.
- R. Boiteau, J. Shaw, L. Pasa-Tolic, D. Koppenaar, J. Jansson, "Micronutrient metal speciation is controlled by competitive organic chelation in grassland soils", *Soil Biology and Biochemistry*, 120, pp. 283-291, 2018.
- R. Carlson, M. Garcon, J. O'Neil, J. Reimink, and H. Rizo, "The nature of Earth's first crust" *Chem. Geol.*, vol 530, 2019.
- S. E. Manahan. *Introducción a la Química Ambiental*. Madrid: Editorial Reverté, 2011, pp. 725.
- S. Koont. *Sustainable Urban Agriculture in Cuba*. Gainesville, FL: University Press of Florida, 2011, pp. 208.
- S. Zhong, C. Wei, J. Ni, D. Xie and C. Ni. Characterization of clay rock-derived soils containing multi-mineral sand particles in upland areas of Sichuan Basi, China. *Catena*, vol 194, pp. 1-13, 2020.
- W.Y. Santoso, Sunarto, E. Martono and H. Supriyono, "Legal frame of transgenic food in Indonesia", *EFFL*, vol 12, no 6, pp. 491-498, 2017.
- W. Tan, Y. Then, Y. Lew, and F. Tay, "Newly calibrated analytical models for soil moisture content and pH value by low-cost YL-69 hygrometer sensor", *Measurement*, vol 134, pp. 166 -178, 2019.
- Winston Churchill, radio broadcast, September 28, 1944, quoted in T. F. West and G. A. Campbell, *DDT: The Synthetic Insecticide* (London: Chapman and Hall, 1946), 11.
- X. A. León, "Transgénicos, agroindustria y soberanía alimentaria", *Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, vol 16, pp. 29 -53, 2014.
- X. Lai, F. Zhu, Y. Liu, W. Bi, J. Zhao, E. Alp, M. Hu, D. Zhang, S. Tkachev, M. Manghani, V. Prakapenka, and B. Chen, "Elastic and magnetic properties of Fe₃P up to core pressures: Phosphorus in the Earth's core", *Earth and Planetary Science Letters*, vol 531, no. pp. 1-10, 2020.

Capítulo 4

Atmósfera

4.1 Generalidades

El estudio de la atmósfera es un tema complejo por la gran cantidad de reacciones químicas y de radiación electromagnética que se presentan; y por los fenómenos de transporte de los gases. Para poder ahondar en el estudio químico de la atmósfera, es importante conocer algunos conceptos que se verán a continuación:

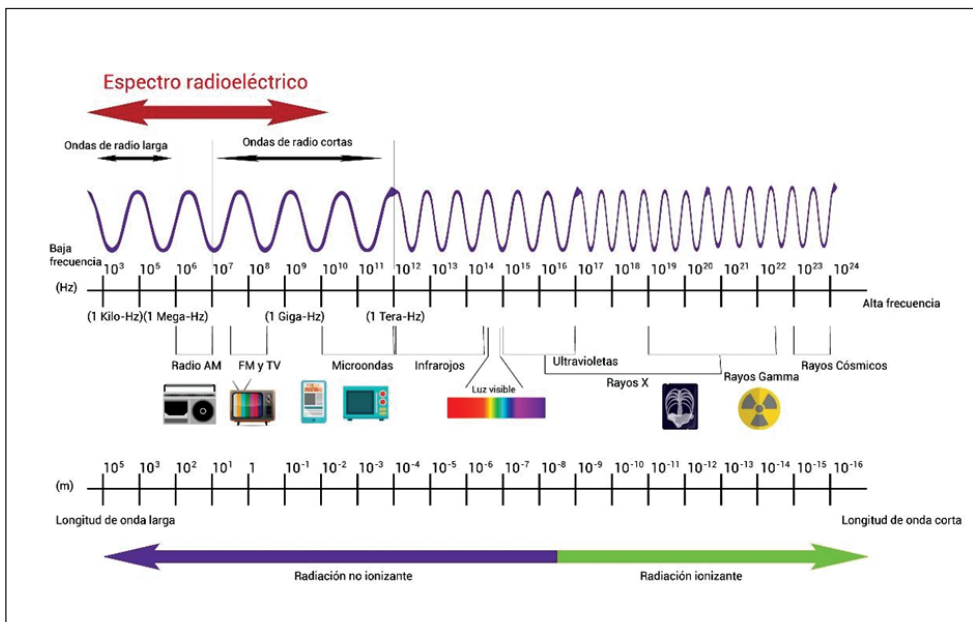


Figura 4.1. Espectro electromagnético. Tomado y adaptado de R.E. Hendrick. Radiation Doses and Risks in Breast Screening, Journal of Breast Imaging, vol 2, pp. 188-200, 2020.

Las **reacciones fotoquímicas** son todas aquellas reacciones que se hacen en presencia de **radiación electromagnética**, lo cual es característica de los gases que están presentes en la atmósfera. El espectro de radiación electromagnética está definido dentro de un rango establecido por el tipo de frecuencia y la longitud de onda que tenga el tipo de radiación. De esta forma, tenemos diferentes tipos de radiación (en el orden de más energético a menos energético): rayos gamma, rayos x, rayos ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas y ondas de radio (ver **Figura 4.1**).

El hombre ha aprovechado el espectro electromagnético para la fabricación de diferentes dispositivos; así, por ejemplo, tenemos las lámparas reveladoras de billetes usando radiación UV, los radares *vía* radiación de microondas, las radiografías con base en los rayos X y las comunicaciones de radio aprovechando las ondas de radio. Cada radiación electromagnética se conoce como **fotón** (de ahí el nombre de reacciones fotoquímicas y fue un término acuñado por Albert Einstein en su estudio de la luz). La energía de cada uno de los fotones está relacionada con su frecuencia (ν) y longitud de onda (λ), de acuerdo con la ecuación 4.1.

$$E = h\nu = hc/\lambda, \quad 4.1$$

donde h es la constante de Planck ($h = 6,63 \times 10^{-34}$ J*s) y c es la velocidad de la luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s).

Los gases presentes en la atmósfera interaccionan con fotones de diferentes energías generando diferentes reacciones fotoquímicas. En la Figura 4.2 se presenta una reacción fotoquímica característica donde se observa que una especie molecular (M) absorbe un fotón de energía ($h\nu$) para pasar a un **estado excitado** (M^*). El exceso de energía de la especie molecular excitada (M^*) puede liberarse de diferentes maneras, con algún fenómeno de fluorescencia con el consecuente decaimiento energético, una ruptura homolítica o heterolítica. Esta característica incide finalmente en los tipos de productos que se puedan presentar en una reacción fotoquímica, formando **radicales**, **cationes**, cationes radicales o **aniones** (eventualmente).



Figura 4.2. Reacciones fotoquímicas características en la atmósfera. Fuente propia.

La característica fundamental del entendimiento de estas reacciones fotoquímicas es que en cada capa de la atmósfera diferentes gases reaccionan con diferentes fotones, garantizando que no toda la radiación del cosmos llegue a nuestra biósfera; así que la presencia de la atmósfera en el planeta Tierra hace posible la vida. Ningún otro planeta en el cosmos tiene una atmósfera como la nuestra, lo cual convierte a nuestro planeta como algo único. La atmósfera evita los rayos cósmicos, de infrarrojo y ultravioleta, es una fuente de dióxido de carbono necesaria para la fotosíntesis de plantas, de oxígeno para la respiración de especies vegetales y animales, proporciona el nitrógeno necesario para la síntesis de aminoácidos, proteínas y transporta el vapor de agua desde los océanos a otros lugares de la Tierra. La **atmósfera** está dividida en diferentes capas: **tropósfera**, **estratósfera**, **mesósfera** y **termósfera**. La división de cada capa depende de la conformación de los gases, del tipo de radiación presente, de la temperatura y de la altura con respecto a la biósfera de la Tierra (ver Figura 4.3).

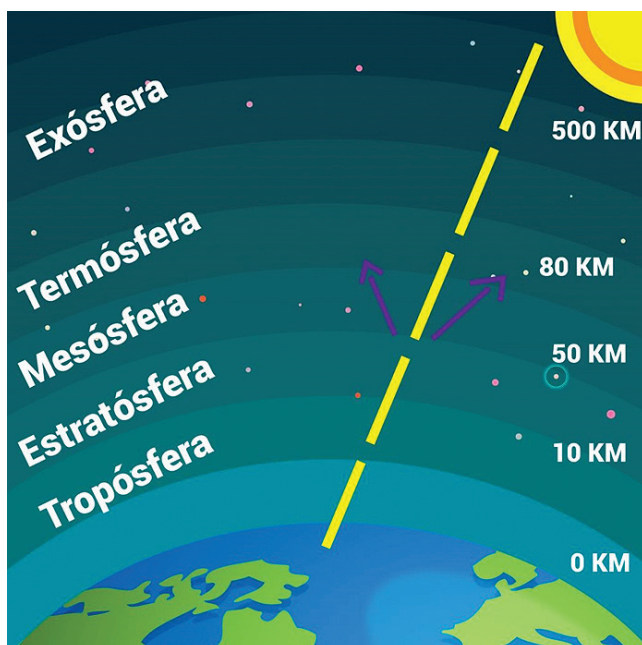
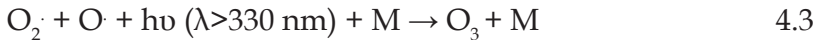
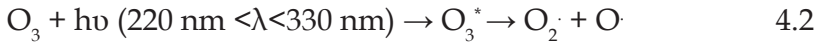


Figura 4.3. Las capas de la atmósfera. Fuente propia.

La tropósfera tiene el vapor de agua y todos los gases que conforman el aire seco, tales como nitrógeno (78%), oxígeno (22%) y las trazas de

gases (menos del 1%), tales como dióxido de carbono, óxido de dinitrógeno, metano, etc. El tipo de radiación que alcanza la tropósfera incluye ultravioleta, visible e infrarrojo con fotones de longitud de onda por encima de 330 nm y con unas temperaturas que están entre -55 °C - 50 °C. Es válido anotar que la radiación ultravioleta ($\lambda > 330\text{nm}$) es importante para diferentes procesos biológicos, tales como la fotosíntesis y la síntesis de la vitamina D. La altura de la tropósfera depende de la ubicación del registro, tal que en los polos es menor el valor comparada en la línea del Ecuador (70 - 80 km). La estratósfera se caracteriza por la presencia del ozono (O_3), a una altura de 50 km y alcanza temperaturas de hasta de -2 °C. El O_3 (~estratosférico) reacciona con fotones ($220\text{ nm} < \lambda < 330\text{ nm}$), excitándose para luego decaer en un radical de oxígeno molecular y uno de oxígeno, tal como se presenta en la ecuación 4.2. La estratósfera se conoce popularmente como la “capa de ozono” y evita que este tipo de radiación Ultravioleta llegue a la tropósfera a través de esta reacción fotoquímica. Cuando el oxígeno molecular formado en Ec.4.2 interacciona con otro tipo de radiación ($\lambda > 330\text{ nm}$) y un radical de oxígeno se forma el ozono nuevamente, garantizando de esta forma la recuperación de la estratósfera (véase las ecuaciones 4.2-4.3). Cualquier contaminante que sustituya el radical oxígeno como se verá más adelante en la sección 4.7, impediría que el ozono estratosférico se recupere.



La mesósfera tiene especies moleculares, tales como: NO^+ y O_2^+ , que interactúan con un tipo de radiación electromagnética con fotones ultravioleta de alta energía y rayos γ ($100 < \lambda < 220\text{ nm}$) a una altura promedio de 85 km y temperatura de -92 °C. Finalmente, en la termósfera se presentan especies, tales como NO^+ , O_2^+ y O^+ , que interaccionan con fotones de mayor energía (rayos γ y cósmicos) que las anteriores capas con ($\lambda \leq 100\text{ nm}$) a una temperatura de 1200 °C, a una altura entre 450 -500 km.

4.2 La capa de ozono (estratósfera)

El sol emite una mortal radiación hacia el planeta; pero la mayoría de esta radiación es bloqueada por una fina capa de moléculas conocida como capa ozono. La capa de ozono es nuestro segundo escudo (el primero es el núcleo del planeta) pero es un escudo muy frágil. Hace apro-

ximadamente 30 años descubrimos que los productos químicos, tales como los compuestos fluorocarbonados, CFC, hicieron que disminuyera la concentración de ozono en la estratósfera, situación que se conoce como el “agujero” en la capa de ozono. Por tal razón, estos compuestos fueron prohibidos mundialmente y fueron sustituidos por otros menos peligrosos a través de acuerdos internacionales para evitar el uso de productos que alteren o dañen la capa de ozono. Sin embargo, según algunos estudios recientes de la concentración de ozono en la estratósfera, indican que el ozono se ha estado regenerando.

La capa de ozono ha estado durante millones de años en el planeta, incluso antes del origen de los dinosaurios. La protección que obtenemos de la capa de ozono contra los rayos UV es tan importante para la vida de todas las especies del planeta. Sin la capa de ozono, la vida del planeta estaría aun destinada a presentarse sólo debajo del agua, ya que cualquier posibilidad sobre la superficie del planeta sería imposible por la cantidad de radiación mortal que llegaría.

La formación del ozono se cree que fue debido a grandes cantidades de oxígeno que lograron escapar de los océanos y la tropósfera, y de esta forma, lograron reaccionar con fotones de alta energía para formar el ozono y formar una nueva capa, conocida como estratósfera. Los primeros individuos (microorganismos y plantas) que llegaron a la superficie terrestre para obtener energía a través del sol y del proceso de la fotosíntesis, produjeron oxígeno como residuo que en la atmósfera se convirtió en ozono. La reacción característica de formación del ozono se presentó en las ecuaciones 4.2 y 4.3, donde se observa que los radicales de oxígeno interaccionan con fotones de menor energía para regenerar nuevamente el ozono.

Los científicos clasifican la radiación UV en tres tipos o bandas: UV-A (320 - 400 nm), UV-B (280-320 nm) y UV-C (100-280 nm). La banda UV-C, que es radiación de onda corta, no llega a la superficie de la Tierra. La banda UV-B está compuesta de rayos de onda más larga y es filtrada parcialmente por la capa de ozono. Además, puede causar un bronceado superficial, quemaduras y envejecimiento de la piel. La banda UV-A (las ondas UV más largas) no es filtrada por la capa de ozono en absoluto; penetran profundamente en la superficie de la piel liberando radicales libres, y puede provocar cambios en el ADN con posibilidades de cáncer de piel.

4.3 Efecto de invernadero y calentamiento global

Los gases de **efecto de invernadero** interaccionan con la luz infrarroja ($\lambda > 800 \text{ nm}$) en la tropósfera manteniendo una temperatura necesaria para la vida en el planeta Tierra. Este fenómeno es conocido como efecto invernadero y es causado principalmente por gases de origen biogénico tales como CH_4 , CO_2 , CO y H_2O . El aumento de las actividades antropogénicas desde el desarrollo industrial ha incidido en el incremento de las emisiones de gases como CH_4 , CO_2 y CO y en la producción de nuevos gases que presentan un efecto invernadero también, tales como los cloro-fluorocarbonados (CFC) y NO_x . El calentamiento excesivo del planeta por estas actividades antropogénicas se conoce como **calentamiento global** (Ver Figura 4.4).

El efecto invernadero es una característica de todos los cuerpos planetarios dotados de atmósfera. De acuerdo con el actual consenso científico, el efecto invernadero se está acentuando en la Tierra por la emisión de ciertos gases, como el dióxido de carbono y el metano, que son productos de actividades económicas humanas.



Figura 4.4. Efecto de Invernadero. Fuente propia.

El CO_2 puede ser un componente mortal para el planeta. Los volcanes en la Tierra han emitido durante muchos años grandes cantidades de CO_2 a la atmósfera. A pesar de esto, la Tierra no es tan caliente si lo comparamos con otro planeta con la misma situación, como Venus. La razón de esto se debe a

que la lluvia arrastra grandes cantidades de CO_2 y otros gases, hacia los ríos y el suelo, volviéndolo ácido y disolviendo sus rocas. El agua de los ríos con sedimentos y dióxido de carbono se transporta hacia los océanos. A medida que los ríos llegan con este CO_2 y los sedimentos, el carbono queda enterrado en el fondo del océano y esto ayuda a equilibrar las cantidades de CO_2 en la atmósfera, evitando que el calor del sol llegue a quemar a todas a las especies del planeta. El problema en la actualidad es que los seres humanos bombeamos unas 60 veces más de dióxido de carbono al planeta en comparación con las emisiones de los volcanes, lo que no da el tiempo suficiente para que la concentración de CO_2 del planeta se equilibre.

Según los últimos reportes de la estación de seguimiento de Mauna Loa, informa que los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera están en unas 400 ppm. Un incremento de más 70 ppm en los últimos 70 años (comparado con las 315 ppm en 1958, cuando se iniciaron las mediciones modernas). Ahora si lo comparamos con las mediciones de dióxido de carbono (270 ppm) atrapadas en burbujas de aire en los hielos de Groenlandia, que nunca ha presentado actividad industrial, se encuentra una diferencia de 130 ppm. Lo que corrobora la incidencia de la quema de combustibles en el calentamiento del planeta.

La concentración de metano en la atmósfera es considerablemente menor que el CO_2 ; sin embargo, la absorción de radiación infrarroja por parte de moléculas de metano es significativamente mayor (20 a 30 veces) que las de dióxido de carbono. Algo similar sucede con los compuestos clorofluorocarbonados (CFC's) que tienen una concentración pequeña en la atmósfera (1020 ppt); pero son unas 10000 veces más efectiva para absorber radiación infrarroja que el CO_2 .

Durante más de 4000 millones de años, nuestro planeta nos ha protegido del sol. Sin embargo, la actual concentración de CO_2 medida en la atmósfera no había sido alcanzada con las mediciones modernas. Es notablemente la concentración más alta de CO_2 durante más de 800000 años y probablemente la más alta en varios millones de años. Los niveles en la atmósfera resultan de las emisiones naturales y antropogénicas; pero las emisiones humanas superan con creces las naturales. La concentración de CO_2 en el aire varía a lo largo del año, ya que los océanos y la vida vegetal de la Tierra absorben el dióxido de carbono a velocidades variables. El CO_2 es responsable del 63 por ciento del calentamiento atribuible a todos los gases de efecto invernadero, y muchos científicos han

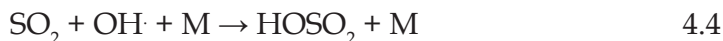
recomendado que el mundo debiera actuar para mantener los niveles de CO_2 por debajo de 400-450 ppm para evitar efectos de cambio climático aún más desastrosos e irreversibles.

4.4 Lluvia ácida

El término lluvia ácida comprende tanto a la precipitación, depósito, deposición húmeda de sustancias ácidas disueltas en el agua lluvia, nieve y granizo, como a la precipitación o deposición seca, por la cual los aerosoles o compuestos gaseosos ácidos son depositados como cenizas, hollín o como gases en el suelo, en las hojas de los árboles y en las superficies de los materiales. En realidad, estas partículas no tienen carácter ácido mientras están en la atmósfera, pero cuando entran en contacto con la neblina, el rocío o el agua superficial, se convierten en ácidos y tienen efectos similares a los de la precipitación húmeda.

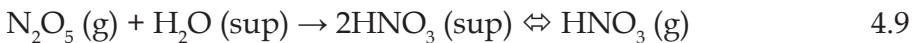
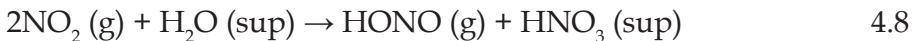
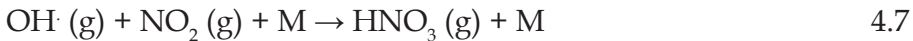
El origen de compuestos como los óxidos de azufre y de nitrógeno puede aparecer por efecto natural o antropogénico. Las fuentes naturales comprenden emisiones volcánicas, tormentas eléctricas, biomasa, actividad microbiana, entre otros. Las fuentes antropogénicas corresponden a las emisiones de fuentes fijas provenientes de plantas industriales de combustibles fósiles como carbón y petróleo y fuentes móviles, representadas principalmente por las emisiones de los motores de combustión interna de los vehículos de transporte.

Los gases de óxidos de nitrógeno y de azufre reaccionan con vapor de agua para formar los ácidos nítrico y sulfúrico, respectivamente. Las reacciones aceptadas para la formación de ácido sulfúrico en la atmósfera desde compuestos de azufre se presentan en las ecuaciones 4.4 - 4.6:



Donde M es un componente inerte que absorbe energía. Los óxidos de azufre han sido ampliamente estudiados. Ellos incluyen seis compuestos gaseosos diferentes que son: monóxido de azufre (SO), dióxido de azufre (SO_2), trióxido (SO_3), tetraóxido (SO_4), sesquióxido (S_2O_3) y heptóxido (S_2O_7). El SO_2 y SO_3 son los dos óxidos de mayor interés en el estudio de contaminación del aire.

Los gases precursores para HNO_3 (g) y HONO (g) se emiten a la atmósfera principalmente a través de procesos de combustión de combustible antropogénico, que representan aproximadamente el 60% de las emisiones globales. Las principales especies emitidas son el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2), que, en suma, se denominan NOx debido a su rápida interconversión fotoquímica en la atmósfera. Otras fuentes de NOx atmosférico son las bacterias que queman biomasa, los rayos y la desnitrificación. La formación de HNO_3 (g) en la atmósfera diurna ocurre por reacción del radical hidroxilo (OH (g)) con NO_2 (g) a partir de emisiones directas u oxidación de NO (g), mientras que HNO_3 (superficial) y HONO (g) se forman a partir de la reducción superficial de NO_2 (g) en presencia de agua (4.7, 4.8). Por la noche, el pentóxido de dinitrógeno (N_2O_5 (g)) se hidroliza para formar dos HNO_3 (superficial) en la fase condensada (4.9), que puede dividirse en la fase gaseosa en las condiciones termodinámicas apropiadas. La extracción de hidrógeno por el radical nitrato (NO_3 (g)) también puede producir HNO_3 (g) durante la noche (4.10).



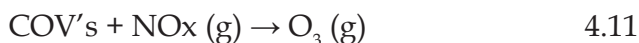
Los niveles de contaminantes dependen del grado de emisiones atmosféricas de las diferentes fuentes, lo que aumenta su concentración en la atmósfera. Sin embargo, en regiones lluviosas realiza un lavado atmosférico que termina con el transporte de los elementos contaminantes hacia la Tierra, donde se presentan sus efectos adversos para el equilibrio de la naturaleza. Así que la presencia de la contaminación en una región se ve disminuida en la medida que las precipitaciones sean mayores, dependiendo de la intensidad y duración de la lluvia.

La lluvia ácida puede impactar negativamente los ecosistemas y las construcciones urbanas, deteriorando edificios, puentes, construcciones, monumentos, materiales metálicos y equipos electrónicos, así como afectar la salud humana. Este último aspecto es uno de los más difíciles de evaluar por la complejidad de los contaminantes que se generan. A medida que aumenta la concentración de sulfatos (SO_4^{-2}) en el suelo, disminuye el crecimiento radial de varias especies. La lluvia ácida tiene un

efecto negativo fuerte sobre el crecimiento y desarrollo de los árboles de bosque vía el incremento de aluminio y de la disponibilidad de metales pesados como un resultado de un pH más bajo. Por otro lado, la lluvia ácida también afecta la absorción de nutrientes minerales, como el Ca, y acelera la lixiviación de nutrientes de las plantas y el suelo. Además, estudios recientes han demostrado que el agotamiento de Ca en el suelo inducido por la lluvia ácida exacerba la alteración del Ca asociado a la membrana celular, lo que lleva a su desestabilización, lo que afecta negativamente la salud del bosque. Por lo tanto, un ambiente bajo de Ca asociado con la lluvia ácida puede ser muy perjudicial para los árboles forestales y contribuir a la disminución de su forraje.

4.5 Ozono troposférico

El **ozono troposférico** (O_3) es un gas incoloro, muy irritante creado por una serie de oxidaciones fotoquímicas que involucran gases precursores, tales como monóxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno ($NO_x = NO + NO_2$) y compuestos orgánicos volátiles (COV's) (4.11).



Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son numerosos, variados y ubicuos. En la naturaleza, los COV son biogénicos y antropogénicos. Los cultivos de plantas aromáticas son la principal fuente biogénica de COV como lo demuestran los fuertes olores de las plantas de procesamiento de aceites esenciales. Las fuentes antropogénicas de COV incluyen hidrocarburos de la producción y procesamiento de petróleo crudo, solventes como cetonas (acetona y metiletilcetona), alcanos (hexano), alcoholes (etanol, isopropanol) y aromáticos (benceno y tolueno) que se usan ampliamente en las industrias de procesamiento químico, productos domésticos, etc. Si bien la mayoría de los COV no son tóxicos, pueden generar algunos problemas de salud, como dolor de cabeza agudo, alergia, problemas respiratorios, náuseas y afectar el sistema de inmunidad en niños/lactantes si se exponen a largos periodos a algunos de estos COV, incluso a bajas concentraciones. Los COV como formaldehído, acrilonitrilo, benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos son altamente tóxicos y/o cancerígenos. El formaldehído y el acrilonitrilo se utilizan como materia prima base en la industria de la resina. El benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (comúnmente conocidos como BTEX) se liberan como gases de escape de automóviles.

La contaminación de ozono troposférico ha sido conocida por los efectos perjudiciales sobre la salud humana, principalmente en el sistema cardiovascular y respiratorio. La exposición al ozono se ha vinculado con la mortalidad prematura y una gama de cuestiones de morbilidad, como admisiones en hospitales, ataques de asma, bronquitis aguda, rinitis alérgicas y síntomas respiratorios con restricción de actividad. La influencia sobre la salud del ozono como contaminante se basa en su toxicidad, ya que, debido a su pequeña capacidad de disolución, el ozono penetra en las vías respiratorias e irrita las mucosas y los tejidos pulmonares. Altas concentraciones de ozono, largas exposiciones temporales y exhaustivos grados de actividad física durante la exposición causan graves efectos en la salud: disminución de la función pulmonar, agravamientos asmáticos, falta de aliento, dolor de pecho en respiraciones profundas, respiración silbante y tos. La exposición a concentraciones elevadas de ozono es responsable de un aumento en la mortalidad, admisiones hospitalarias y visitas a emergencias debido a problemas respiratorios. La exposición repetida a ozono puede hacer que la gente sea más susceptible a infecciones respiratorias, inflamaciones pulmonares y puede agravar enfermedades respiratorias pre-existentes como asma, bronquitis y fibrosis pulmonar.

El ozono troposférico también daña la vegetación, la productividad de los cultivos, las flores, los matorrales y los bosques. Además, puede deteriorar el algodón (*i.e* en las telas) y los materiales sintéticos, producir roturas en el caucho, acelerar el desteñido de ciertas pinturas y recubrimientos. Los efectos que el ozono provoca en la vegetación dependen de la cantidad que consigue alcanzar el interior de la planta e interferir en las reacciones bioquímicas y metabólicas que participan en el desarrollo y crecimiento vegetal. Debido a que el ozono es un contaminante gaseoso, su principal vía de entrada en las plantas es a través de las estomas, unos pequeños poros en la superficie de las hojas por donde se realiza el proceso habitual de intercambio de gases con la atmósfera que permite la fotosíntesis y la respiración.

Mientras que la exposición vegetal a altas concentraciones de ozono durante períodos cortos de tiempo provoca generalmente daños en las plantas a nivel foliar; su exposición a bajas o medias concentraciones de ozono durante largos períodos de tiempo provocan alteraciones a nivel metabólico, a menudo sin que se observen síntomas visibles, que

conducen a una un envejecimiento prematuro y a cambios en el crecimiento y la productividad de las plantas. Este tipo de exposiciones pueden inducir otro tipo de respuestas más difíciles de apreciar como una mayor sensibilidad frente a otros factores de estrés, tanto bióticos como abióticos. Los efectos del ozono en los cultivos se pueden manifestar como síntomas visibles en las hojas, como reducción de la producción y/o calidad de la cosecha, o como un aumento en la sensibilidad frente a ataques de patógenos.

Durante la pandemia de COVID 19, del año 2020, investigadores de la Universidad Federal de Río de Janeiro de Brasil, analizaron las concentraciones de ozono en esta región y encontraron un aumento en la concentración de ozono. El aumento en las concentraciones de ozono troposférico durante las medidas de distanciamiento social fue atribuido al aumento en las relaciones entre hidrocarburos diferentes al metano y los NO_x, ya que la química atmosférica en Río de Janeiro está bajo condiciones controladas por los compuestos orgánicos volátiles (COV's). Sin embargo, el aumento fue mayor cuando las masas de aire llegaron de las áreas industriales, no solo debido a las relaciones más altas de Hidrocarburos/ NO_x, sino también porque la reactividad del COV's fue altamente aumentada por estas masas de aire, que son ricas en compuestos aromáticos.

4.6 Smog fotoquímico

El smog fotoquímico es un único tipo de contaminación de aire; su palabra proviene de la combinación de dos palabras en inglés: *smoke* (humo) y *fog* (niebla). El smog moderno es un tipo de contaminación del aire derivada de la emisión vehicular de los motores de combustión interna y los humos provenientes de chimeneas industriales, que reaccionan en la atmósfera con la luz solar para formar contaminantes secundarios -que también se combinan con las emisiones primarias para formar el smog fotoquímico. Los contaminantes de aire mayores responsables para el smog fotoquímico son los óxidos de carbono (CO, CO₂), óxidos de nitrógeno y ácido nítrico (NO, NO₂, HNO₃), dióxido de azufre y ácido sulfúrico (SO₂, H₂SO₄), material particulado suspendido, ozono troposférico (no confundir con el estratosférico, cuya capa protege la Tierra de las radiaciones solares) y compuestos orgánicos volátiles (COV's).

La formación de smog está directamente relacionada con el clima y la topografía de la Tierra. La temperatura del aire disminuye a aproxima-

damente $6.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ por kilómetro en altitud de escalada. En condiciones normales, el aire más cálido en el suelo se eleva a la atmósfera superior de forma continua. Este movimiento de aire constante esparce contaminantes alrededor y evita que el smog se acumule en el suelo. A veces, el gradiente de temperatura se invierte; y el aire de arriba es más cálido que el aire de abajo, un fenómeno llamado inversión de temperatura. El paisaje de la Tierra también juega un papel en creando inversión de temperatura. Cuando el aire frío de los picos de la montaña fluye hacia los valles, el aire frío empuja al cálido aire en los valles hacia arriba, creando una inversión. Debido a su ubicación geográfica (que se construyen en cuencas bajas o valles), ciudades como Los Ángeles, Londres, Taipei, Beijing, Teherán y Ciudad de México son propensas a la acumulación de smog fotoquímico.

El smog fotoquímico puede perjudicar la fotosíntesis de las plantas, ya que las partículas dispersan la radiación, haciendo que no lleguen los fotones adecuados; o puede acelerar el deterioro de la goma, plásticos, pinturas y colorantes, dañar los metales, la roca, el concreto y la ropa. También puede ser bastante perjudicial para personas adultas y niños, con afectaciones cardíacas o pulmonares, tales como: enfisema, bronquitis y asma. El nivel de afectación en la salud depende de la concentración del smog fotoquímico; así, por ejemplo, a partir de $180\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, ciertas personas -especialmente las asmáticas y las que tienen problemas respiratorios- podrían ver aumentadas sus dolencias.

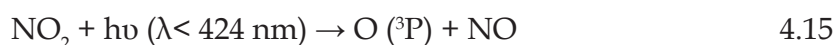
La gravedad de la contaminación por $\text{PM}_{2.5}$ ha promovido la implementación del “Plan de Acción para la Prevención y Control de la Contaminación del Aire” de China, dirigido a reducir las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en diferentes regiones de su territorio. Las altas concentraciones de O_3 y $\text{PM}_{2.5}$ tienen efectos perjudiciales sobre la calidad del aire, la salud humana, la visibilidad, el cambio climático y los sistemas ecológicos. Por lo tanto, se debe dar prioridad a la mitigación de la contaminación por O_3 y $\text{PM}_{2.5}$ en las ciudades y regiones más contaminadas a fin de promover el retorno a los cielos azules.

4.7 Contaminantes y análisis de aire

La contaminación del aire está definida como los agregados químicos a la atmósfera, ya sea por eventos naturales o actividades humanas en altas concentraciones que los hagan peligrosos. Existen dos categorías

de contaminantes de aire: (1) los primarios que son sustancias peligrosas emitidas directamente a la atmósfera; y (2) los secundarios que son sustancias peligrosas formadas en la atmósfera cuando un contaminante de aire primario reacciona con sustancias normalmente encontradas en la atmósfera o con otros contaminantes del aire. Los contaminantes del aire dependen de la actividad industrial de cada región. Entre algunos contaminantes comunes están las partículas orgánicas, partículas inorgánicas, cenizas volantes, los NO_x (NO y NO_2 , principalmente), SO_x (SO y SO_2 , principalmente) y los Compuestos Orgánicos Volátiles, COV, vapores de sustancias orgánicas, CO y CH_4 . Las principales fuentes de contaminación son la quema de combustibles, la ganadería, la industria química y el uso de vehículos a combustión. Tres de los principales problemas de contaminación del aire exterior son el smog industrial derivado de la quema de carbón; el smog fotoquímico producido en los vehículos de motor y las emisiones industriales; y la deposición ácida producto de la quema de carbón y los gases de escape de los vehículos de motor.

Otro contaminante conocido son los radicales peroxi (HO_2 y RO_2 , predominantemente CH_3O_2 en atmósferas semi-contaminadas) que pueden considerarse como los intermediarios entre el radical hidroxilo (OH) y la formación/destrucción de ozono. Los radicales peroxi también controlan la remoción de contaminantes primarios tales como NO_x (NO + NO_2) y compuestos orgánicos volátiles (COV's). Entendiendo la química del radical que controla la formación de ozono mejorará nuestro entendimiento básico de la fotoquímica troposférica y el efecto de las emisiones naturales y artificiales sobre la formación de ozono. La relativa contribución de la producción de ozono y la pérdida de los procesos en la tropósfera es altamente sensible para competir entre las reacciones de radicales peroxi con NO y las reacciones para formar peróxidos. En la presencia de NO_x , la reacción de radicales peroxi con NO permite la formación de NO_2 , la cual, sobre fotólisis, forma ozono (4.12 - 4.16):



Investiga:

- ¿Qué otros gases de invernadero se han reportado en los últimos cinco años?

Preguntas de consulta:

1. ¿Qué tratados internacionales se han establecido para combatir el calentamiento global?
2. ¿Qué países mantienen vigentes los tratados y qué alcances se han logrado en los últimos cinco años?

**Lectura adicional**Captura de CO₂

El dióxido de carbono (CO₂) se ha convertido en un problema global importante debido al aumento gradual de su concentración en la atmósfera, a raíz del incremento de la combustión de combustibles fósiles. Así que reducir los niveles de concentración de CO₂ se ha vuelto una tarea imperiosa de muchos investigadores. Algunos de estos trabajos, incluyen el empleo de diversas tecnologías en diferentes fuentes de emisión de CO₂, tales como, disoluciones de amina, carbón activado, separación usando membranas poliméricas y materiales adsorptivos de CO₂. En todos estos estudios se ha observado cómo las propiedades físicas y químicas de los materiales juegan un gran papel en los fenómenos de adsorción y absorción de CO₂.

La adsorción, de hecho, se ha convertido en la tecnología de punta para la separación y recuperación de CO₂. Aunque los adsorbentes convencionales como los carbonos activados y las zeolitas poseen capacidades de adsorción de CO₂, relativamente altas a temperatura ambiente, las cantidades de CO₂ adsorbidas en estos adsorbentes disminuyen rápidamente con el aumento de la temperatura. Además, de la pobre selectividad de adsorción para CO₂ en carbonos y zeolitas activadas en presencia de vapor de agua. Por otro lado, las hidrotalcitas pueden adsorber CO₂ a altas temperaturas, pero sus capacidades de adsorción de CO₂ son, en general, bajas. Los óxidos metálicos básicos, tales como MgO y CaO tienen capacidades de absorción extremadamente grandes para CO₂,

pero la regeneración de estos absorbentes se realiza a temperaturas más altas, lo que resulta en severas penalizaciones energéticas. Por lo tanto, el desarrollo de adsorbentes eficientes es de suma importancia para la captura y separación de CO₂.

Entre algunos de los materiales sugeridos para la adsorción de CO₂ se encuentran las zeolitas de tipo ERI, que destacan por su alta capacidad de adsorción, accesibilidad, pureza y, especialmente, por la posibilidad de aumentar su capacidad de adsorción mediante la incorporación de ciertos cationes a través del intercambio iónico y mediante la formación de nanodepósitos en la estructura interna de esta zeolita. La sustitución por intercambio iónico de iones Na⁺ en la erionita natural por iones Ca⁺² o H⁺ aumenta la capacidad (es decir, el volumen de poro accesible). El intercambio iónico (a través de una sal) y la desaluminación (con tratamientos ácidos) de erionita conducen a la formación de una porosidad secundaria (es decir, se crean mesoporos). Las cavidades en la erionita después de un proceso de intercambio iónico pueden acomodar iones metálicos y grupos producidos por una reacción de reducción posterior. El tipo de cationes y la ubicación de las moléculas de agua dentro de la estructura de la zeolita todavía siguen bajo investigación.

Finalmente, a pesar que existen una variedad de materiales adsorbentes/adsorbentes de dióxido de carbono que pueden disminuir su concentración en la atmósfera; es necesario seguir investigando en sustancias químicas que puedan modificar sus propiedades físicas y químicas, y en consecuencia, aumentar sus capacidades adsorbentes.

Literatura citada:

- M. A. Hernandez, A. Pestryakov, R. Portillo, M.A. Salgado, F. Rojas, F. Rubio, E. Rubio, S. Ruiz, and V. Petranovskii. "CO₂ sequestration by natural zeolite for greenhouse effect control", *Procedia Chemistry*, vol 15, pp.33 - 41, 2015.
- R. Banerjee, A. Phan, B. Wang, C. Knobler, H. Furukawa, M. O'Keeffe, and O.M. Yaghi, "High-Throughput synthesis of zeolitic Imidazolate frameworks and application to CO₂ capture", *Science*, vol 319, pp. 939 - 943, 2008.

Literatura citada (según normas IEEE):

- B. Debnath, M. Irshad, S. M, M. Li, H. Rizwan, S. Liu, T. Pan and D. Qiu, "Acid Rain Deposition Modulates Photosynthesis, Enzymatic and Non-enzymatic

- Antioxidant Activities in Tomat”, *Int J Environment Res.*, vol 12, no 2, pp. 203-214, 2018.
- B. Place, C Young, S. Ziegler, K. Edwards, L. Salehpoor, and T. VandenBoer, “Passive sampling capabilities for ultra-trace quantitation of atmospheric nitric acid (HNO₃) in remote environments”, *Atmospheric Environment*, vol 191, pp. 360 -369, 218.
- B.D. Ostro, H. Tran and J. I. Levy, “The Health Benefits of Reduced Tropospheric Ozone in California”, *J Air & Waste Manage Assoc.*, vol 56, pp.1007-102, 2006.
- B. Rani, U. Singh, A. K. Chuhan, D. Sharma and R. Maheshwar, “Photochemical Smog Pollution and Its Mitigation Measures”, *J Adv Scient Res.*, vol 2, no 4, pp. 28-33, 2011.
- IPCC. (2018). Global warning of 1.5 °C [online]. Available: www.ipcc.ch
- B. Siciliano, G. Dantas, C. M. Silva, and G. Arbilla, “Increased ozone levels during the covid -19 lockdown: Analysis for the city of Río de Janeiro, Brazil”, *Science of Total Environment*, vol 737, pp. 1-8, 2020.
- F. Jiang, P. Zhou, Q. Liu, T. Wang, B. Zhuang and X. Wang, “Modelling tropospheric ozone formation over East China in springtime”, *J Atmos Chem*, vol 69, pp.303 -319, 2012.
- J. Pla-García y C. Menor-Salván, “La composición química de la atmósfera primitiva del planeta Tierra”, *An. Quím.*, vol 113, no 1, pp. 16 - 26, 2017.
- H. Guo, Z. Ling, H. Cheng, I.J. Simpson, X. Lyu, X. Wang, M. Shao, H. Lu, G. Ayoko, Y. Zhang, S. Saunders, S.H.M. Lam, J. Wang, D.R Blake, “Tropospheric volatile organic compounds in China”, *Science of the Total Environment*, vol 574, pp. 1021-1043, 2017.
- K.L. Ebi and G. McGregor, “Climate Change, Tropospheric Ozone and Particulate Matter, and Health Impacts”, *Environ Health Perspect.*, vol 116, no 11, pp. 1449-1455.
- L. DiCaprio and F. Stevens (Production). F. Stevens (Direction). 2016. Before the flood. [Video documentary]. United States: National Geographic channel.
- L.-W. Lai, “Effect of photochemical smog associated with synoptic weather patterns on cardiovascular and respiratory hospital admissions in metropolitan Taipei”, *Inter J Environ Health Res.*, vol 22, no 4, pp. 287 -30, 2012.
- M. Goodarzi, M. Vahedpour and M. Solimannejad, “Investigation of the formation of acid rain based on the sulphur tetroxide (SO₄ (C_{2v})) and OH radical reaction”, *Struct. Chem.* vol 23, pp. 1609 -1615, 2012.
- M. Streibel, M. Rex, P. von der Gathen, R. Lehmann, N. R. P. Harris, G. O. Braathen, E. Reimer, H. Deckelmann, M. Chipperfield, G. Millard, M. Allaart, S. B.

- Andersen, H. Claude, J. Davies, H. De Backer, H. Dier, V. Dorokov, H. Fast, M. Gerding, E. Kyr, Z. Litynska, D. Moore, E. Moran, T. Nagai, H. Nakane, C. Parrondo, P. Skrivankova, R. Stubi, G. Vaughan, P. Viatte, and V. Yushkov, "Chemical ozone loss in the Arctic winter 2002/2003 determined with Match", *Atmos Chem Phys.*, vol 6, pp. 2783–2792, 2006.
- N. Dombrowski, A.P. Teske and B.J. Baker, "Expansive microbial metabolic versatility and biodiversity in dynamic guaymas Basin hydrothermal sediments", *Nat Commun.*, vol 9, no 4999, pp. 1-13, 2018.
- NOAA. (2019, May 2). Atmospheric concentrations of CO₂ from Mauna Loa, Hawaii [online]. Available: www.esrl.noaa.gov.
- R.E. Hendrick. "Radiation Doses and Risks in Breast Screening", *Journal of Breast Imaging*, vol 2, pp. 188-200, 2020.
- R. Xu, M. Alam, C. Stark, and R. Harrison, "Behaviour of traffic emitted semi-volatile and intermediate volatility organic compounds within the urban atmosphere", *Science of the Total Environment*, vol. 720, pp. 1-11, 2020.
- OECD. (2016, September 26). Global growth warning: Weak trade, financial distortion [online]. Available: www.oecd.org
- S. E. Manahan. *Introducción a la Química Ambiental*. Madrid: Editorial Reverté, 2011, pp. 725.
- WHO. (2000). Chapter 12. Effects of ozone on vegetation: critical levels. *Air Quality guidelines-second edition* [online]. Available: www.euro.who.int
- T.Y. Wong, "Smog induces oxidative stress and microbiota disruption" *Journal of Food and Drug analysis*, vol 25, pp. 235-244, 2017.
- Y. Fu and A. P. K. Tai, "Impacts of historical climate and land cover changes on tropospheric ozone air quality and public health in East Asia over 1980–2010", *Atmos Chem Phys Discuss.*, vol 15, pp. 14111–14139, 2015.
- Y. Liu, Q. Fan, X. Chen, J. Zhao, Z. Ling, Y. Hong, W. Li, X. Chen, M. Wang, and X. Wei, "Modelling the impact of chlorine emissions from coal combustion and prescribed waste incineration on tropospheric ozone formation in China". *Atmos Chem Phys.*, vol 18, pp. 2709 -2724, 2018.
- Z. L. Fleming, P. S. Monks, A. R. Rickard, D. E. Heard, W. J. Bloss, P. W. Seakins, T. J. Still, R. Sommariva, M. J. Pilling, R. Morgan, T. J. Green, N. Brough, G. P. Mills, S. A. Penkett, A. C. Lewis, J. D. Lee, A. Saiz-Lopez and J. M. C. Plane, "Peroxy radical chemistry and the control of ozone photochemistry at Mace Head, Ireland during the summer of 2002", *Atmos Chem Phys Discuss.*, vol 5, pp.12313–12371, 2005.

Esta primera edición de *Química Ambiental Básica*, fue editada por el sello editorial Corhuila y se terminó de imprimir en los talleres de Gente Nueva, en Bogotá, durante los primeros días del mes de abril del 2021.

Para su elaboración se usó papel Bond 75 gramos; la fuente empleada fue Book Antiqua para textos y títulos.