

QUÍMICA TERRESTRE

Autor: ANTONIO CHAMIZO Y ANDONI GARRITZ

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [DEDICATORIA](#)
- [INTRODUCCIÓN](#)
- [PRIMERA PARTE](#)
- [SEGUNDA PARTE](#)
- [COLOFÓN](#)
- [CONTRAPORTADA](#)



COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora Fundadora:

Física Alejandra Jaidar †

Coordinadora:

María del Carmen Farías



Primera edición, 1991

Primera reimpresión, 1995

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

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

D.R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-3439-X

Impreso en México



DEDICATORIA

A la memoria de la gigante DIANA CRUZ

Para vaciar progresivamente los silos que

nos dejó, con su ejemplo, en espera

de buenas mieses

Inicio



INTRODUCCIÓN

Química terrestre no es un tratado, ni un libro de texto y tampoco un libro de consulta. Esta obra es más bien el intento, con un mínimo de formalidad, de poner en contacto a los interesados en la química con algunos de los problemas cardinales, pero prácticamente desconocidos, de esta ciencia. Relevantes en cuanto a su relación con la Tierra y la humanidad.

Este propósito nos ha forzado a tocar, superficial, lateral o directamente, otras disciplinas científicas como la astronomía, la física, las ciencias de materiales y de la Tierra, la biología o la ecología, en las que no somos expertos. Pero nuestra intención es presentar un enfoque sintético, multidisciplinario, de ciencia integrada. De antemano, pedimos disculpas a los lectores de alguna incorrección o falta de actualización que exista en este intento de abarcar tanto. Nos jugamos a propósito esta posibilidad, a cambio del tal vez demasiado pretensioso objetivo globalizador perseguido.

Para ello hemos decidido hablar de nuestro planeta, de cómo se formó, del origen del Sol y de las estrellas, y de la vida, la nuestra, que finalmente proviene de ellas. Estamos en un Universo formado de materia, un Universo químico, y para iniciarnos en sus secretos es necesario acercarse a la química nuclear y a su desarrollo, estrechamente vinculado con las bombas atómicas y los reactores nucleares. Son estos dos temas, el origen y la evolución del Universo, así como el del descubrimiento y las aplicaciones de los cambios nucleares, los que integran la primera parte del texto.

La segunda aborda tres tópicos que, relacionados con las tres fases que conforman la corteza terrestre (gases en la atmósfera, líquidos en la hidrosfera y sólidos en la litosfera), nos permiten discutir sobre historia, estructuras, reacciones, procesos, peligros y hazañas del quehacer químico, una actividad que se desarrolla en México. Ciencia que, de una u otra manera, marca nuestra vida diaria.

JOSÉ ANTONIO CHAMIZO

ANDONI GARRITZ

Octubre de 1990

Inicio |



PRIMERA PARTE

- I. LA NATURALEZA Y SU EVOLUCIÓN QUÍMICA
- II. CAMBIOS NUCLEARES Y SUS APLICACIONES



I. LA NATURALEZA Y SU EVOLUCIÓN QUÍMICA

INTRODUCCIÓN

LA TIERRA, planeta que habitamos, no es más que un gran conjunto de mezclas de sustancias químicas. La materia en ella existía, como lo han demostrado los geólogos, desde hace 4 500 millones de años.

Pero, ¿cómo y cuándo se formó la Tierra?, ¿y nuestro Sol?, ¿y la Vía Láctea con sus 200 000 millones de estrellas?, ¿y las otras galaxias?

Además, ¿de dónde provino toda la materia que forma el Universo?, ¿cómo y cuándo se formaron los elementos químicos y sus átomos?, ¿y la vida?, ¿somos los únicos?

Todas estas preguntas inquietan al hombre. Su raciocinio le induce a reflexionar acerca de su origen y el de todas las cosas.

EVIDENCIA DEL ORIGEN COMÚN DE LOS ELEMENTOS

Actualmente, la ciencia ha permitido al género humano encontrar respuesta a algunas de esas interrogantes. Tal vez no todas sean totalmente correctas, pero las evidencias actuales indican que parecen ser acertadas aunque podrían ser modificadas en el futuro, a la luz de nuevas concepciones y de nueva información.

Desde luego, no podemos viajar al pasado para buscar el origen de la materia. No obstante, en el Universo actual hay indicios que nos permiten plantear hipótesis relativas a lo que sucedió muchos años atrás.

Además de conocer la superficie terrestre, hemos podido analizar meteoritos y tenemos ya muestras lunares y marcianas. Por otra parte, el análisis de la luz de las estrellas nos ha revelado su composición química.

Los átomos de cada elemento químico y las moléculas que dichos átomos forman se manifiestan de manera distinta, y por ello hemos podido reconocerlos a distancias enormes, gracias a la astrofísica y a la cosmoquímica.

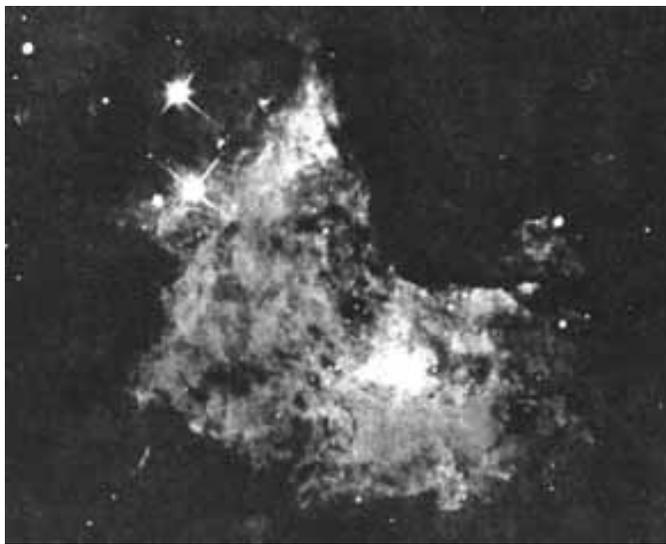


Figura I.1. Parte central de la nebulosa de Orión

Por otra parte, en el núcleo atómico se encuentra otra característica de cada elemento: su número de protones.

Recordemos que el núcleo está formado esencialmente por neutrones y protones, estos últimos con una carga eléctrica positiva. Los átomos de un mismo elemento tienen el mismo número de protones en el núcleo, aunque el de neutrones puede variar. Por ello acostumbramos definir al núclido de la siguiente forma: es un átomo con un número característico de protones y de neutrones.

● Protón Constituyentes del núcleo
○ Neutrón

Para referirse a un núclido determinado, se acostumbra emplear el símbolo químico del elemento correspondiente y colocar a su izquierda dos cantidades: arriba su número de masa A (A = número de masa o número de protones + neutrones), y debajo su número atómico Z (Z = número atómico o número de protones en el núcleo). Así el número de neutrones N es la diferencia $N = A - Z$.

Símbolos de algunos núclidos:
 ${}^1_1\text{H}$, ${}^3_1\text{H}$, ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$

Existen 109 elementos conocidos, con Z desde 1 hasta 109 , pero hay más de 1 300 variedades de núcleos. Cada una de éstas es un núclido.

Si dos núcleos tienen igual Z ,
decimos que son isótopos

Un hecho sorprendente es que la abundancia de los elementos químicos, e incluso de sus isótopos, sea similar en todos los objetos conocidos del Universo, una vez que se toman en cuenta ciertos procesos secundarios. Por ejemplo, es obvio que los meteoritos que han caído en la Tierra han perdido muchos elementos ligeros, pero aquellos que se conservan existen en las mismas proporciones que en el Sol. Asimismo, en la corteza terrestre, o en la lunar, los elementos también reproducen la abundancia solar.

Isótopos del Hidrógeno (Z = 1)



Isótopos del helio (Z = 2)



Figura I.2. Isótopos, protones y neutrones se mantienen unidos por el núcleo gracias a la llamada *interacción fuerte o fuerza nuclear*. Por ello, para formar o destruir un núcleo se requiere o se libera una gran cantidad de energía.

ABUNDANCIA DE LOS ISÓTOPOS

Como hemos visto, los átomos de un elemento no son todos iguales. Hay átomos de hidrógeno, por ejemplo, con 1, 2 o 3 partículas en su núcleo. Desde luego, en todos ellos hay sólo un protón, y eso es lo que caracteriza al hidrógeno. Los diferentes isótopos de los átomos no son igualmente estables ni ocurren en la naturaleza con la misma posibilidad. Por ejemplo, de cada 100

000 átomos de hidrógeno, 99 985 son de ${}^1_1\text{H}$ y 15 son de ${}^2_1\text{H}$.

Los de tritio (${}^3_1\text{H}$) son inestables y, por tanto, casi no se encuentran libres en la naturaleza. Por ejemplo, el boro tiene dos isótopos muy estables, pero no ocurren con la misma abundancia. De cada 10 000 átomos de boro 1 978 son de ${}^{10}_5\text{B}$ y 8 022 son de ${}^{11}_5\text{B}$.

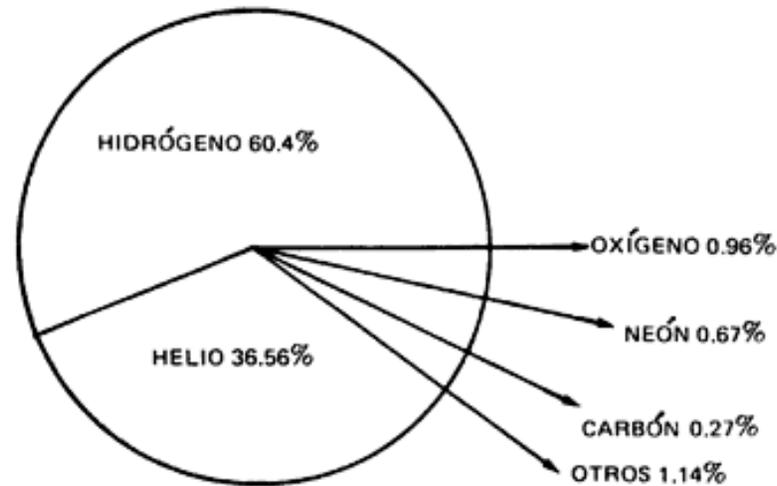


Figura I.3. Abundancia relativa de los elementos del Universo (% en masa)

¿Por qué aparecen con esta abundancia? y ¿por qué sucede lo mismo en la Tierra, en el Sol o en cualquier otro lugar del Universo?, ¿por qué se repite este hecho para otros muchos elementos?

Por si fuera poco, en las estrellas (ya sea de nuestra galaxia, o de otras), así como en el medio interestelar, se ha detectado la presencia dominante del hidrógeno y helio. Los otros elementos se han encontrado en menores proporciones.

Estos hechos sugieren que la formación de los elementos químicos tiene que haber sido común para todo el Universo. Es decir, existió un origen común de toda la materia.

LA GRAN EXPLOSIÓN

Todo hace pensar a los científicos que hace unos 15 000 millones de años, la materia, que se encontraba concentrada con altísima

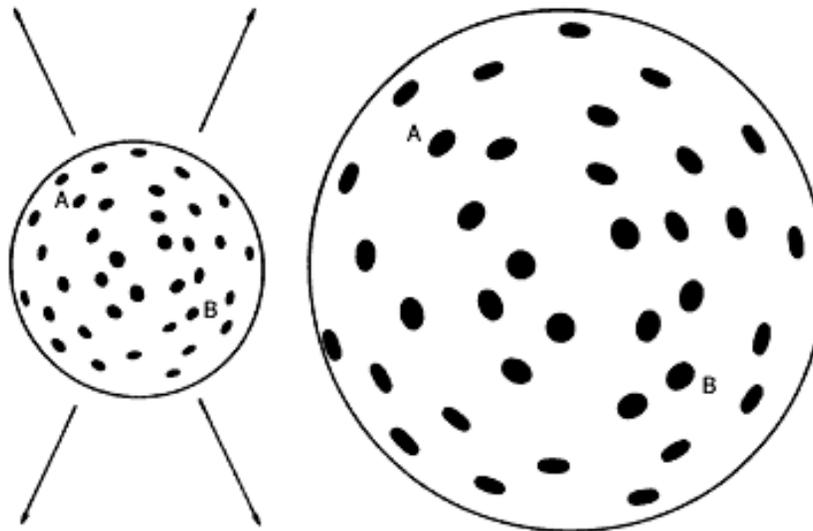
densidad y temperatura, explotó violentamente. La explosión provocó su expansión y enfriamiento graduales.

Hace más de 60 años, en 1923, el astrónomo Hubble demostró que las galaxias se alejan unas de otras como los puntos trazados sobre un globo que se infla.

Vivimos, pues, en un universo en expansión. En 1946, George Gamow propuso que, retrocediendo en el tiempo, debió existir un momento en que toda la materia estuviera concentrada. Según Gamow, en la gran explosión se sintetizaron los elementos químicos en las proporciones actuales (en esto se equivocó, como veremos). Hasta 1965 no existió ninguna prueba de la ocurrencia veraz de la gran explosión.

Medio segundo después de la explosión,  la materia no tenía su apariencia actual. Existía como partículas aisladas de materia y antimateria interactuando continuamente entre sí y con la radiación. Después, la temperatura de la "sopa" de materia y radiación era de unos 10^{10} K (10 000 millones de grados Kelvin). Se habían formado ya electrones, protones y neutrones.

En la antimateria las partículas tienen la carga opuesta a las de la materia; así, el *positrón*, el equivalente del electrón, tiene carga positiva



I.4. La gran explosión. Las galaxias se alejan unas de las otras.

LA FORMACIÓN DE LOS NÚCLEOS DE HIDRÓGENO Y HELIO

Las colisiones entre protones dieron lugar a los primeros núcleos con más de una partícula, los cuales se estabilizaron cuando la temperatura se redujo a 10^9 K.

Unos minutos después de la explosión, el Universo contenía ya una buena proporción de helio (entre 25 y 30% en peso). Sin embargo, como continuó la expansión y el enfriamiento, no fue posible que más partículas se adionaran a los núcleos de helio para formar cantidades apreciables de elementos más pesados, como litio ($Z = 3$), berilio ($Z = 4$), boro ($Z = 5$), carbón ($Z = 6$), etcétera.

A temperaturas tan altas, los electrones existentes no permanecían ligados a los núcleos por atracción eléctrica. Ello sólo pudo ocurrir cuando el enfriamiento posterior alcanzó los 5 000 K. Entonces, los núcleos de hidrógeno y helio se vieron rodeados de sus electrones, y de esta manera se formaron los primeros átomos eléctricamente neutros. A partir de este momento dejó de existir la interacción frecuente, que había venido dándose entre las partículas y la radiación, la cual quedó "libre" para viajar por todas partes.

500 000 años después de la gran explosión se habían formado, por fin, átomos de hidrógeno y helio

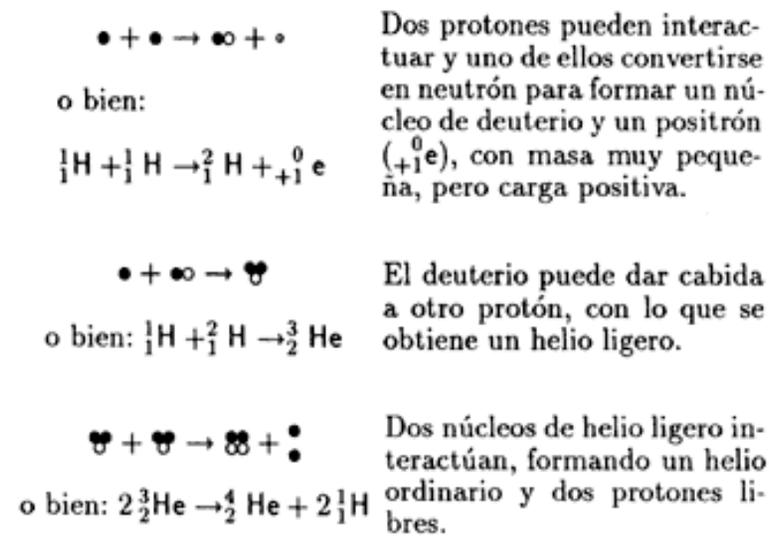
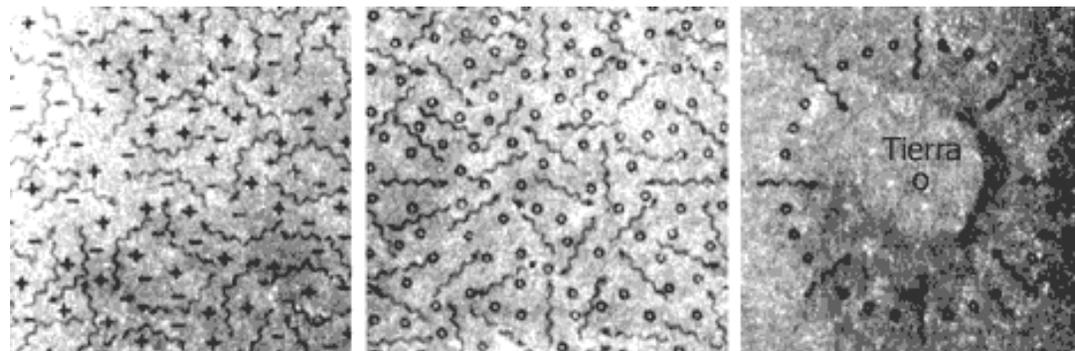


Figura I.5 El ciclo protón-protón es un mecanismo por el cual se sintetizaron los núcleos de helio a partir de protones.

LA RADIACIÓN CÓSMICA DE FONDO

En 1965, casi por casualidad, los astrofísicos Penzias y Wilson, quienes buscaban posibles interferencias a las transmisiones vía satélite, se encontraron con una radiación que llegaba a la Tierra desde todas las direcciones. Esta se denominó "radiación cósmica de fondo" y constituye la mayor prueba de la veracidad de la gran explosión.



I.6. Radiación de fondo. Según la teoría de la gran explosión (izq.), el Universo primitivo estaba lleno de protones y electrones que absorbían y emitían radiación. Tras medio millón de años (centro), al formarse átomos estables, la radiación no fue absorbida o emitida con tanta frecuencia y quedó libre en el espacio. Esta radiación aún se difunde y fue detectada desde la Tierra (der.) en 1965, lo cual confirió gran credibilidad a esta teoría.

¿Qué sucedió entonces para que se formaran los elementos más pesados que el helio en las proporciones actuales? Es un hecho que los elementos más pesados se forman en las estrellas.

GÉNESIS QUÍMICA EN UNA ESTRELLA

Unos 100 mil millones de años después de la gran explosión comenzaron a formarse las galaxias y, en su interior, gracias a los efectos de la gravedad, también la primera generación de estrellas.

Debido a que poseen masa, los cuerpos tienen la propiedad de atraerse mutuamente. Las estrellas nacen cuando una nube de gases se compacta por efecto de la gravedad. La fuerza de gravedad comprime los gases y los calienta, lo cual provoca que su presión se incremente.

En nuestra atmósfera, por ejemplo, ambas fuerzas están perfectamente equilibradas, es por ello que pese a la atracción terrestre, la atmósfera no cae al suelo.

En una estrella en formación o protoestrella, la gravedad domina, la nube de gases toma forma esférica y al comprimirse, su centro se calienta cada vez más; hasta este momento, la única fuente de energía es la contracción gravitatoria. Pero cuando la temperatura alcanza los 10 millones de grados, entra en juego el segundo recurso energético del que dispone la estrella: la fusión de protones para producir helio, que es un fenómeno similar al que ocurrió minutos después de la gran explosión. La fusión del hidrógeno es la fuente de energía más duradera y estable de las estrellas, pues la presión y la gravedad se equilibran. En esta etapa se encuentra nuestro Sol, el cual "quema hidrógeno como combustible". No obstante, su vida durará aproximadamente 5 000 millones de años más.

Con el tiempo, el corazón de la estrella se va enriqueciendo de helio y, por ello, el hidrógeno escasea. Cada vez es más improbable la fusión del hidrógeno, por lo que en el centro estelar cesa la generación de energía. El equilibrio previo entre la presión del gas (hacia afuera) y la gravedad (hacia adentro) toca a su fin. La gravedad gana la batalla y comienza a reducirse el corazón de la estrella.

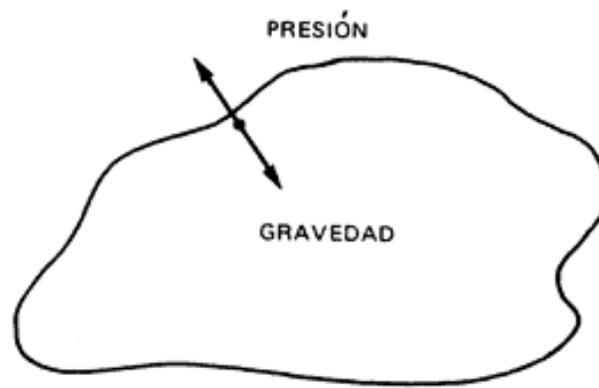


Figura I.7. Presión y gravedad. En una estrella presión y gravedad son fuerzas que actúan en sentido inverso.

El Sol es una fábrica en la que cada segundo 600 millones de toneladas de H se convierten en He. Con un diámetro de 1.4 millones de km, equivalente a poner 109 Tierras en fila, la temperatura de su superficie asciende a 6 000° C, pero se calcula que en el centro es de 15 millones de grados.

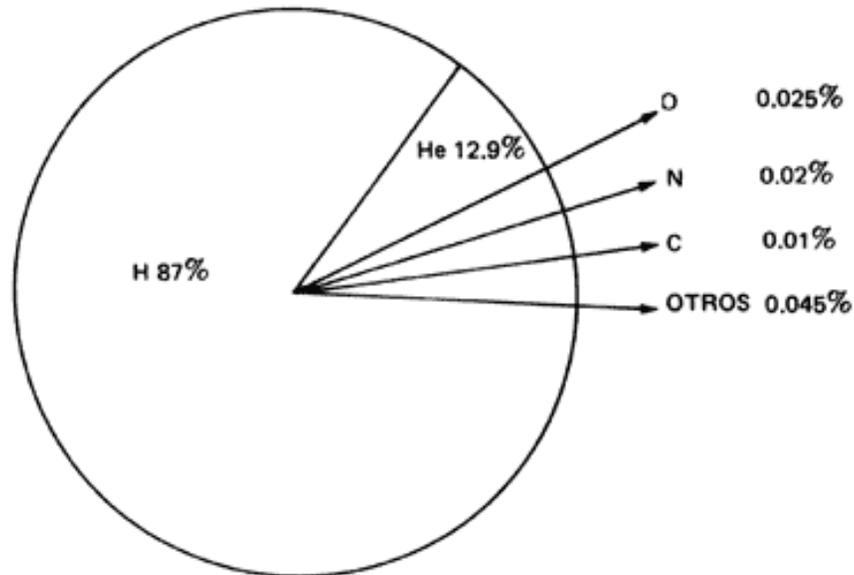


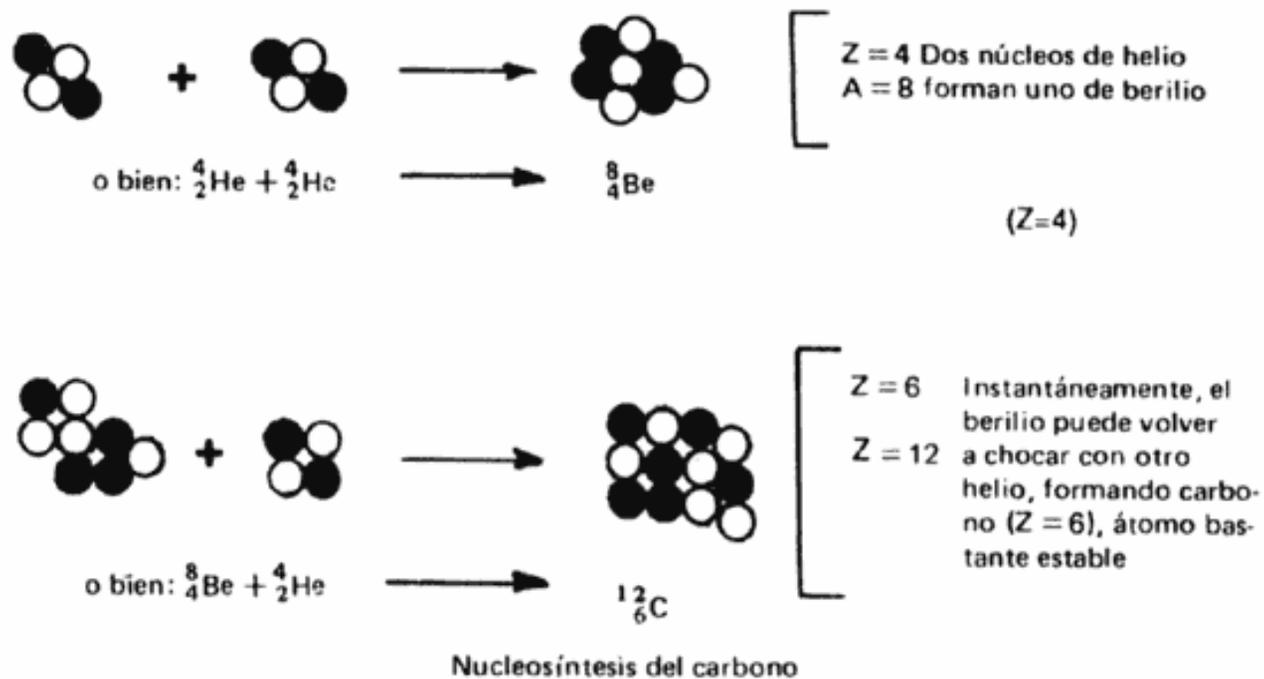
Figura I.8. Composición química actual del Sol (% de átomos)

El helio lleva este nombre porque se descubrió en el Sol (*helios* en griego) antes que en la Tierra

LA SÍNTESIS DEL CARBONO AL HIERRO

La compresión gravitatoria eleva la temperatura de la estrella, con lo que pueden ocurrir nuevas reacciones de fusión. La más común es la transformación de helio en carbono, un núcleo con seis protones y seis neutrones.

Una vez que todo el helio del centro se ha convertido en carbono (Figura 1.9), la estrella vuelve a contraerse hasta alcanzar temperaturas de más de 100 millones de grados, a las que pueden ocurrir otras reacciones nucleares que convierten al carbono en elementos más pesados, como oxígeno, nitrógeno, neón, etc. Así se sintetizan todos los elementos químicos hasta llegar al hierro ($Z = 26$ $A = 56$), donde el proceso se detiene.



I.9. Nucleosíntesis del carbono. Aunque el Be es muy inestable, se ha detectado en las estrellas en ínfima catidad, lo que apoya la realidad de este esquema.

El carbono, C, átomo indispensable para la vida, tuvo su origen en las estrellas

Obviamente, llega un momento en que el hierro ocupa el centro de la estrella y concluye su fuente de energía nuclear. La gravedad vuelve a dominar y la estrella se contrae más y más. Si su masa es pequeña (como la del Sol o un poco mayor), la contracción se detiene, formándose una estrella *enana blanca*, que al enfriarse deja de emitir luz (*enana negra*).

En una enana blanca la densidad es tan enorme que un cm³ pesa tanto como un camión

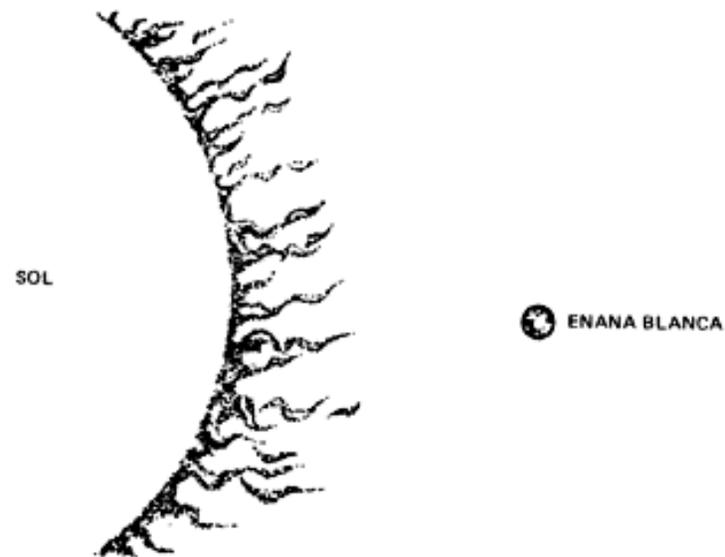


Figura I.10. Comparación del Sol con una enana blanca.

El núcleo de hierro es el más pesado que puede obtenerse de esta forma. Cualquier combinación de dos núcleos para obtener un elemento más pesado que el hierro requiere energía, en lugar de producirla. Pero si la masa de la estrella es grande (varias veces la del Sol), la contracción no puede detenerse. Los núcleos de hierro y los electrones en el corazón de la estrella se transforman en neutrones libres, los cuales logran detener el colapso. Sin embargo, las capas exteriores se precipitan hacia el centro generando tal temperatura y presión que se crea una onda de choque hacia afuera. La explosión, conocida como supernova, es tan energética que logra que uno, dos y hasta más de cien neutrones se adicionen a los núcleos de hierro, formándose así los elementos con más de 26 protones.



Todos los elementos sintetizados se desparraman por el espacio como polvo estelar, esperando el día en que la gravedad vuelva a formar otra estrella. De hecho, nuestro Sol es una de ellas: *una estrella de segunda generación*, pues contiene buena proporción de elementos pesados que no se sintetizaron allí sino en otras estrellas.

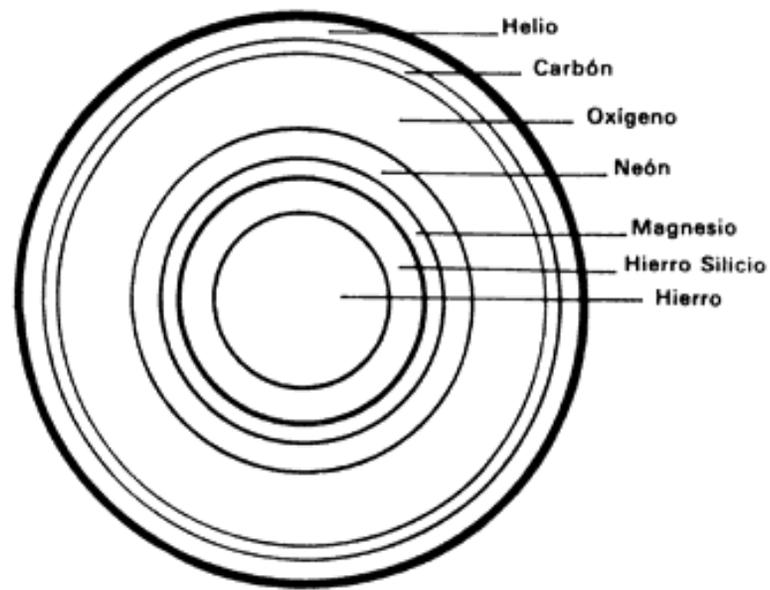


Figura I.11. Estructura de una estrella. Las estrellas adquieren una estructura de capas, a la manera de una cebolla, con un centro de hierro y múltiples reacciones ocurriendo a todos niveles. En esta figura se muestra un ejemplo de composición de una estrella que ha "quemado" todo su hidrógeno.

La síntesis de elementos con más de 26 protones sólo es factible suministrando energía. Ello ocurre en explosiones estelares.

Debido a la explosión, la estrella pierde mucha masa, pero su centro de neutrones sobrevive, y queda como una estrella de neutrones. Finalmente, si la estrella es lo bastante pesada, la contracción continúa indefinidamente. No parece haber nada que la detenga. ¿Qué sucede después? Se supone que se forma un *hoyo negro*, de donde ni siquiera la luz puede salir. 

En una estrella de neutrones la densidad es tal que un cm³ pesa unos ¡500 millones de toneladas!

LA TIERRA Y SU COMPOSICIÓN QUÍMICA

Los científicos están de acuerdo en que hace unos 4 500 millones de años nuestro Sol y todos sus planetas se formaron a partir de una nube de gases y polvo estelar. Sin embargo, su composición actual no es igual a la inicial. Por una parte, el Sol se ha venido enriqueciendo en helio, debido a las reacciones nucleares de fusión. Por otro lado, en la Tierra, debido a su (relativamente) pequeña masa, los elementos más ligeros han ido escapándose de su atracción gravitatoria. Además, el lento proceso de su enfriamiento, la gran actividad interna, los efectos climáticos y la presencia misma de la vida han hecho que la Tierra actual no sea muy semejante al planeta primitivo.

Uno de los modelos para explicar la formación de la Tierra y de los otros planetas propone el desarrollo de una nebulosa solar primitiva con una masa algo mayor que la actual del Sol, concentrada alrededor del eje de giro, pero que todavía no puede reconocerse como el Sol. Los planetas se formaron por la acumulación de granos interestelares y, en el caso de los planetas exteriores, por la atracción y adherencia de gases. Este proceso causó un calentamiento, con lo que una capa de hierro fundido se depositó en el centro, como sucedió en el caso de la Tierra.

Nuestro planeta se encuentra formado principalmente por silicatos (piedras, compuestos de silicio, **Si**, y oxígeno, **O**) y Fe metálico. Es importante hacer notar que en la Tierra ciertos elementos están presentes en cantidades completamente diferentes de las del resto del Universo. Así, en nuestro planeta prácticamente no hay **H** ni **He** y el **C** y **N** (nitrógeno) son poco abundantes. Los gases nobles neón, **Ne**, kriptón, **Kr** y xenón, **Xe** son aún más escasos.

CUADRO I.1 Manuel Peimbert, astrónomo mexicano



Figura I.12. Manuel Peimbert, astrónomo mexicano.

El doctor Peimbert trabaja en el Instituto de Astronomía de la UNAM y es el astrónomo mexicano más citado por sus colegas de todo el mundo. Sus contribuciones más recientes se han centrado en la evolución química de las galaxias. En ellas, además de miles de millones de estrellas, existe el llamado "gas interestelar". Peimbert se ha dedicado a estudiar cómo evoluciona la composición química de este gas.

A partir de este gas interestelar se forman las estrellas y éstas, durante su evolución, transforman en su interior los elementos químicos a partir de reacciones nucleares. Posteriormente pierden materia con una composición química diferente de la inicial, lo que modifica la composición química del medio interestelar. Existen tres fuentes principales que afectan la composición del gas interestelar.

- 1. *Supernova.* Se producen cuando estrellas de enorme masa hacen explosión al final de su evolución, con lo que se dispersa por el espacio no sólo la masa de la estrella, sino toda su energía. Las supernovas nutren así al medio interestelar de elementos pesados.**
- 2. *Nebulosas galácticas.* Son masas luminosas de gas lanzadas al espacio por estrellas de masa intermedia al final de su evolución. Las nebulosas galácticas son el producto de un cataclismo y constituyen la materia arrojada al espacio por una nova.**
- 3. *Novas.* Son estrellas cuyo brillo aumenta intensamente en periodos muy cortos -por ejemplo, en unos días- para luego ir disminuyendo lentamente a lo largo de varias decenas de años hasta recuperar el brillo original. En el proceso se provocan explosiones que lanzan al espacio diferentes porciones de su masa y energía. Se calcula que en nuestra galaxia se producen más de 1 000 novas por año, pero sólo unas cuantas -aproximadamente 20- alcanzan la magnitud de luminosidad suficiente para ser percibidas desde la Tierra.**

Entre los resultados más importantes obtenidos por el doctor Peimbert y sus colaboradores figuran los siguientes:

a) La composición química inicial del gas durante la formación de las galaxias, antes de que se formaran las estrellas, era de un 23% de helio-4 y un 77% de hidrógeno.

b) La fuente principal de átomos de carbono-12 y nitrógeno-14 en el gas interestelar proviene de nebulosas planetarias.

La formación del helio pregaláctico ocurrió durante *la gran explosión* y las estrellas han sido responsables de la formación de helio adicional y de todos los elementos más pesados que este elemento.

Para explicar tales hechos se ha propuesto que los elementos se condensan formando partículas sólidas microscópicas; posteriormente, debido a colisiones y adhesiones, éstas constituyeron el planeta. De esta manera, la abundancia de compuestos gaseosos en la Tierra sería pequeña.

Se supone que Mercurio, el planeta más cercano al Sol, tiene mayor cantidad de Fe (en términos relativos) que los demás planetas, mientras que los más lejanos como Júpiter y Saturno se encuentran formados principalmente por agua, H₂O, amoníaco, NH₃, y metano, CH₄, sólidos

Para que los elementos se condensen en estado sólido es importante conocer la temperatura. Se han hecho diversas estimaciones de este proceso, y se supone que para condensar los silicatos y el de la temperatura de la nebulosa solar en la vecindad de la Tierra debería estar por debajo de 1 500 K. Al disminuir la temperatura se van condensando los demás elementos hasta llegar a los 600 K, que sería la temperatura de la Tierra primitiva (Cuadro I.2). Este proceso, sin embargo, no justifica la presencia del carbón en nuestro planeta, ya que para condensarlo en forma de metano (la molécula más simple con C y H) se requieren menos de 100K.



Figura I.13. La formación de la Tierra

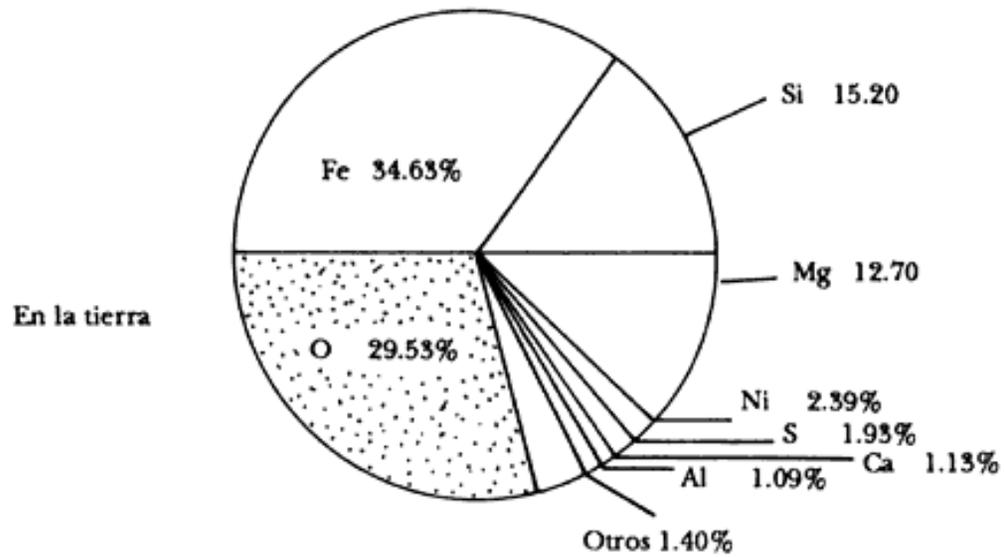
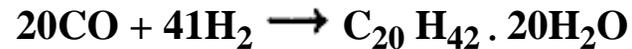


Figura I.14. Abundancia realtiva (en % de masa) de los elementos en la Tierra.

Pero, desde luego, en la Tierra hay **C**, y para explicarlo se ha sugerido que una vez que el **C** se combinó con oxígeno para formar **CO**, este último compuesto habría reaccionado con **H₂** para producir hidrocarburos, en una reacción del tipo Fischer-Tropsch, así llamada en honor de los químicos alemanes que la desarrollaron. Estas reacciones pueden usarse para producir comercialmente gasolina y otros hidrocarburos. Así, por ejemplo, tenemos:



Estos hidrocarburos de alto peso molecular son estables y sólidos a altas temperaturas.

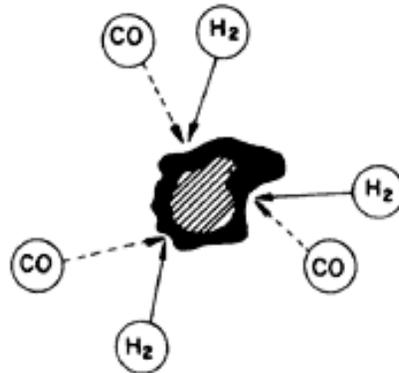


Figura I.15. La reacción Fischer-Tropsch. Una partícula de polvo formada por silicato hidratado o magnetita, cataliza la reacción de **CO y **H₂** para constituir hidrocarburos pesados, los cuales se depositan sobre la partícula con lo que adquiere la forma de una sustancia alquitranada.**

Si en la reacción de Fischer-Tropsch están presentes **NH₃** y **H₂O**, se forman compuestos orgánicos complejos. Así, el nitrógeno y el oxígeno se incorporarían naturalmente a las breas y alquitranes, convirtiéndose en parte de la Tierra aun cuando el **NH₃** y el **H₂O** permanecieran gaseosos a 600 K.

CUADRO I.2 Temperaturas de condensación en un gas de composición solar en vías de enfriamiento.

<i>Temperatura</i>	<i>Sustancias</i>
1 800-1 500	Calcio, aluminio, óxido de titanio, silicatos
1 450	Metal ferroso
1 400-1 300	Silicatos de magnesio
680	$\text{Fe} + \text{H}_2\text{S} \longrightarrow \text{FeS} + \text{H}_2$
500-400	$3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2$
160	Hielo
110	$\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ en forma sólida
60	$\text{CH}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ en forma sólida

ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA

La estructura interna de la Tierra nos es desconocida. Sin embargo, a partir de estudios sismológicos y geofísicos se ha establecido la idea de que está formada por tres capas principales: la más externa, llamada *corteza*, que va desde la superficie hasta unos 17 km de profundidad y que comprende la atmósfera (gases), la hidrosfera (agua) y lo que algunos autores denominaron litosfera, que no es más que la parte sólida de la misma capa, formada principalmente por rocas ígneas. Una capa intermedia conocida como *manto* se extiende aproximadamente 2 900 km por debajo de la corteza y está constituida por silicatos metálicos, principalmente de magnesio, **Mg**, y **Fe**, así como por una gran variedad de óxidos y sulfuros metálicos. La capa más interna, lo que llamamos el centro de la Tierra, es el *núcleo*, formado por **Fe** y níquel, **Ni**.

Debido básicamente a diferencias de densidad, tanto el manto como el núcleo pueden subdividirse en dos capas, como se muestra en la figura I.16.

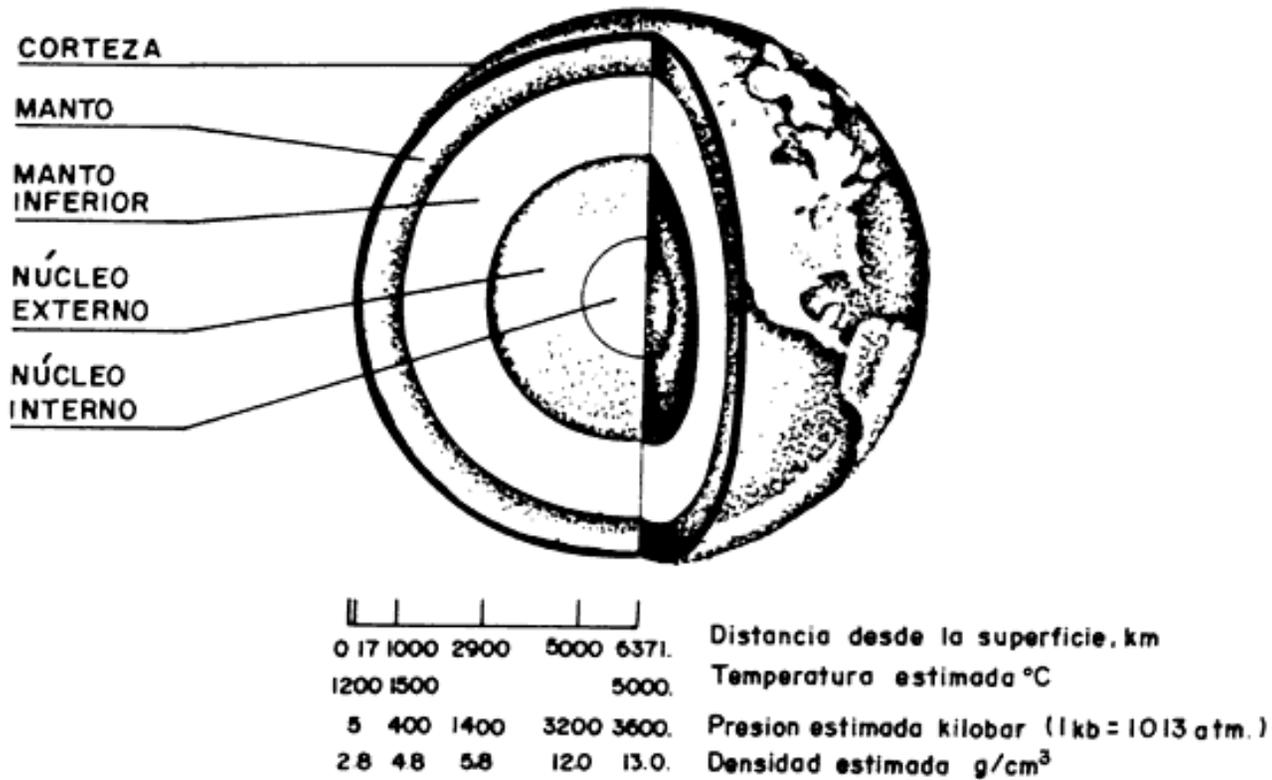


Figura I.16. Estructura interna de la Tierra

ABUNDANCIA DE LOS ELEMENTOS EN LA CORTEZA TERRESTRE

De todos los elementos que constituyen la Tierra, la humanidad sólo tiene acceso directo, por lo pronto, a los de la corteza (Figura I.17). Acerca de algunos de estos elementos, de sus compuestos y reacciones tratará la segunda sección de este libro.

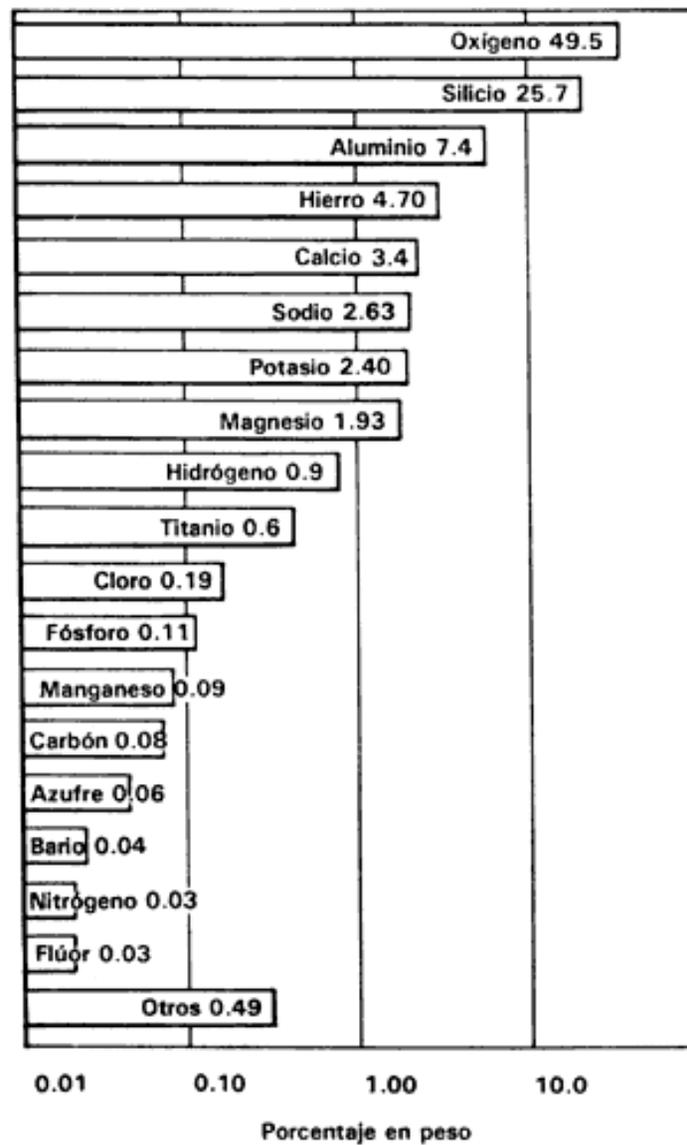


Figura I.17. Abundancia de los elementos en la corteza terrestre

EL ORIGEN DE LA VIDA

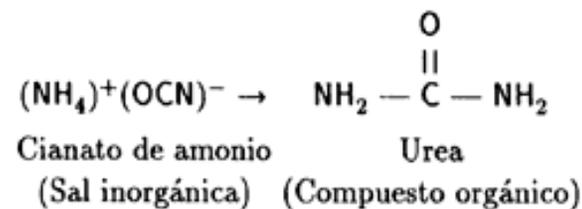
Como lo propuso el científico soviético A. I. Oparin en 1924, hoy se acepta que la vida surgió sobre la Tierra en los primeros tiempos de su historia, al sintetizarse y agruparse diversos compuestos de carbono en la atmósfera y en los océanos de la Tierra

primitiva.

Hace unos 160 años ésta habría sido una hipótesis imposible, pues se creía que los compuestos químicos elaborados por los seres vivos eran esencialmente diferentes a los demás existentes en la naturaleza.

**Las químicas, orgánica e inorgánica, se concebían
"divorciadas"**

Se suponía que ningún compuesto orgánico podría obtenerse sin la ayuda de un proceso vital. Sin embargo, en 1828 Federico Wöhler obtuvo el primero de ellos (urea) a partir de materia inorgánica (cianato de amonio).



A partir de entonces, los compuestos orgánicos de carbono se manejaron ordinariamente en el laboratorio. No obstante, la hipótesis de Oparin acerca de la síntesis espontánea de aminoácidos, que son los componentes de las proteínas y formas primarias de vida en la Tierra primitiva, era demasiado temeraria.

En 1953 se dio la primera muestra de que ello no era imposible: Stanley L. Miller simuló un experimento en las condiciones supuestas para la Tierra hace unos 4 000 millones de años, y obtuvo varios aminoácidos.

Se cree que la atmósfera primitiva estaba compuesta de metano, amoniaco, agua e hidrógeno molecular, que es precisamente la atmósfera de Júpiter y Saturno, salvo que allí el agua está congelada. Las fuentes más abundantes de energía eran la luz ultravioleta, procedente del Sol, y las descargas eléctricas.

Con estos compuestos mezclados en un matraz, Miller obtuvo, en 1953, pequeñas cantidades de cinco aminoácidos, algunos de ellos esenciales para la vida, como:

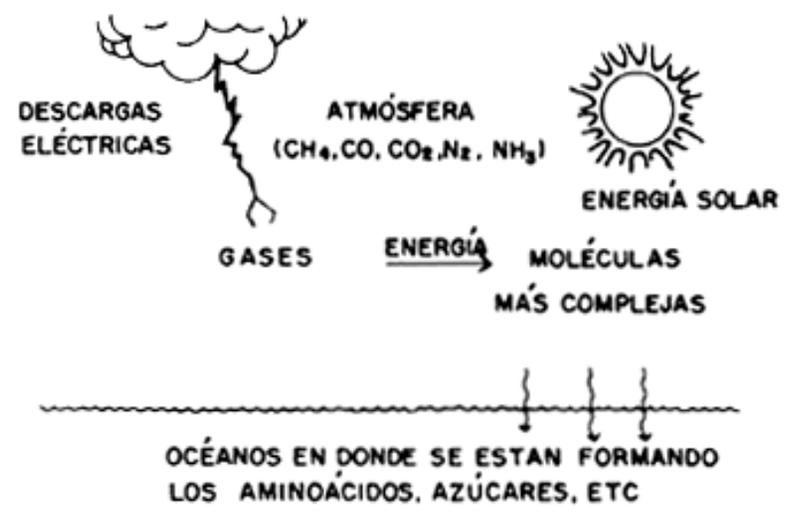
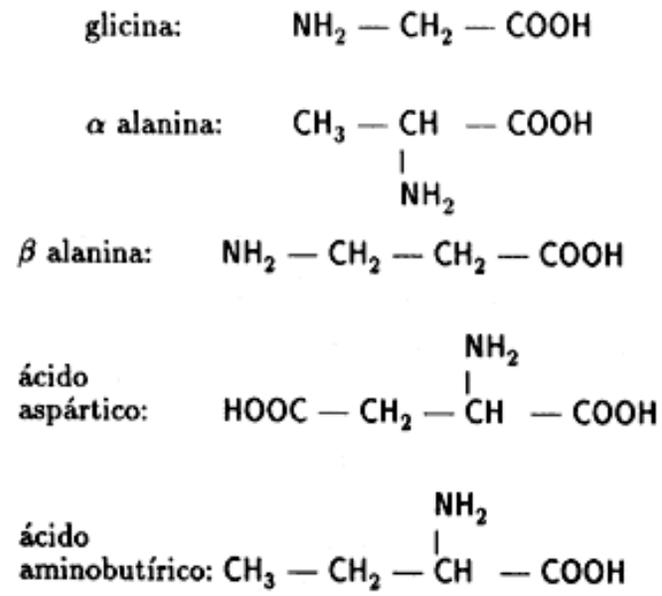


Figura I.18. Esquema del escenario primitivo donde supuestamente se originó la vida en la Tierra.

También obtuvo muchos otros productos de naturaleza orgánica.

Posteriormente, y como resultado de estas reacciones que simulan las condiciones originales de la Tierra, se han encontrado varias otras sustancias necesarias para la vida. Por ejemplo, se han identificado péptidos (hasta de cinco aminoácidos unidos en la misma cadena), bases púricas y pirimídicas (componentes de los ácidos nucleicos) y muchos otros.

Péptidos: polímero de aminoácidos

Es cierto que de la existencia de un conjunto de compuestos orgánicos en los océanos primitivos hasta la formación de moléculas complejas capaces de autorreproducirse (vida), hay un largo trecho. Sin embargo; se cree que ello ocurrió durante unos 600 millones de años, de tal forma que hace unos 3 400 millones de años ya existía vida sobre la Tierra.

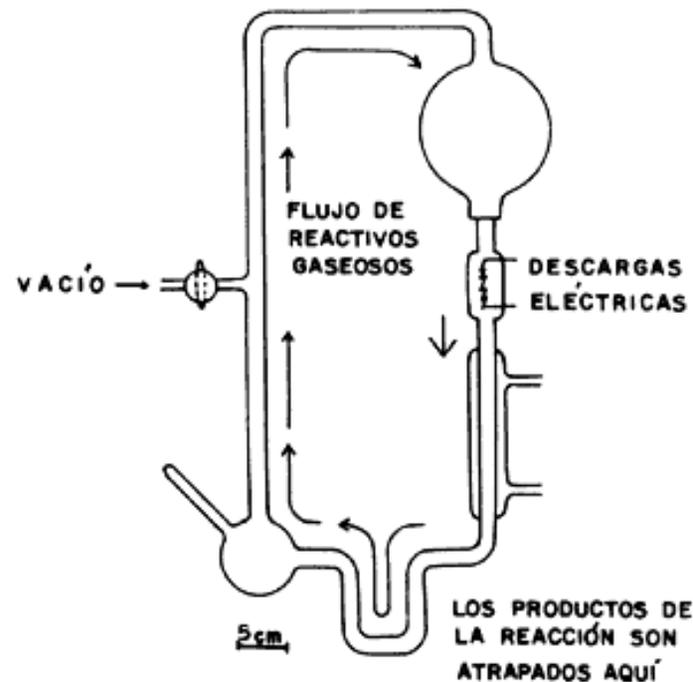
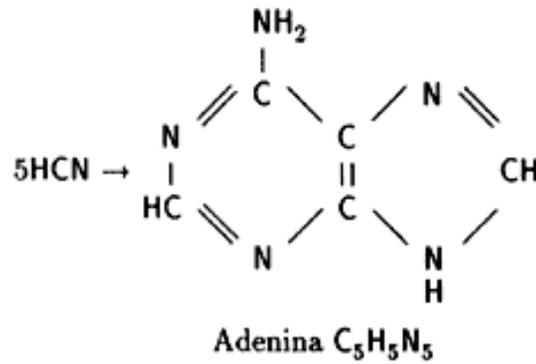


Figura I.19. Aparato de Miller. Se diseñó para investigar las reacciones químicas en lo que supuestamente era la atmósfera primitiva.

Pero no son estas condiciones externas las únicas capaces de posibilitar la formación de este tipo de moléculas. De hecho, en una situación prácticamente opuesta, a bajas temperaturas, en hielo, L. Orgel obtuvo adenina a partir de ácido cianhídrico. Hoy sabemos que al hacer burbujear ácido cianhídrico, **HCN**, a través de una solución de hidróxido de amonio, **NH₄ OH**, este proceso tan "inusual" parece ser casi inevitable. La fórmula empírica de la adenina, **H₅C₅N₅**, corresponde a la de un ácido cianhídrico pentamérico. Recordamos al lector que la adenina es un compuesto clave en el código genético.



Paradójicamente, el HCN, una de las sustancias más tóxicas para la mayoría de los seres vivos, puede ser la precursora prebiótica de una de las moléculas más importantes para la vida: la adenina.

En fechas recientes también se sostiene que la misma nube de polvo y gases que dio lugar al sistema solar ya contenía compuestos orgánicos, los cuales se han encontrado en cierto tipo de meteoritos. Asimismo, durante los últimos años la radiotelescopía ha servido para detectar en el espacio interestelar gran cantidad de moléculas, algunas de ellas orgánicas. Se han identificado más de 50 moléculas en el espacio interestelar. Algunas de ellas se presentan en el cuadro I.3.

CUADRO I.3 Moléculas en el espacio interestelar

<i>Moléculas inorgánicas</i>		<i>Moléculas orgánicas</i>	
H ₂	Hidrógeno	HCHO	Formaldehído
CO	Monóxido de carbono	HCOOH	Ácido fórmico
CS	Monosulfuro de carbono	CH ₃ OH	Metanol
SiO	Monóxido de silicio	NH ₂ CHO	Formamida
NO	Monóxido de nitrógeno	CH ₃ NH ₂	Metilamina
H ₂ O	Agua	CH ₃ CN	Acetonitrilo
CS ₂	Disulfuro de carbono	CH ₃ CH ₂ OH	Etanol
NH ₃	Amoniac	CH ₃ OCH ₃	Éter dimetílico

La molécula más pesada descubierta hasta 1982 en el espacio es el cianooctatetrano, **HC₈N**. Nunca ha sido sintetizada en la Tierra; sin embargo, ha podido caracterizarse a partir de datos espectroscópicos.

De cualquier forma, en los océanos de la Tierra se concentraron paulatinamente todas estas sustancias orgánicas y se formaron compuestos más complejos. Uno de ellos, el ácido desoxirribonucleico o **ADN**, desempeñaría un papel crucial. El **ADN** tiene dos propiedades clave:

- 1) Puede actuar como "patrón" para manufacturar cadenas de aminoácidos (proteínas).
- 2) Tiene la capacidad de duplicarse a sí mismo.

La presencia de **ADN** equivale a la existencia de vida; desde entonces, la evolución ha actuado hasta llegar al hombre.

En la Tierra se han encontrado fósiles microscópicos de bacterias con una antigüedad de 3 000 millones de años. Desde la aparición de las algas cianofitas; el oxígeno producido por ellas se fue acumulando en la atmósfera y dio lugar a su naturaleza actual, que difiere mucho de la primitiva.

En este momento no puede producirse el mismo fenómeno que al inicio, debido tanto a la diferente atmósfera como a que los rayos ultravioleta del Sol ya no penetran hasta alcanzar la superficie de la Tierra, como antes ocurría.

Recordemos que en las estrellas se sintetizan los átomos de carbono, de manera que, después de todo podemos afirmar, como lo hace Carl Sagan, que nosotros (y toda la vida en la Tierra) somos "hijos de las estrellas".

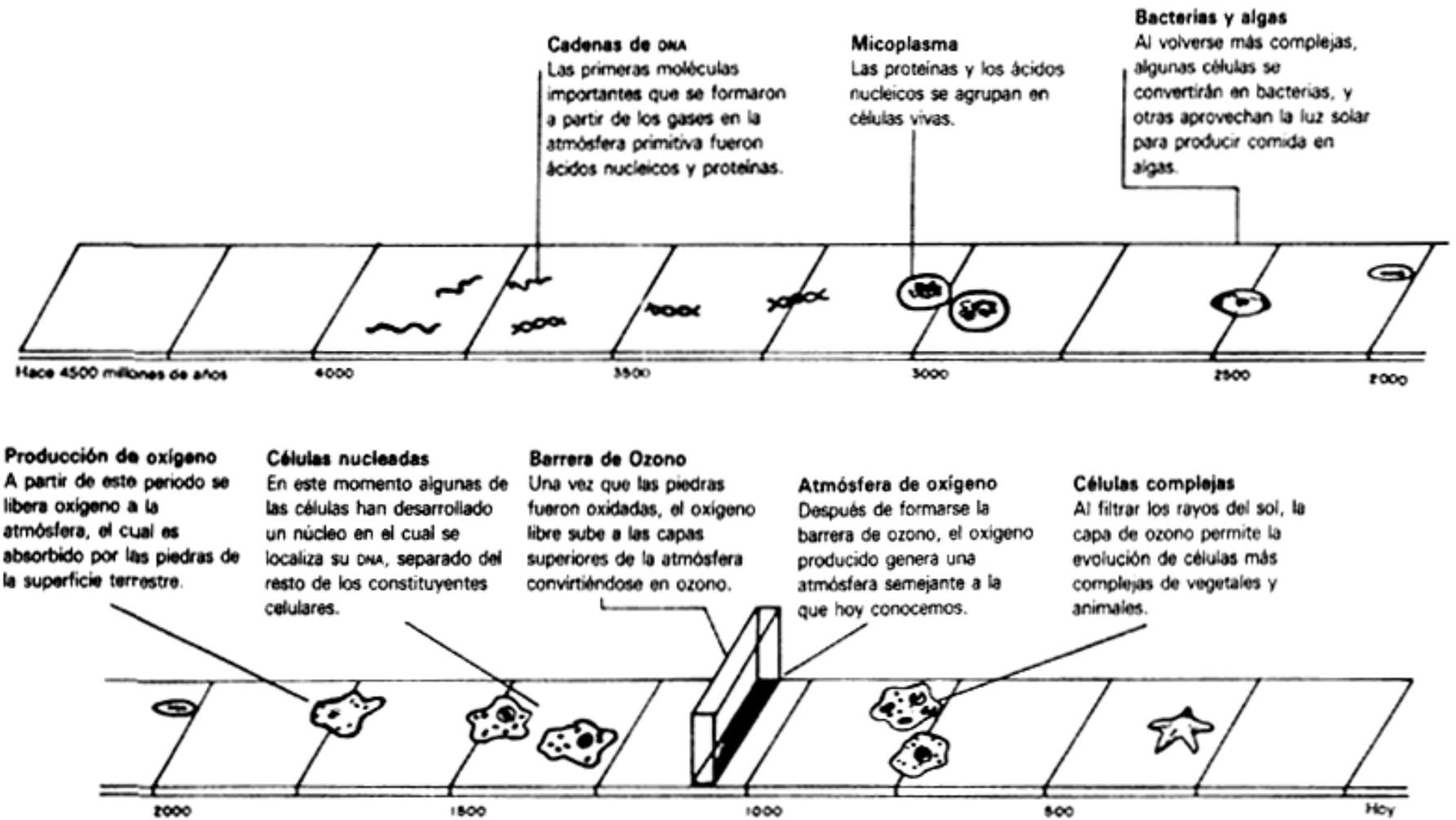


Figura I.20. La evolución

CUADRO I.4 El calendario cósmico

Hace algunos años, Carl Sagan introdujo el concepto de "calendario cósmico", en el que el tiempo "se comprime" para mostrarnos, en un "año cósmico", toda la evolución del Universo. En este calendario, cada 1 000 millones de años reales corresponden a 24 días.

Si el 1 de enero a las cero horas hubiera ocurrido la gran explosión y el 31 de diciembre a las 24 horas fuera el día de hoy, tendríamos la siguiente sucesión de eventos:

1 de enero	La gran explosión
1 de mayo	Origen de la Vía Láctea
9 de septiembre	Origen del Sistema Solar
14 de septiembre	Formación de la Tierra
25 de septiembre	Origen de la vida
2 de octubre	Formación de las rocas más antiguas conocidas en la Tierra
9 de octubre	Fecha de los fósiles más antiguos encontrados
12 de noviembre	Plantas fotosintéticas que producen O ₂
1 de diciembre	La Tierra desarrolla una atmósfera con oxígeno
31 de diciembre	Surgimiento del <i>homo sapiens</i> , cuyos primeros registros históricos
	ocurrieron hace 10 segundos
(24 horas)	Hoy



Figura I.21. La estructura helicoidal del ADN.

BIBLIOGRAFÍA

Allen, C., J. de la Herrán y A. Poveda, "Nacimiento, vida y muerte de las estrellas", primera parte, *Ciencia y Desarrollo* **31**, 124 (marzo-abril de 1980); segunda parte, *Ciencia y Desarrollo* **32**, 152 (mayo-junio de 1980); tercera parte, *Ciencia y Desarrollo* **33**, 218 (julio-agosto de 1980).

----, "Origen y evolución de los elementos químicos en el Universo", *Ciencia y Desarrollo* **34**, 212 (septiembre-octubre de 1980).

Attenborough, D., *La vida en la Tierra. Una historia natural*, Fondo Educativo Interamericano, México, 1981.

Canuto, V. M., "La estructura y evolución del Universo", *Ciencia y Desarrollo* **62**, 33 (mayo-junio de 1985).

Espíndola, J. M., *El tercer planeta. Edad, estructura y composición de la Tierra*, colección "La ciencia desde México", 74, FCE, México, 1989.

Hacyan, S., *El descubrimiento del Universo*, colección "La ciencia desde México", 6, FCE, México, 1986.

Hawking, S., *Historia del tiempo. Del big bang a los agujeros negros*, Grijalbo, México, 1988.

Miller, S. L., "Primera síntesis de compuestos orgánicos obtenida en el laboratorio en las condiciones de la Tierra primitiva",

Ciencia y Desarrollo **40**, 158 (septiembre-octubre de 1981).

Müller, R. A., "La radiación cósmica de fondo y el nuevo movimiento del éter", *Investigación y Ciencia* **22**, 28 (julio de 1980).

Oparin, A., *El origen de la vida*, Editores Mexicanos Unidos, 1978.

Ponnamperuma, C., "El origen de la vida y la cosmoquímica", *Revista de la Sociedad Química de México* **26**, 6 (1982).

Ponnamperuina, C., y P. Malton, "El origen de la vida", *Investigación Científica y Tecnológica* **50**, 7 (1 de agosto de 1981).

Rodríguez, L. F., *Un universo en expansión*, colección "La ciencia desde México", 1, FCE, México, 1986.

Sagan, C., "El calendario cósmico", *Revista Comunidad CONACYT*, septiembre de 1980, pp. 50-58.

Thuan, T. X., "La formación del Universo", *Mundo Científico* **57**, 387, 1986.

Zeilik, M., "El nacimiento de estrellas de gran masa", *Investigación y Ciencia* **21**, 42 (junio de 1978).

El redescubrimiento de la Tierra, CONACYT, México, 1982.

El lector seguramente ha oído hablar de los hoyos negros. Si desea saber más acerca de ellos, consulte:

Asimov, K., *Las amenazas de nuestro mundo*, Plaza y Janes, Barcelona, 1980, pp. 57-65.

Firmani, C., "Los hoyos negros", *Ciencia y Desarrollo* **31**, 167 (marzo-abril de 1980).

Brown, H. A., "Agujeros negros. Vórtices donde el tiempo no transcurre", *Revista de Geografía Universal* (abril de 1980), p. 363.

Hacyan, S., *Los hoyos negros y la curvatura del espacio-tiempo*, colección "La ciencia desde México", 50, FCE, México, 1988.



[Nota 2] 

Antes de eso se supone que pululaban los cuarks y los leptones. Se remite al lector al libro de Jorge Flores (Núm. 22 de esta colección), o a *Los primeros tres minutos del universo* de Steven Weinberg.

Inicio |

En la bibliografía final se recomiendan algunas lecturas complementarias

Inicio |

Tomado de A.G.W. Cameron, *El redescubrimiento de la Tierra*, CONCYT, México, 1982.

Inicio |

II. CAMBIOS NUCLEARES Y SUS APLICACIONES

INTRODUCCIÓN

MUCHOS de los hechos y teorías expresados en el capítulo anterior se desarrollaron científicamente por el interés de comprender más sobre el núcleo atómico. Tenemos aún más dudas que respuestas.

Este capítulo se centra en la exposición de los avances más importantes en este terreno, y en la descripción del estado que guarda su desarrollo en México. Adicionalmente, intenta proporcionar ciertos elementos de juicio acerca de la utilización del conocimiento nuclear que, como muchas otras, tiene sus pros y sus contras. De esta manera, el lector podrá hacer su propia evaluación de la peligrosidad y potencialidades que tiene la energía nuclear, así como del problema ético que llega a suscitar este tema tan actual.

DESCUBRIMIENTO DE LA RADIATIVIDAD

Los elementos que se ven en una tabla periódica pueden considerarse como "ladrillos", a partir de los cuales se conforman todas las sustancias presentes en nuestro planeta y el Universo. Sin embargo, no todos estos elementos son estables; únicamente lo son 82 de ellos. Esto se debe a que, de forma natural, se producen cambios en los núcleos de los átomos, algunos de los cuales se desintegran con enorme velocidad mientras otros lo hacen con pasmosa lentitud.

La naturaleza entera puede construirse con los elementos naturales; del hidrógeno al uranio

La primera evidencia de estos cambios en los núcleos fue encontrada en 1896 por el francés Henry Becquerel, como una consecuencia directa del descubrimiento, unos meses antes, de los rayos X. Becquerel encontró que una sal de uranio que guardaba en un cajón emitía ciertas radiaciones que velaban las placas fotográficas vírgenes. Parecía que el uranio despedía extrañas radiaciones. El término actual, "radiactividad", no apareció sino años después, en un trabajo de Pierre y Marie Curie, conocidos investigadores en este campo.



Figura II.1. Marie Curie.

En 1919, en el laboratorio de Ernest Rutherford se provocó por primera vez un cambio nuclear artificial. Desde entonces, y sobre todo a partir del descubrimiento del neutrón (Chadwick, 1932), los científicos nucleares encontraron un sinnúmero de nuevos núcleos atómicos y multitud de aplicaciones energéticas y no energéticas de los mismos. Algunas de ellas nos han sido de enorme utilidad, pero otras han puesto a la humanidad al borde de un cataclismo planetario.

DISCIPLINAS CIENTÍFICAS RELACIONADAS CON LOS

CAMBIOS NUCLEARES

De la obra de Navarrete y Cabrera transcribimos las disciplinas en las que se acostumbra subdividir la ciencia nuclear. Esta información será útil al lector para que comience a identificar las áreas de aplicación de los fenómenos nucleares.

- a) La *radioquímica* estudia las propiedades de los radioisótopos, los métodos para su obtención y purificación, su uso en la investigación química y los efectos químicos de las transformaciones nucleares.
- b) La *química de radiaciones* estudia los efectos químicos producidos por las radiaciones.

<p style="text-align: center;">Los radioisótopos son núclidos naturales o artificiales que emiten radiactividad, es decir, que son inestables</p>
--

- c) La *química nuclear* estudia la síntesis de nuevos núclidos y elementos artificiales.
- d) La *física nuclear* estudia las partículas que forman el núcleo atómico, la configuración del mismo y los cambios de energía que tienen lugar en él.
- e) La *ingeniería nuclear* estudia el diseño y funcionamiento de los reactores nucleares.
- f) La *física de neutrones* estudia la producción, detección y comportamiento de esta partícula subnuclear.
- g) La *medicina nuclear* estudia el comportamiento de compuestos radiactivos en el organismo humano, usados como trazadores con propósitos de diagnóstico o con fines terapéuticos en el tratamiento de padecimientos.
- h) La *radiobiología* estudia el efecto de las radiaciones nucleares en las estructuras celulares de los seres vivos en general.
- i) La *seguridad radiológica* estudia los métodos para el manejo de materiales radiactivos, de manera que pueda realizarse sin riesgos para la salud o el medio ecológico.

Como es frecuente en la ciencia, cada una de estas disciplinas no es independiente de las demás, sino que se complementan unas con otras.

EMISIONES RADIATIVAS

La radiactividad natural es producida por los núcleos inestables de algunos elementos pesados.

En la naturaleza existen 274 núclidos estables. Sus valores de Z y N pueden graficarse (Figura II.2), lo que permite observar que:

- a) Para los elementos ligeros, la estabilidad se presenta en los núcleos con una relación cercana a un protón por

cada neutrón.

b) Según va aumentando el número de protones, para que los núcleos sean estables se hace necesario un mayor número de neutrones. La razón es que con ello se reduce la repulsión entre los protones.

A los lados izquierdo y derecho de la zona de estabilidad de la figura II.2 se encuentran los núclidos inestables. Unos lo son —lado izquierdo— porque tienen un exagerado número de neutrones. Lo que les sobra a los otros —lado derecho— son protones.

Estos núclidos inestables se transforman en estables a través de diversos cambios nucleares, que constituyen la esencia de la radiactividad.

a) *Emisión de partículas alfa*. Estas partículas son núcleos de helio, los cuales constan de dos protones y dos neutrones. Por lo tanto, cuando un núcleo inestable emite una partícula *alfa*, pierde cuatro unidades en su número de masa y su número atómico se reduce en dos unidades.

Así, si *X* y *Y* representan los símbolos de los elementos con *Z* y *Z - 2* protones, el llamado "decaimiento *alfa*" es una reacción con el siguiente patrón:

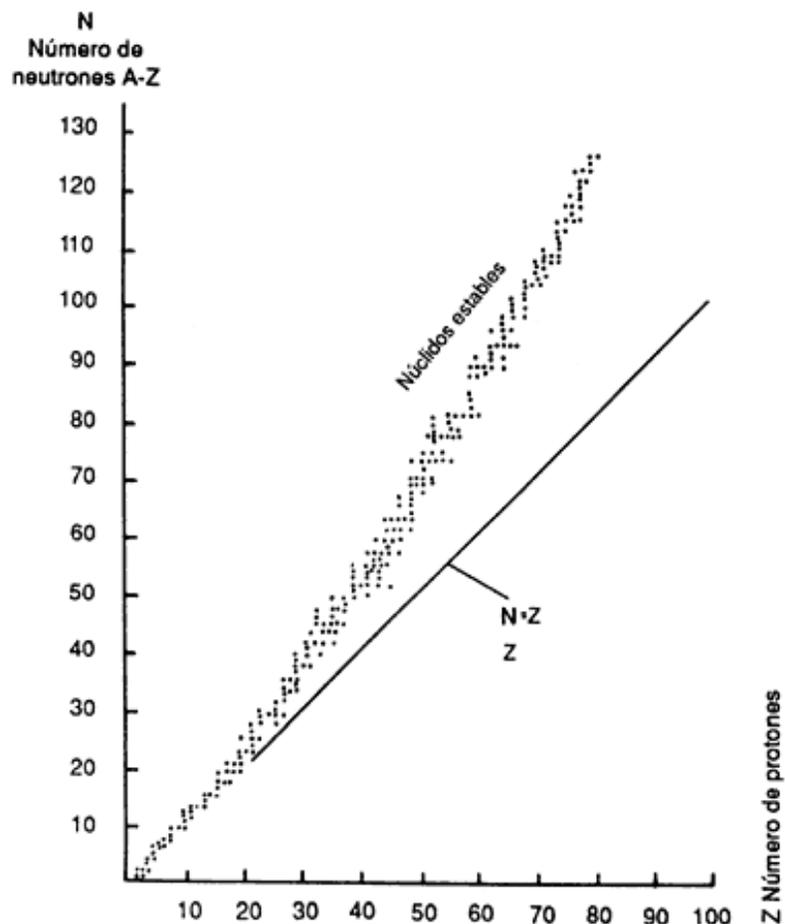
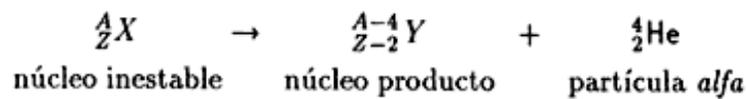


Figura II.2. Número atómico y de neutrones para los núclidos estables.

Nótese que una reacción nuclear se conserva la carga y el número de masa

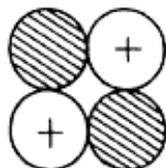
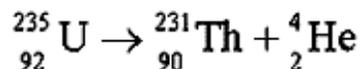


Figura II.3. Representación de una partícula *alfa*

Un ejemplo peculiar es el decaimiento del uranio-235, que se convierte en torio-231:



b) *Emisión de partículas beta*. Los núclidos que se encuentran a la izquierda de la curva de estabilidad, con un exceso de neutrones, se estabilizan mediante la emisión de negatrones, o partículas *beta*, convirtiendo un neutrón en un protón. Los negatrones no son sino electrones, despedidos a enormes velocidades fuera de la atracción del núcleo. De esta forma, uno de los neutrones del radionúclido experimenta la siguiente reacción:

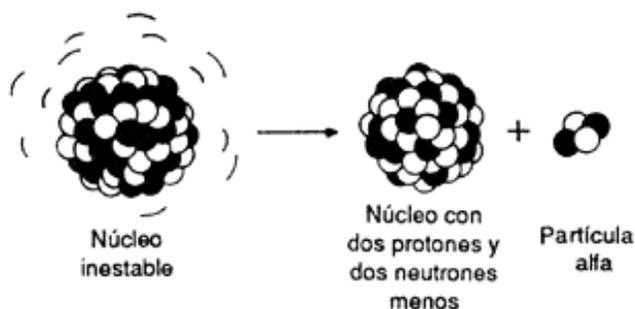
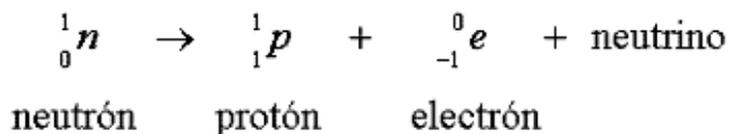
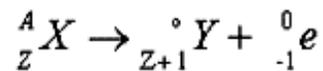
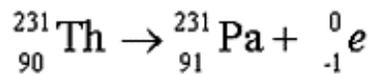


Figura II.4. Decaimiento *alfa*.

Durante este proceso, el radionúclido eleva en una unidad su número atómico (pues cuenta con un protón adicional), y mantiene constante su número de masa. La reacción general puede describirse así:



Un ejemplo particular es el torio-231, que se convierte en protactinio-231 por emisión *beta*:



c) *Emisión de radiación gamma*. Al igual que los electrones excitados de los átomos, que al volver a estados más estables emiten radiación electromagnética, los núcleos inestables también pueden hacerlo, salvo que en este caso la radiación es mucho más energética y se denomina gamma. El núclido no cambia su número atómico ni el de neutrones; simplemente reduce su energía.

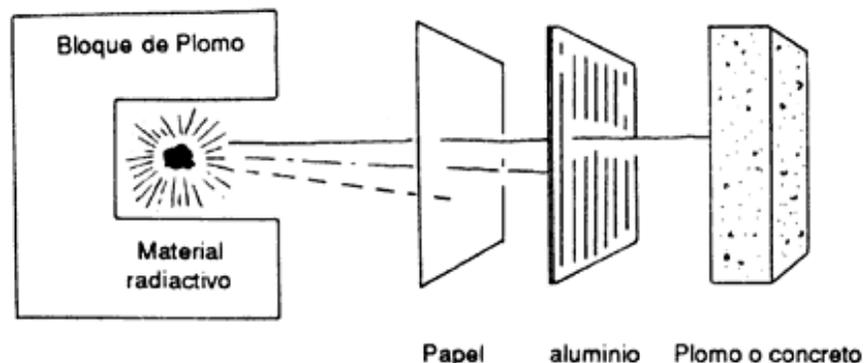
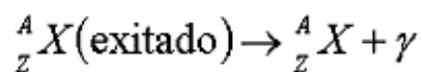


Figura II.5. Penetración a, b, y γ .

SERIES RADIATIVAS

En muchas ocasiones, el producto de una desintegración radiactiva *alfa* o *beta* es todavía un núcleo inestable, que tarde o temprano vuelve a decaer. El proceso se repite varias veces, hasta que se forma un núcleo estable con una proporción conveniente de neutrones y protones.

A este conjunto de decaimientos nucleares se le conoce como serie radiactiva. En la figura II.6 se presenta la serie radiactiva del uranio-238, en la que, después de varias emisiones *alfa* y *beta* se obtiene un núcleo estable de plomo-206.

Ésta es la razón de que en los yacimientos de uranio siempre existe plomo.

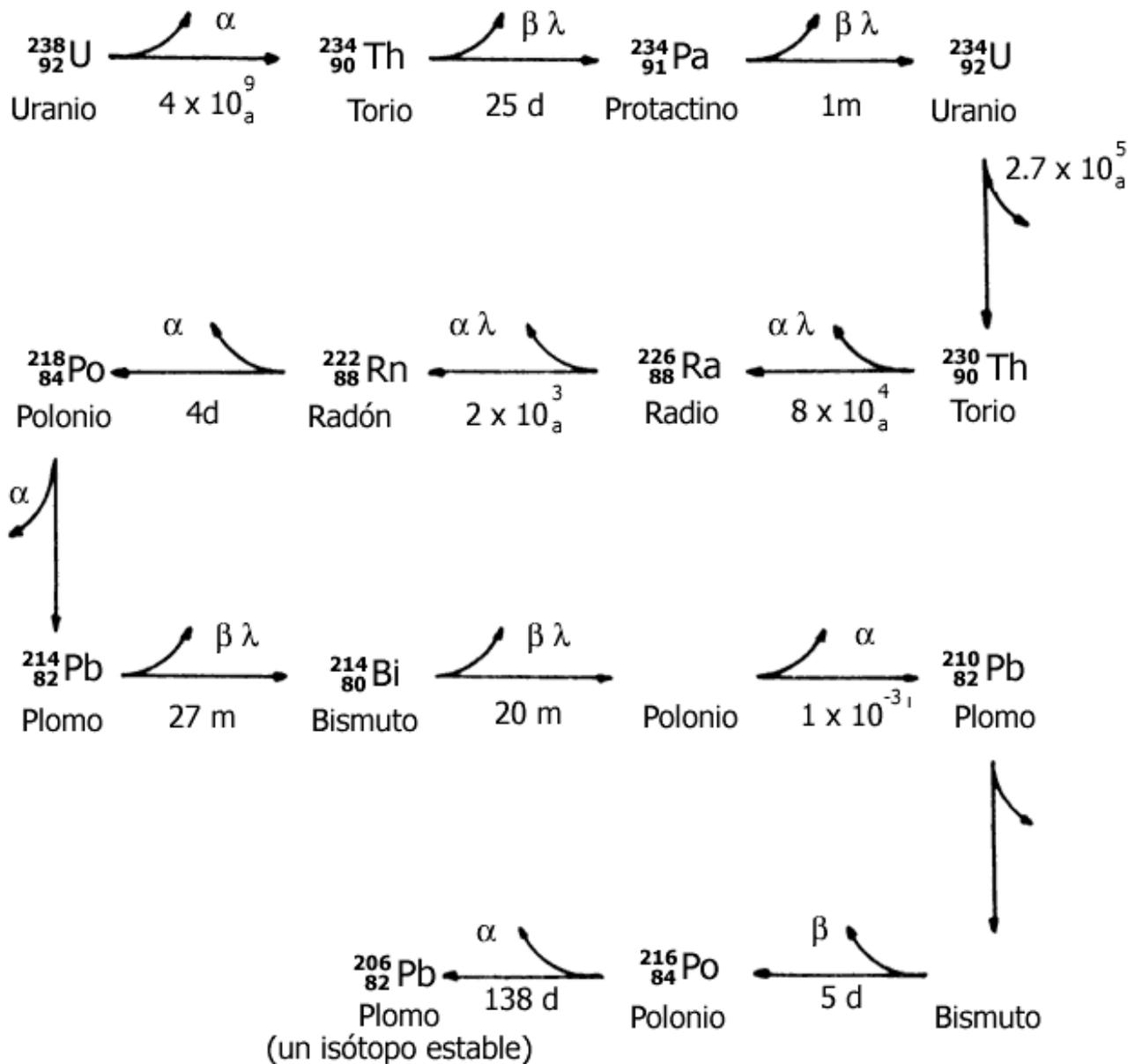


Figura II.6. Serie de desintegración radiactiva del uranio-238.

TIEMPO DE VIDA MEDIA

Una muestra de un material radiactivo, no importa de qué tamaño, siempre presenta una velocidad constante de decaimiento (la proporción de átomos que decaen en un cierto tiempo es siempre la misma). Al tiempo en el cual la mitad de los átomos radiactivos iniciales se han transformado, se le conoce como "tiempo de vida media", que es una característica de cada núclido.

En la figura II.6, los tiempos que aparecen debajo de cada una de las flechas son, precisamente, tiempos de vida media. Por ejemplo, para el uranio-238, el dato es de cuatro mil millones de años. Aproximadamente, este tiempo es igual a la antigüedad de nuestro planeta. Así, si una muestra de uranio-238 se hubiera formado en la nube que dio lugar al Sistema Solar, aún hoy existiría la mitad de ese uranio presente; la otra mitad se habría transformado en otros núcleos, según se indica en la figura II.6. Además, en ella podemos comprobar que los tiempos de vida media varían para cada núclido, siendo el polonio-214 el que menos tiempo toma en su decaimiento, apenas una milésima de segundo.

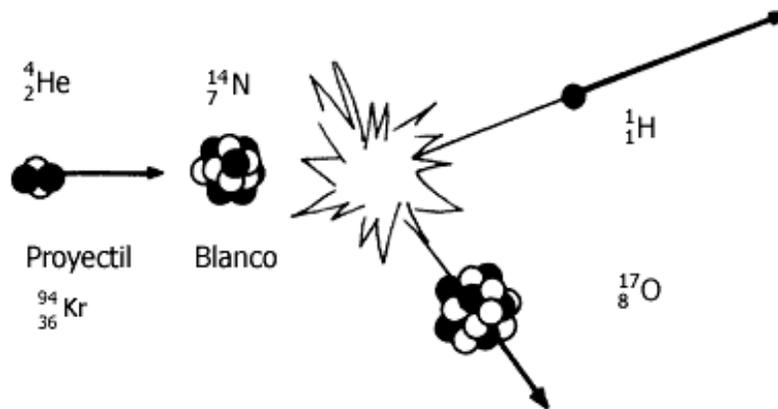
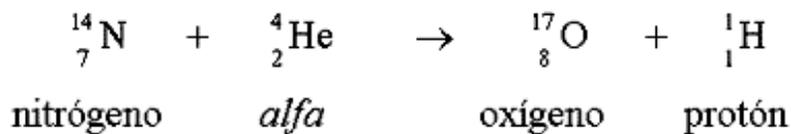


Figura II.7. Diagrama esquemático de la primera reacción nuclear inducida

En 1919, Rutherford detectó y realizó con éxito la primera reacción nuclear artificial (producida por la intervención del hombre). Al bombardear con partículas *alfa* una muestra de nitrógeno, encontró una partícula con las características del protón.

La reacción nuclear de Rutherford es la siguiente:



Se insiste que, en una reacción nuclear, la carga y el número de masa no se alteran:

$$14 + 4 = 17 + 1$$

$$7 + 2 = 8 + 1$$

Debido a la alta velocidad de la partícula *alfa*, su colisión con el nitrógeno provoca que ambos núcleos se fundan (fusión de núcleos), pero el núcleo formado es inestable y elimina un protón.

A partir de este descubrimiento, se ha sometido a multitud de núcleos a "bombardeos" con diferentes partículas. Los resultados de esos experimentos siguen siendo de gran interés. Gracias a ellos han podido conseguirse asombrosos resultados, como:

El aprovechamiento de la energía nuclear y su utilización para nobles fines o para la fabricación de misiles militares,

la obtención de nuevos elementos químicos, más pesados que el uranio,

el hallazgo de nuevas partículas nucleares, que ha desembocado en el planteamiento de novedosas teorías acerca

de la constitución de la materia, y

la utilización de los cambios nucleares en aplicaciones no energéticas, que han venido a apoyar el estudio del metabolismo humano y la eliminación de padecimientos, la comprensión de la forma en que suceden las reacciones químicas y nuevos métodos para analizar químicamente muestras con pequeñísimos contenidos de ciertos elementos.

En lo que resta de este capítulo hacemos algunas consideraciones en torno de esas aplicaciones.

DESCUBRIMIENTO

DEL NEUTRÓN



Figura II.8. En 1935, Chadwick recibió el premio Nobel de física por su descubrimiento del neutrón.

Si en la reacción de Rutherford se sustituye el átomo de nitrógeno por uno de berilio, como resultado no se detecta un protón, sino una partícula sin carga eléctrica: el neutrón.

El descubrimiento del neutrón vino a aclarar la constitución del núcleo atómico, compuesto esencialmente por protones y neutrones, como hemos visto.

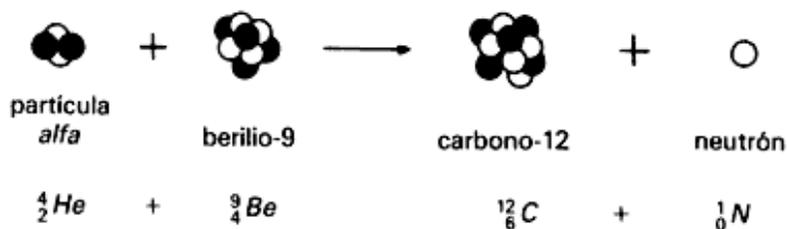
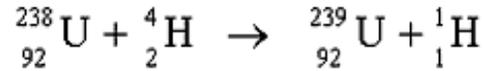


Figura II.9. Generación del neutrón

ELEMENTOS TRANSURÁNICOS

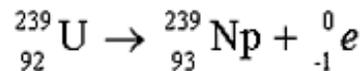
Otro ejemplo importante de reacciones nucleares inducidas lo constituye el descubrimiento de elementos químicos más pesados que el uranio: los llamados *elementos artificiales*.

Hacia 1940 ya se habían desarrollado diversas técnicas para acelerar partículas, llevándolas a velocidades de millones de metros por segundo. Estas partículas se hicieron chocar con núcleos pesados. Como resultado se obtuvieron nuevos núcleos, debido a la fusión de la partícula con el núcleo bombardeado. Por ejemplo, al acelerar núcleos de deuterio (hidrógeno con número de masa de dos unidades) y proyectarlos sobre uranio-238 se obtiene uranio-239, de acuerdo con la reacción:



Como vemos, el deuterio se convierte en hidrógeno-1, transfiriéndose un neutrón al núcleo del uranio.

El uranio-239 es inestable. Después de media hora emite una partícula *beta*, con lo que su número atómico aumenta en una unidad. Así, se convierte en un núcleo con 93 protones, que fue "bautizado" como neptunio, **Np**:



Ésta es la forma en que el hombre ha podido obtener elementos como el neptunio, no presentes en la Tierra. Así, el conocimiento de la naturaleza le ha permitido a la humanidad obtener elementos no existentes en este mundo. ¡Asombroso! Hasta hoy se han encontrado 17 elementos más pesados que el uranio. El más reciente de ellos, en septiembre de 1987, vino a llamarse *unniloctio* (Cuadro II.2); tiene 108 protones en su núcleo y su tiempo de vida media es de dos milisegundos.

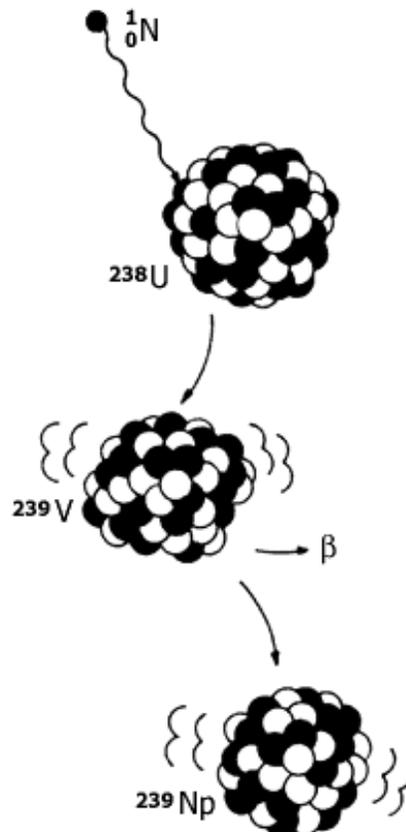


Figura II.10. El bombardeo de neutrones sobre uranio-238 también produce neptunio

FISIÓN NUCLEAR

CUADRO II.1. Síntesis de algunos transuránidos. Algunos ejemplos de reacciones empleadas para obtener otros elementos transuránidos

<i>Elemento</i>	<i>Reacción</i>
Plutonio	${}_{93}^{239}\text{Np} \rightarrow {}_{94}^{239}\text{Pu} + {}_{-1}^0e$ decaimiento <i>beta</i>
Curio	${}_{94}^{239}\text{Pu} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{96}^{242}\text{Cm} + {}_0^1n$ bombardeo con partículas <i>alfa</i>
Novelio	${}_{96}^{246}\text{Cm} + {}_6^{12}\text{C} \rightarrow {}_{102}^{254}\text{No} + 4{}_0^1n$ Bombardeo con núcleos de carbono-12

El descubrimiento del neutrón proporcionó a los científicos nucleares una valiosísima partícula de bombardeo. Al no tener carga eléctrica, un neutrón puede chocar contra un núcleo sin sentir ninguna repulsión durante el proceso. De esta forma, hasta los neutrones lentos pueden producir reacciones nucleares. El grupo de Enrico Fermi, en Roma, se dedicó a bombardear con neutrones diversos elementos, con lo que produjo multitud de nuevos núcleos, la mayoría de ellos inestables.

En 1938, una de estas pruebas de bombardeo con neutrones llevó a Hahn y Strassman a encontrar un nuevo tipo de reacción nuclear, en la que el núcleo atómico se parte en grandes pedazos, dando lugar a dos o más núcleos ligeros.

Esta reacción es la inversa de la fusión y se denomina fisión.

• **Fusión: dos núcleos ligeros se funden en uno solo**

• **Fisión: un núcleo pesado se parte en dos ligeros**

¡no confundir!

Una reacción de fisión del uranio-235 se presenta en la figura II.11.

La fisión libera enormes cantidades de energía. Un gramo de uranio-235 puede originar tanta como la que se obtendría al quemar ¡2 600 toneladas de carbón! El origen de esta energía será aclarado posteriormente.

Cuadro II.2 Nomenclatura de transuránidos con Z mayor que 100

Actualmente existen tres grupos de investigadores en el mundo que se dedican a la síntesis de nuevos elementos:

El de Berkeley, en Estados Unidos, dirigido por Seaborg y Ghiorso.

El de Dubna, en la Unión Soviética, encabezado por G. N. Flerov.

El de Darmstadt, en Alemania Occidental, dirigido por G. Munzenberg y P. Armbruster.

Los tres se disputan los descubrimientos de los elementos postlaurencio. Cada uno ha dado diversos nombres a los elementos 104, 105 y 106: joliotio, rutherfordio, kurchatovio, hannio y nielsbohrio.

Para evitar disputas la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada emitió en 1979 una serie de propuestas para nombrar a los elementos con Z mayor que 100:

1. Los nombres de los elementos deben relacionarse con su número atómico.
2. Los símbolos consistirán en tres letras (para evitar duplicidad con aquéllos de número atómico menor que 100).
3. Todos los nombres terminarán con la letra "o", y se usarán las raíces numéricas siguientes:

0 = <i>nil</i>	3 = <i>tri</i>	6 = <i>hex</i>	
1 = <i>un</i>	4 = <i>quad</i>	7 = <i>sept</i>	9 = <i>enn</i>
2 = <i>bi</i>	5 = <i>pent</i>	8 = <i>oct</i>	

debiendo colocarse juntas las raíces en el orden de los dígitos que forman el número atómico.

Como un ejemplo tenemos:

<i>Número atómico</i>	<i>Nombre</i>	<i>Símbolo</i>
104	unnilquadio	Unq
105	unnilpento	Unp
106	unnilhexo	Unh
107	unnilseptio	Uns
108	unniloctio	Uno
109	unnilenno	Une

La idea de que la reacción de fisión puede llevarse a cabo "en cadena" se reconoció desde 1938. En el proceso de fisión, además de obtenerse núcleos más ligeros, se generan como subproductos dos o tres neutrones. Estos pueden volverse a hacer colidir con núcleos de uranio-235, como se ejemplifica en la figura 11.12, para obtener una reacción sin fin (mientras haya uranio con el cual los neutrones puedan chocar).

La reacción en cadena de la fisión es la base de las aplicaciones energéticas del núcleo atómico y, también, desgraciadamente, de las bombas atómicas lanzadas sobre Hiroshima y Nagasaki en 1945.

Otro núclido fusionable es el de plutonio, elemento con 94 protones que se obtiene a partir del uranio-238 presente en un reactor nuclear.

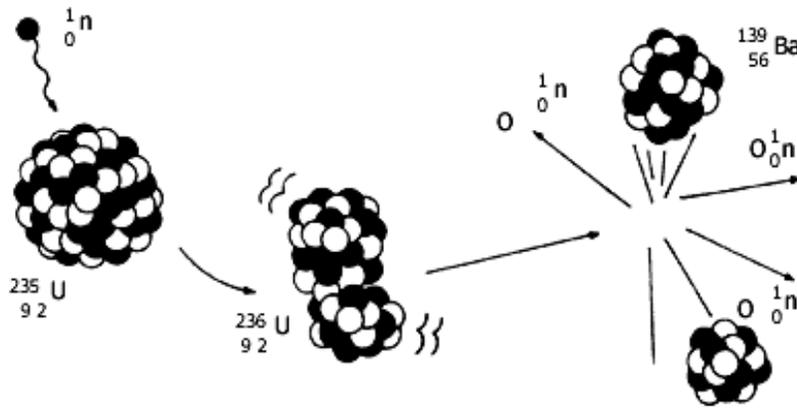


Figura II.11. Fisión. Cuando un neutrón es absorbido por el uranio -235, éste se parte en dos fragmentos y se eliminan dos o tres neutrones. Los núcleos ligeros se logran estabilizar mediante la emisión de radiación *gamma*. Un tiempo después (de segundos a años), los núcleos ligeros se estabilizan mediante la emisión de partículas *beta* y más radiación *gamma*.

EL REACTOR NUCLEAR

La reacción en cadena puede controlarse y ser aprovechada. El dispositivo que permite mantener una reacción sostenida, no explosiva, se conoce como reactor nuclear. El combustible nuclear puede ser el uranio (una vez incrementada su proporción del isótopo 235, que es fisiónable, respecto a la del 238, que no lo es).

Para que la reacción de fisión no salga de control, en el reactor se utilizan unas varillas que absorben muchos de los neutrones producidos y mantienen libre el número suficiente para que prosiga la reacción de forma controlada. El calor producido se elimina por medio de un refrigerador, que puede ser agua o un metal fundido, que se usa para producir energía eléctrica. Tal es el caso de la planta nuclear de Laguna Verde, en el estado de Veracruz: una instalación nucleoelectrónica.

En la actualidad, 14% de la energía eléctrica del mundo proviene de reactores nucleares y se estimaba que este porcentaje aumentaría a 40% para el año 2020, con lo que se consumirían unas 260 000 toneladas de uranio anuales. Sin duda, los accidentes nucleares recientes reducirán estas expectativas.

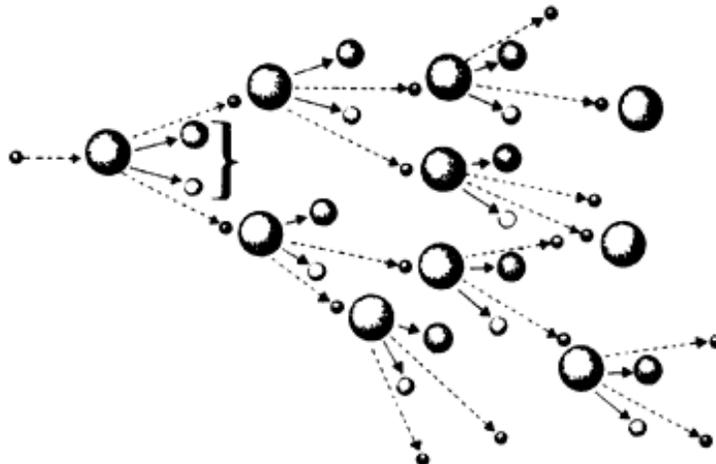


Figura II.12. Reacción nuclear en cadena. En breves segundos, un enorme número de átomos de uranio-

235 se fisiona, produciéndose formidables cantidades de energía.

FACTORES EN CONTRA DE LA ENERGÍA NUCLEAR

El tema del aprovechamiento de la energía nuclear es sumamente debatido. Por una parte, se sabe que la industria nuclear ha crecido y ha sido impulsada gracias a que uno de los subproductos que se obtiene en los reactores es el plutonio, material que resulta ser el más conveniente para construir bombas de fisión. Una central nuclear de 1 000 megavatios produce alrededor de media tonelada de plutonio al año, lo que es suficiente para fabricar 50 bombas mortíferas.



Figura II.13. Reacción nuclear en cadena. En cosa de segundos, una explosión atómica puede destruir una ciudad y contaminar con radiación nuestro planeta. Los artefactos bélicos existentes en la actualidad pueden destruir todo rastro de vida inteligente en le Tierra.

En cualquier país interesado en la fabricación de armas nucleares, la energía nuclear tiene una enorme ventaja política. La dificultad para construir una bomba reside en lo inaccesible de la materia prima y no en algún secreto de orden técnico. El uranio que puede encontrarse en la naturaleza no es un buen combustible nuclear; tiene demasiado poco uranio-235. Para que sirva es necesario aumentar la concentración de este isótopo en una planta de "enriquecimiento", que es costosísima. Estados Unidos tiene tres, la URSS dos, y Francia, Gran Bretaña y China poseen una.

Así, aunque México dispone de uranio natural, Laguna Verde no puede usarlo directamente. Será necesario llevarlo a Estados Unidos para enriquecerlo y volverlo a traer, lo que obviamente elevará su costo.

El problema militar de la fabricación de misiles se ha resuelto gracias al plutonio que se produce en las plantas nucleoelectricas. Se dice que el Pentágono lo compra a 10 mil dólares el kilogramo. De esta manera, las potencias militares se interesan en la proliferación de los reactores nucleares, para sus poco éticos objetivos bélicos.



Figura II.14. Linus Pauling obtuvo el premio Nobel de química en 1954 y después, en 1962, de la paz, como resultado de sus gestiones para impedir la explosión de bombas atómicas en la atmósfera.

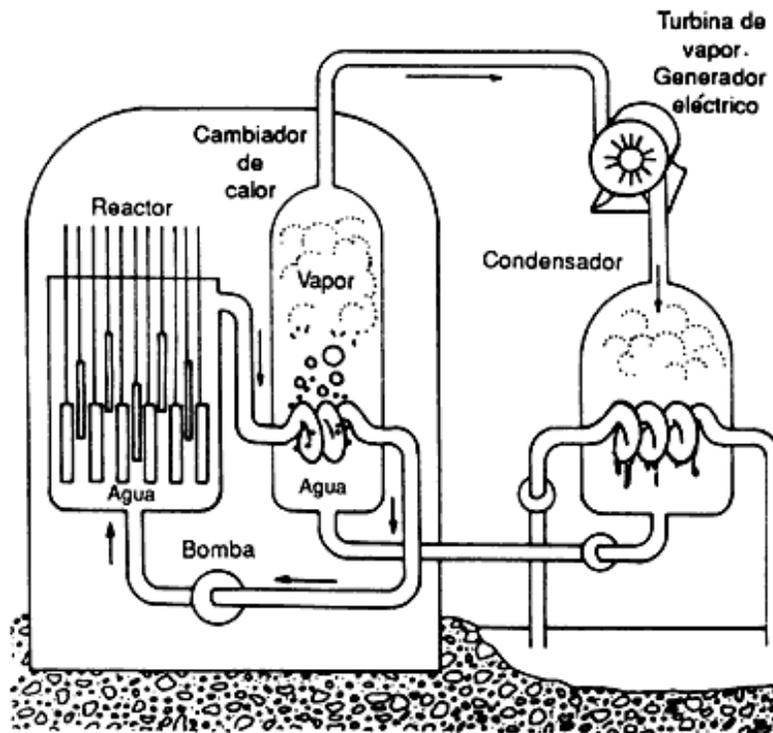


Figura II.15. Reactor nuclear de potencia. El combustible (material fisionable) se encuentra en el corazón del reactor, rodeado por un moderador (agua, en la figura). Las barras de control se colocan entre los elementos de combustible. En el intercambiador de calor el agua se convierte en vapor, que se emplea para mover una turbina generadora de electricidad. El vapor vuelve a condensarse posteriormente.

Desde el punto de vista de la contaminación, aunque durante la fisión no se emiten los gases tóxicos propios de la combustión, los elementos radiactivos que se producen son sumamente peligrosos. En especial, el kriptón-85 es un gas que puede desprenderse hacia la atmósfera. Otros residuos sólidos, si no se almacenan con cuidado durante miles de años pueden contaminar el suelo, penetrar en la cadena alimenticia y transmitirse hasta el hombre.

Un ejemplo reciente del mal uso de los desechos nucleares lo constituye la aparición de varilla para construcción altamente radiactiva en el norte de la República Mexicana.



Figura II. 16. Otto Hahn, descubridor de la fisión.

Un punto más que merece atención es el de la seguridad del reactor nuclear. Los dos incidentes recientes, en Three Miles Island (Estados Unidos) y Chernobyl (Unión Soviética), pero sobre todo este último, demuestran que el centro del reactor se puede salir de control y fallar los mecanismos de protección. En Suecia, a 1 000 kilómetros de distancia de Chernobyl, la radiación producto de la explosión dejó llegar viento radiactivo de alto peligro. Se estima que el radio de muerte alrededor de la explosión fue de 28 kilómetros. Aunque se dice que no llegó a la centena el número de muertos en este accidente, se sabe que miles morirán de cáncer en los próximos 50 años.

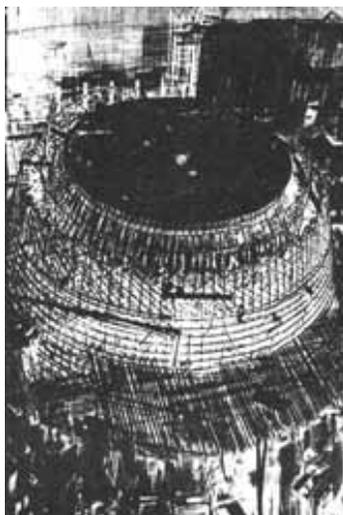


Figura II.17. Construcción principal del reactor en Laguna Verde.



Figura II.18. ¿Contaminación? Three Miles Island (foto aérea).

FUSIÓN NUCLEAR

A muy altas temperaturas, del orden de millones de grados, es factible provocar que los núcleos ligeros se unan para producir núcleos pesados. Como ya vimos en el capítulo previo, las reacciones de fusión son precisamente la fuente de energía de las estrellas.

El hombre puede provocar estas mismas reacciones si se alcanzan las temperaturas termonucleares. Una forma de hacerlo es por medio de una explosión nuclear de fisión. La llamada bomba-**H** es una bomba de fisión-fusión, que es mucho más destructiva. En primera instancia se produce una explosión por fisión, con la cual la temperatura se eleva lo bastante como para que empiece a ocurrir la fusión del hidrógeno, incluido también en la bomba. Su poder se mide en megatones, por su equivalente en millones de toneladas de **TNT**, un explosivo químico.

ENERGÍA DE AMARRE Y DEFECTO DE MASA

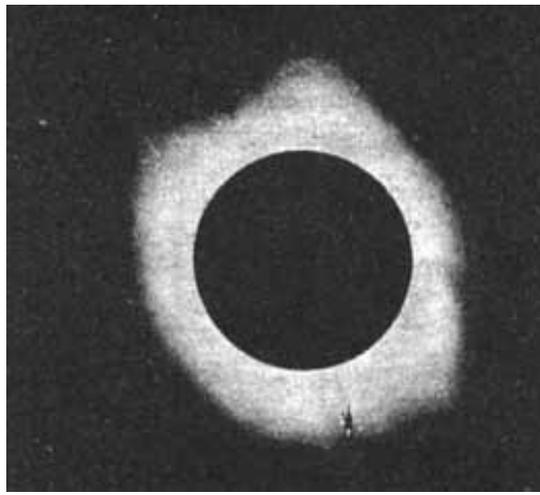


Figura II.19. Eclipse solar

¿Por qué tanta energía?

Ha llegado el momento de explicar el origen de la energía nuclear. ¿Cómo es posible que la fusión de dos núcleos ligeros genere tal cantidad de energía como la que emite el Sol? ¿Por qué se libera también tanta energía en un reactor de fisión o en una explosión atómica?

La respuesta a estas interrogantes fue dada por Einstein, muchos años antes de la explosión de Hiroshima. Se trata de un fenómeno de transformación de masa en energía: la teoría de la relatividad en acción.

Resulta ser que al unirse protones y neutrones para formar un núcleo ligero se pierde una pequeña cantidad de masa. Vale la pena ver un ejemplo.

Un núcleo de deuterio, con un protón y un neutrón, tiene una masa de 2.01345 (unidades de masa atómica, uma). Ello indica que una muestra de 2.01345 gramos de deuterio contiene 6.02×10^{23} núcleos.

Sin embargo, como la masa de un protón libre es de 1.00728 y la de un neutrón es de 1.00867, ambas partículas tendrán una masa total (cuando estén separadas) de 2.01595.

¿Por qué cuando se juntan en el deuterio pesan sólo 2.01345? La diferencia entre la masa de los nucleones separados y la masa de un núcleo se conoce como *defecto de masa*. En el caso del deuterio, este defecto de *masa* vale:

$$m = 2.01595 - 2.01345 = 0.0025 \text{ uma} = 4.25 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

Einstein demostró que estas "pérdidas" aparentes de masa no ocurren por desaparición inexplicable, sino que esa masa perdida se transforma en energía, de acuerdo con su fórmula:

$$E = mc^2$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s). De esta manera, la ínfima cantidad de masa que desaparece al formarse un deuterio se transforma en una energía de:

$$(4.25 \times 10^{-30} \text{ kg}) (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 3.7 \times 10^{-13} \text{ julios}$$

Esta cantidad de energía (menos de un billonésimo de julio) puede parecer ridícula, pero debe tenerse en cuenta que se refiere a la formación de un solo núcleo de deuterio. Así, cuando se formasen 2.01345 gramos de deuterio se liberaría una energía 6.02×10^{23} veces mayor: ¡224 mil millones de julios!, cantidad suficiente para calentar y hacer hervir una alberca con casi 100 toneladas de agua.

¡Y eso que el deuterio tiene la menor energía de amarre!

De igual manera que al formarse un núcleo por fusión de nucleones se libera una gran cantidad de energía, es necesario proporcionar esa misma energía para romper la unión entre las partículas de un núcleo.



Figura II.20. Albert Einstein en su escritorio en la Oficina de Patentes de Berna, 1905.

A la energía necesaria para romper un núcleo y convertirlo en sus nucleones aislados se le conoce como "energía de amarre". Mientras mayor es el número de nucleones, mayor es la energía de amarre nuclear. Cuando la energía de amarre se calcula para todos los núcleos, se obtiene la curva que se muestra en la figura II.21. En las ordenadas se presenta la energía de amarre dividida por el número de nucleones. La curva presenta un máximo para núcleos con 56 partículas, como el del hierro-56 y un pico para el helio-4. Estos son los núcleos más estables, pues cada uno de sus nucleones ha experimentado el mayor defecto de masa y, por lo tanto, están más fuertemente "amarrados" al núcleo.

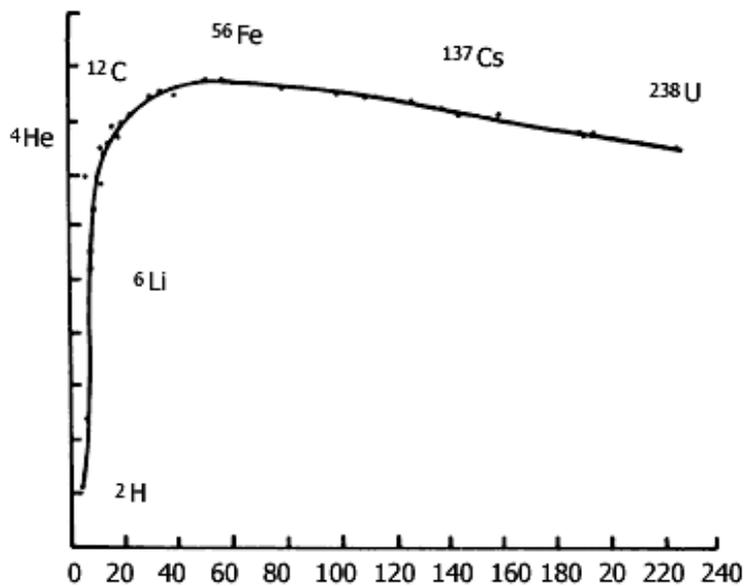


Figura II.21. Energía de amarre para cada nucleón, en función del número de nucleones.

Salvo el pico en el helio, la curva es creciente hasta el hierro y decreciente después. Ello explica por qué el Fe es el último elemento que se logra obtener por nucleosíntesis en las estrellas y, por lo tanto, por qué las estrellas son continuas fuentes de energía, pues van fabricando núcleos cada vez más estables. Por otra parte, el hecho de que los núcleos más allá del hierro sean menos estables que éste, explica la liberación de energía durante la fisión: el pesado y poco estable núcleo del uranio se va convirtiendo al fisionarse en núcleos más ligeros, con una mayor energía de amarre por nucleón. De esta manera, los protones y neutrones del uranio se convierten en nucleones de otros núcleos, perdiendo cada uno de ellos una cierta cantidad de masa, que se transforma en energía.

APLICACIONES NO ENERGÉTICAS DE LA ENERGÍA NUCLEAR

A continuación exploraremos otras aplicaciones del núcleo atómico.

La Tierra se formó... ¿hace cuánto tiempo?

Determinación de la antigüedad de los minerales y materiales arqueológicos. Uno de los cálculos más fascinantes que han podido hacerse es el de la edad de la Tierra. Conociendo la proporción actual de plomo y uranio en el planeta puede estimarse que la Tierra se formó hace aproximadamente 4.5 miles de millones de años.

De forma similar, el hombre puede datar cualquier registro arqueológico y así reconstruir su pasado y el de la vida en la Tierra. En particular, se usa el isótopo carbono-14 para determinar la antigüedad de residuos orgánicos. Aunque la vida media del carbono-14 es de sólo 5 730 años, se está produciendo constantemente en la alta atmósfera debido a la llegada de rayos cósmicos a la Tierra. De este modo, un hueso enterrado hace algunos miles de años contuvo inicialmente una proporción de este isótopo, la que ha venido disminuyendo. El cálculo de su contenido actual permite determinar su edad (Cuadro II.3).

CUADRO II.3 Algunos de los isótopos usados en datado

<i>Isótopo</i>	<i>Tiempo de vida media (años)</i>	<i>Intervalo útil (años)</i>	<i>Aplicaciones de datado</i>
Carbono-14	5 730	500 a 50 000	Carbón, materia orgánica
Hidrógeno-3 (o tritio)	12.3	1 a 100	Vinos añejados
Potasio-40	1.3 x 10 ⁹	10 000 a miles de millones de años	Rocas, corteza terrestre
Renio-187	4.3 10	40 millones a la edad del Universo	Meteoritos

Estudio de las reacciones químicas. La radiactividad puede medirse con diversos instrumentos. Así, si en una muestra de moléculas se sustituye un átomo estable por un isótopo radiactivo, puede "seguírsele la pista" mediante la detección de radiactividad. Por ejemplo, si dejamos que una planta reciba CO₂ con carbono radiactivo (carbono-14), se puede estudiar el curso de la reacción de fotosíntesis, investigando adónde fue este núclido, que se "delata" por su radiactividad.

Ésta ha sido una herramienta invaluable para estudiar el curso de las reacciones químicas. Ha permitido al hombre diseñar sus propias rutas de síntesis para fabricar los productos artificiales que hoy usamos. También en biología permitió conocer la función de un cierto elemento, material, fluido u órgano.

Trazadores. El adicionar pequeñísimas cantidades de un elemento radiactivo a una muestra permite que se lo rastree. Este método se emplea en la industria para medir velocidades de flujo, detectar fugas en tuberías y verificar procesos de mezclado.

Análisis por activación. Muchos de los elementos químicos son nocivos para el hombre. Su presencia, aun en cantidades ínfimas, puede ser letal cuando están disueltos en el agua, una vez que se acumulan en el organismo. La técnica de análisis por activación neutrónica permite medir partes por billón de estos peligrosos elementos en las aguas de los ríos, y así determinar la industria o proceso que desencadenó la contaminación.

Medidores de nivel, densidad, desgaste y espesores. En la industria moderna se han incorporado medidores automatizados —para medir el nivel dentro de los tanques cerrados, el espesor (por ejemplo, en la fabricación de papel) y el desgaste de los equipos— que emplean reacciones nucleares como principio de funcionamiento.

En la industria papelera, un dispositivo nuclear controla el grosor del papel

Aplicaciones terapéuticas de los radioisótopos. Cuando está presente en un tejido u órgano determinado en cierta cantidad, el material radiactivo es capaz de destruir las células existentes y de evitar la formación de tejido nuevo. Este recurso se emplea desde hace varios años para la destrucción de tumores cancerosos, con la llamada "bomba de cobalto-60", el uso de oro-198 (cáncer de próstata) y del fósforo-32 para la leucemia. En el cuadro 11.4 se enumeran otras aplicaciones médicas.

CUADRO II.4 Aplicaciones médicas de algunos radioisótopos

<i>Isótopo</i>	<i>Utilización en medicina</i>
Arsénico-74	Localización de tumores cerebrales
Cromo-51	Determinación del volúmen total de la sangre
Cobalto-58	Determinación de vitamina B ₁₂
Radio-226	Terapia y tratamiento del cáncer
Fósforo-32	Detección del cáncer en la piel
Hierro-59	Velocidad de formación de glóbulos rojos
Iodo-131	Diagnóstico de mal funcionamiento tiroideo
Sodio-24	Detección de obstrucciones circulatorias

DESARROLLO Y PERSPECTIVAS DE LA ENERGÍA NUCLEAR

EN MÉXICO. ¿ALGUIEN LAS SABE?

Este tema reclama una profunda reflexión, no sólo en lo que concierne a ventajas e inconvenientes, sino a posibilidades y proyecciones del futuro nuclear de México. Así las cosas, vale la pena iniciarlo con un poco de historia.

Las ciencias de la radiactividad se inician en México hace casi 30 años, cuando un grupo de científicos hizo patente la urgencia de iniciar actividades relacionadas con los radioisótopos.

Con el propósito de desarrollar las ciencias nucleares y de reunir a los científicos mexicanos en esa área, en 1964 se construye el Centro Nuclear, en las cercanías del pueblo de Salazar, en el Estado de México, donde se encuentra la sede del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). En éste se preparan isótopos radiactivos artificiales de ciertos elementos y se les envía a diferentes instituciones (hospitales, universidades, industrias), según el uso que se les dé y bajo el control de la Comisión Nacional de Salvaguardias.

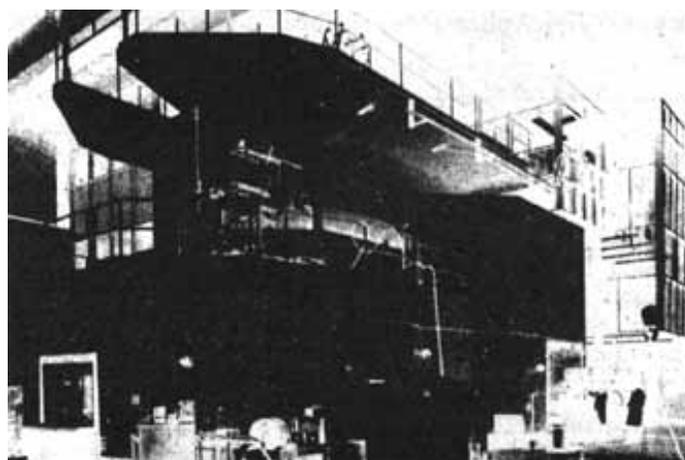


Figura II.23. Reactor nuclear del ININ.

Tres años más tarde, en 1967, se crea en la UNAM el Centro de Estudios Nucleares y se aprueba el primer plan de

estudios relacionado con este campo: la maestría en ciencias nucleares, con sede en la Facultad de Química. Muy poco tiempo después, el IPN inicia también una maestría en ingeniería nuclear.

Hasta 1989, en México se habían graduado 29 maestros en ciencias nucleares

No obstante, el desarrollo real de esta área en el país ha sido escaso. Tal vez los motivos hayan tenido diversos orígenes (políticos —el sindicato de este sector se enfrentó en diversas ocasiones al Estado y éste no impulsó decididamente esta área—, económicos —las reservas de petróleo garantizaban energía más barata— y sociales —recientemente acrecentados y encabezados por grupos ecologistas).



Figura II.24. Maqueta de un reactor nuclear.

En la década de los setenta se decide la construcción de un reactor de potencia en la localidad de Laguna Verde, estado de Veracruz. La culminación de la obra ha ocurrido ya y el costo inicial previsto se ha encarecido notablemente. Resulta así casi imposible cumplir la meta fijada para el año 2000, en el que se preveía contar con 20 000 megavatios electronucleares instalados.

Los riesgos que depara el manejo de los reactores nucleares y sus desechos, la reducción notable de su fabricación en el mundo occidental y la conexión que su operación tiene con la carrera armamentista, indican que las aplicaciones energéticas del núcleo atómico tienen un futuro incierto. Esto es válido en México y en el mundo, a pesar de que existen países, como Francia, que no han detenido el paso en este renglón. Por lo pronto, se ha dado en el país un amplio debate acerca del arranque de la planta de Laguna Verde.

Pero desde luego, de alguna parte habremos de obtener la energía que hoy nos surte el petróleo. Si no se considera conveniente la vía nuclear, habrá que iniciar muy pronto un programa muy dinámico que nos permita satisfacer la demanda energética para el siglo XXI, cuando ya no exista petróleo o su escasez haga que se eleve a precios prohibitivos.

EPÍLOGO

El hombre siempre ha vivido con radiaciones y seguirá viviendo con ellas. Los radioisótopos estaban presentes en la Tierra desde su formación. Todo lo que ha provenido de ella, incluyendo nuestros propios cuerpos, es naturalmente radiactivo. Cada segundo, más de 7 000 átomos en el cuerpo de un adulto promedio sufren decaimiento radiactivo. En el mismo tiempo, aproximadamente 300 rayos cósmicos han pasado a través de su cuerpo, produciendo alguna alteración en algún núcleo o en alguna célula.

En el agua que bebemos existe, de forma natural, radiación proveniente de uranio y radio. La leche contiene potasio, y es más radiactiva que el agua. Esto no significa que debamos evitar tomar leche, pues esta actividad radiactiva siempre será parte de la leche sana.

En todos nuestros hogares hay radiactividad, producida por el gas radón, que penetra del suelo o con el polvo.

El problema es que en años recientes se ha creado un número de fuentes artificiales de radiación, desde las bombas atómicas hasta ciertas carátulas de reloj que pueden verse en la oscuridad.

El hombre puede recibir cierta cantidad de radiación sin ser esencialmente afectado. Lo malo es que se rebase el límite permitido, a lo cual contribuye el mismo hombre al manejar indiscriminadamente peligrosos residuos nucleares, al hacer pruebas atómicas en la atmósfera y el subsuelo, y al cometer errores en el diseño y manejo de los reactores nucleares.

No cabe duda de que seguiremos necesitando energía. Ésta es una característica de la vida moderna. Muy pronto las reservas de petróleo se acabarán y habrá que estar preparados con otras fuentes energéticas. La energía nuclear es una opción, a pesar de que conlleva complejidad, peligro e implicaciones militares y ecológicas. Será preciso tener en cuenta que los recursos de uranio también se agotarán y podrían ser más limitados que los petroleros: la actual producción mundial de uranio es similar a la alcanzada en 1960.

Sin embargo, es cierto que otras posibilidades energéticas no nucleares también afectan la ecología (por ejemplo, la construcción de una planta hidroeléctrica implica la inundación de una enorme extensión de terreno), y las decisiones al respecto están asimismo influidas por parámetros económicos y políticos, más que por el interés social.

Tal vez la humanidad, en su proceso de evolución, aún no ha alcanzado la madurez racional suficiente como para aprovechar adecuadamente sus conocimientos acerca de la naturaleza. Quizá nunca la alcanzará si se obstina en dedicar enormes cantidades de recursos a las áreas bélicas nucleares, y tan exiguos a la batalla contra el hambre y las condiciones subhumanas de vida.

Nada habrá que hacer si algún día una superpotencia decide oprimir el botón. Este será un hecho irreversible, en el cual la ambición de poder triunfará sobre la moral y sobre la supervivencia del género humano.

El núcleo atómico ha sabido aprovecharse para erradicar males y enriquecer la calidad de la vida, pero también se le ha utilizado como amenaza y como arma para lograr la rendición. Decidir el uso que habrá de hacerse del conocimiento adquirido queda en manos de las nuevas generaciones. Esperamos que sea para bien de la humanidad.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, G., S. Cruz y J. Flores, *Una ojeada a la materia*, colección "La ciencia desde México", 3, FCE, México, 1986.

Brandan, M. E., *Armas y explosiones nucleares: la humanidad en peligro*, colección "La ciencia desde México", 61, FCE, México, 1988.

Bulbulian, S., *La radiactividad*, colección "La ciencia desde México", 42, FCE, México, 1987.

Bulbulian, S., y M. Navarrete, "La radiactividad en México", *Ciencia y Desarrollo* 8 (48), 6 (1983).

Choppin, G. R., "Fissao nuclear", *Rev. Iber. Ed. Quím.* 2 (4), 105 (1967).

Dickson, T. R., *Química ecológica*, Limusa, México, 1980.

García Fernández, H., *La bomba y sus hombres*, Editorial Alhambra Mexicana, México, 1987.

Lartigue, J., *et al.*, "Energía nuclear I. Aplicaciones no energéticas", *Cuadernos de Posgrado* **21**, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Química, UNAM, México, 1986.

Lezama, J., y B. Espejel, "Los radionúclidos: su producción y su uso", *Ciencia y Desarrollo* **47**, 122 (1982).

Martínez Gutiérrez, J. D., "Los domadores del átomo", *Ciencia y Desarrollo* **74**, 29 (1987).

Navarrete, M., y L. Cabrera, *Introducción al estudio de los radioisótopos*, Comisión Federal de Electricidad, México, 1979.

____, "Biografía de la radiactividad: un tema de nuestro siglo", *Ciencia y Desarrollo* **48**, 63 (1983).

Rabinowitz, J. L., y J.C. Díaz Zagoya, *Aplicaciones de los radioisótopos en química, biología y medicina*, Secretaría Ejecutiva del Consejo de Estudios de Posgrado, UNAM, México, 1984.

Solache, M. J., "La radiactividad natural", *Ciencia y Desarrollo* **8** (48)16 (1983).



SEGUNDA PARTE

- III. [LA LITOSFERA. METALES Y METALURGIA](#)
- IV. [LA HIDROSFERA. DESALINIZACIÓN DEL AGUA DEL MAR](#)
- V. [LA ATMÓSFERA. LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE](#)

Inicio



III. LA LITOSFERA. METALES Y METALURGIA

INTRODUCCIÓN

LA HISTORIA de los metales y su conocimiento por el hombre es la historia misma del desarrollo de la humanidad. En el primer capítulo hemos visto que el elemento más abundante en la Tierra es el hierro, un metal. Desgraciadamente, en la corteza terrestre la abundancia de hierro no es tan grande, aunque sí considerable: asciende a un 4.7%. Sin embargo, como la mayoría de los metales, el hierro no existe de forma nativa en la superficie de la Tierra (salvo como constituyente de meteoritos).

Para lograr obtenerlos en forma elemental, los compuestos que constituyen los metales requieren ser tratados químicamente. El procesamiento a gran escala de los minerales metálicos para obtener los metales libres recibe el nombre de *metalurgia*. Amable lector, mire a su alrededor y seguramente encontrará metales. Tal vez en su pluma o lápiz, en la mesa o silla en que trabaja, en las ventanas, en un automóvil, en un poste, en las varillas del edificio que habita, en su reloj, sus pantalones o sus bolsillos. Todos ellos han sido elaborados por el hombre gracias a la química metalúrgica.

LA LITOSFERA

La litosfera conforma la parte sólida de la corteza terrestre. Como hemos visto, los elementos que en ella predominan son oxígeno (**O**), azufre (**S**), aluminio (**Al**), hierro (**Fe**), calcio (**Ca**), sodio (**Na**), potasio (**K**) y magnesio (**Mg**), de ahí que los compuestos más comunes están formados en primer lugar por oxígeno, como los óxidos. Además de este elemento, otros contienen silicio, formando silicatos, y otros más incorporan también aluminio en los aluminos-silicatos.

Una de las clasificaciones más útiles de los elementos los agrupa en tres grandes sistemas.

1. Elementos siderófilos. Se encuentran en forma metálica como el oro (**Au**), el platino (**Pt**) y la plata (**Ag**).
2. Elementos calcófilos. Se encuentran en forma de sulfuros, como el hierro (**Fe**), el cobre (**Cu**), el plomo (**Pb**) y el mercurio (**Hg**).
3. Elementos litófilos. Se encuentran formando silicatos, como el aluminio (**Al**), el calcio (**Ca**) y el magnesio (**Mg**).

Esta clasificación indica la forma más común en la que se encuentran los elementos en la Tierra

El estudio de los compuestos químicos en la litosfera correspondería principalmente al área de los silicatos, ya que ellos representan 95% de todos los minerales en esta capa (rocas, arenas, arcillas, etc.). Sin embargo, preferimos abordar el estudio de los metales, porque han sido más importantes para el desarrollo de la humanidad.

UN POCO DE HISTORIA

Son pocos los metales que no forman parte de un compuesto y existen en forma de "pepitas", como el oro y la plata, metales nativos, siderófilos.

Aun así, estos metales libres son muy raros; baste decir que la propia palabra "metal" se deriva de un vocablo griego que significa "buscar, procurar".

Desde luego, los metales nativos fueron los primeros que el hombre encontró.

Se cree que el oro empezó a trabajarse hacia el año 4500 a. C. Fue y es altamente estimado a causa de su belleza y rareza. Constituye la recompensa universal en todos los países, las culturas y las épocas. Amarillo, brillante, maleable, inalterable, ha sido para muchos el símbolo de la perfección. Los egipcios decían que "el oro poseía los extremos poderes del Sol encerrados en su cuerpo".

Paradójicamente, si algún alquimista hubiera encontrado la "piedra filosofal",  que pudiera convertir otros metales en oro, éste hubiera perdido todo su valor, sería como chatarra.

Para que los metales se popularizaran fue necesario idear un método para obtenerlos a partir de los minerales que los contienen, y no depender del hallazgo de pepitas aquí y allá. Este paso en la metalurgia debió ocurrir alrededor del año 4000 a. C., en el Medio Oriente. Entonces pudo obtenerse el cobre a partir de su mena.

Mena= mineral metálico

Hacia 3000 a. C., se descubrieron algunos minerales con cobre y arsénico (**As**), que al transformarse en metales generaban una aleación más dura y resistente que el cobre solo. Este fue el primer metal que se utilizó para algo más que adorno, con él se fabricaron herramientas que suplieron a las de piedra.

Aleación= disolución de dos metales

El trabajo con arsénico es sumamente peligroso, de manera que resultó muy afortunado descubrir que mezclando minerales de cobre y estaño (**Sn**) podía obtenerse otra aleación (el bronce) tan eficaz como el **Cu-As**, pero más segura.

Bronce= Cu-Sn

Alrededor de 200 a. C., el bronce se empleó sobre todo para la fabricación de herramientas, armas y armaduras. Un ejército sin armas de este metal se encontraba indefenso ante sus posibles atacantes, de ahí que los forjadores de aquella época gozaran de un enorme prestigio.

Sin embargo, los minerales de estaño son menos abundantes que los de cobre, y las minas conocidas pronto quedaron exhaustas: la humanidad se enfrentó por primera vez al agotamiento de un recurso natural.

Mientras tanto, para 1300 a. C., en Asia Menor se había desarrollado un procedimiento para extraer hierro de sus minerales. Para llevarlo a cabo se requería una alta temperatura, así que no todas las culturas disfrutaron de este avance por carecer de la técnica necesaria. Sin embargo, el hierro que se obtenía era muy quebradizo y no fue sino hasta 900 a. C., cuando, al mezclar carbón de leña con el mineral, se obtuvo el hierro endurecido, o acero.

Durante el siglo pasado se descubrieron nuevos procedimientos para la fabricación de acero. Se emplearon algunos metales desconocidos para los antiguos, como cobalto (**Co**), níquel (**Ni**), vanadio (**V**), niobio (**Nb**), wolframio (**W**), los cuales proporcionan al acero más resistencia y otras propiedades sorprendentes. Asimismo, se desarrollaron procedimientos para obtener aluminio, magnesio, titanio (**Ti**) y muchos otros metales, como los de

las tierras raras. (véase el Cuadro III.3)

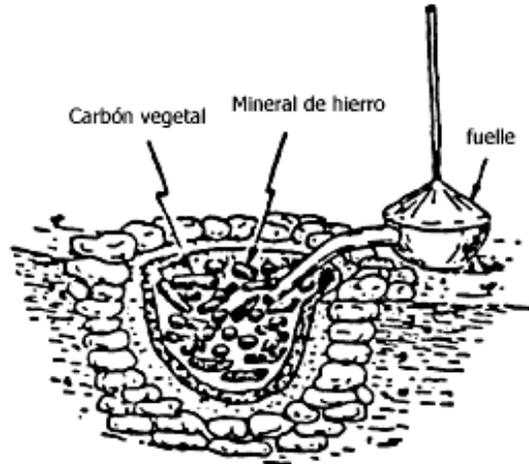


Figura III.1. Crisol primitivo para la reducción del mineral de hierro

En México, las culturas prehispánicas emplearon el oro, la plata y el cobre nativos, e inclusive conocieron el mercurio, el estaño y el plomo.

El oro fue trabajado principalmente por los toltecas, mixtecos, zapotecas y mexicas. También se han descubierto piezas de oro en el centro ceremonial de Chichén Itzá, así como en las tumbas tarascas de Tzin-Tzuntzán.

El hierro que los aztecas, mayas e incas del Perú utilizaban para sus cuchillos, se obtenía de meteoritos que caían del cielo, de ahí que le asignaran un valor superior al oro.

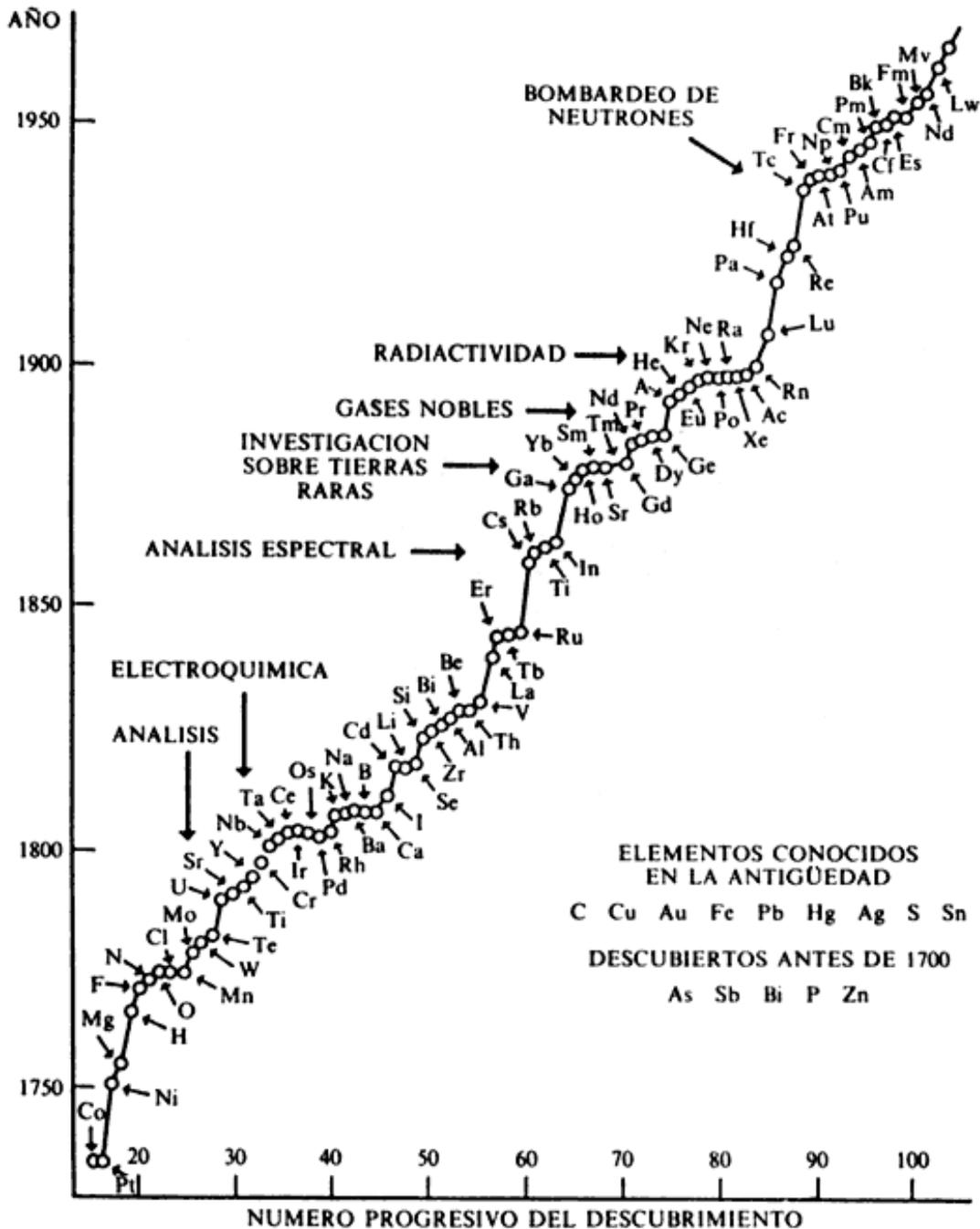


Figura III.2. Diagrama cronológico del descubrimiento de los elementos (Tomado de Cruz, Chamizo y Garriz, *Estructura atómica*, Addison Wesley, Wilmington, 1986).

LOS RECURSOS NATURALES SE AGOTAN

Nuestro mundo es hoy inconcebible sin metales. No obstante, muchos de ellos tienden a agotarse (Cuadro III.1). Peligran el platino, la plata, el oro, el estaño, el mercurio, el zinc (Zn), el plomo, el cobre y el wolframio. Y no es que estos átomos metálicos estén "esfumándose". Simplemente, al haber sido extraídos de las minas donde existían en altas concentraciones, se han desparramado por toda la Tierra o se encuentran en lugares donde su

extracción no es rentable, al menos por el momento. Es decir, los átomos metálicos continúan presentes, pero esparcidos y combinados con otros materiales en las enormes pilas de desechos de la humanidad, de donde no son fácilmente recuperables.

CUADRO III.1 Años en los que se agotarán las reservas conocidas de metales si se continúan explotando al mismo ritmo que ahora.

<i>Símbolo</i>	<i>Año</i>
Ag	1990
Al	2145
Au	2550
Crt	2125
Co	2010
Cu	1990
Fe	2400
Hg	1985
Mn	2150
Mo	2070
Ni	2110
Pb	1990
Pt	1995
Sn	1995
W	2015
Zn	1990

El hombre debe estar atento a todas estas llamadas de atención de la naturaleza respecto al agotamiento de los recursos terrestres. Es necesario refinar los metales inservibles para que vuelvan a ser utilizables.

PROPIEDADES GENERALES DE LOS METALES

CUADRO III.2 Generalidades sobre los metales

<i>Propiedad</i>	<i>Significado común</i>
Alta conductividad eléctrica	Buenos conductores de la electricidad
Alta conductividad térmica	Buenos conductores del calor
Brillo metálico	Apariencia "plateada" o "dorada"
Maleabilidad	Capacidad para deformarse (bajo presión), sin romperse
Ductilidad	Factibilidad de ser formados en hilos delgados
Tendencia a formar cationes	Facilidad de que sus átomos pierdan uno o más electrones al enlazarse químicamente o encontrarse en solución

Aunque cada metal tiene características propias, hay un conjunto de propiedades que los definen, como se muestra en el cuadro III.2.

La mayoría de los metales son sólidos, con relativamente alta densidad y altas temperaturas de fusión y ebullición. Sin embargo, la variedad de estas propiedades es enorme. Sabemos, por ejemplo, que el mercurio y el galio son líquidos (en condiciones ambientales).

De los sólidos, dos metales tienen la menor y mayor densidad: el litio y el osmio, respectivamente.

¿Por qué los cables conductores de corriente eléctrica se hacen de cobre?

Los mejores metales conductores de electricidad son los de la familia 11: plata, cobre y oro, en ese orden, seguidos por el aluminio y el magnesio. En general, la conducción del calor es mayor en los metales que conducen mejor la corriente eléctrica.

En las figuras III.3 y III.4 se grafican la densidad y los puntos de fusión de algunos metales; en estas propiedades se observa un comportamiento periódico. Los metales menos densos resultan también, en general, los que se funden a menor temperatura.

densidad= masa / volumen

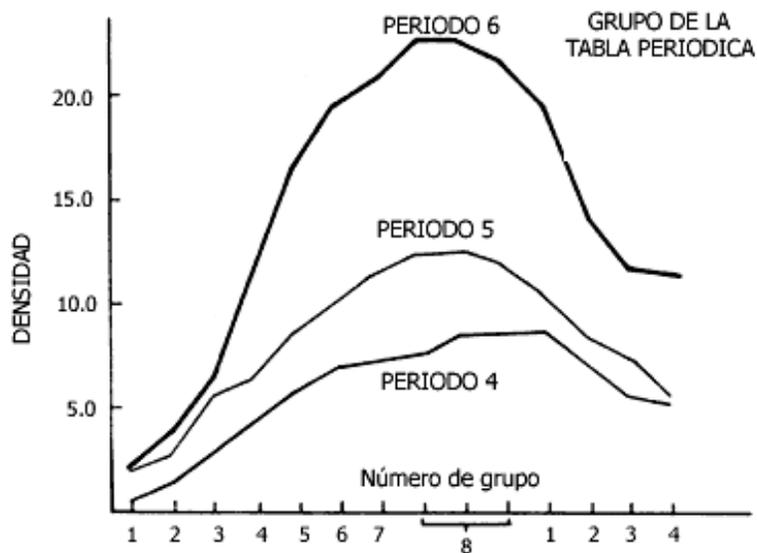


Figura III.3. Densidades de los metales de los periodos cuarto, quinto y sexto.

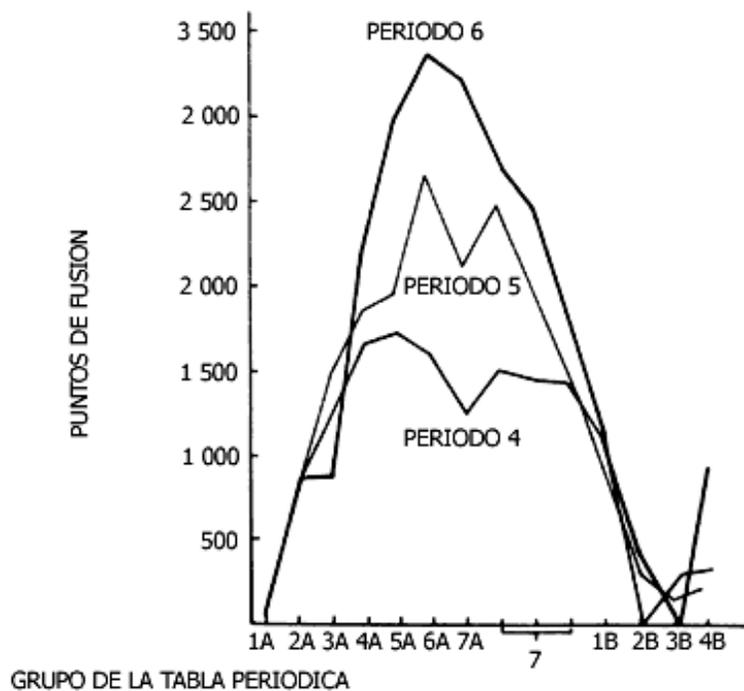


Figura III.4. Puntos de fusión de los metales de los periodos cuarto, quinto y sexto.

Como hemos visto, es raro encontrar metales libres en la corteza terrestre. Más bien se encuentran en forma de óxidos, sulfuros, cloruros, fosfatos, carbonatos, etcétera.

Es tarea de la química obtener los metales a partir de los minerales en los que se encuentran; esta labor, así como la de preparar los metales para su uso, se conoce como metalurgia.

METALURGIA

Durante la Colonia, la metalurgia en la Nueva España fue importante. Bartolomé de Medina desarrolló en 1555, en Padierna, el proceso de recuperación de la plata por amalgamación con mercurio, lo que ha sido llamado por Bargalló como "el mejor legado de Hispanoamérica a la metalurgia universal". En México, y también en esta disciplina, Manuel Andrés del Río descubre en 1801 el eritronio, un nuevo elemento metálico, que fue redescubierto en 1830 por Stefenson y bautizado como vanadio.

CUADRO III.3. Ubicación de los metales en la tabla periódica, incluyendo las tierras raras (de lantano, La, a yterbio, Yb) y los actínidos naturales (de actinio, Ac, uranio, U)

Periodo	1	2											13		
2	Li	Be													
3	Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al	14	15
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga		
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	
Ac	Ph	Pa	U											

El número superior indica la familia a la que pertenecen.

En sus minerales, los metales se encuentran oxidados. Este término no se refiere exclusivamente a la presencia de oxígeno en las menas, aquí se emplea en su acepción más general. Nos referimos a que los átomos metálicos han perdido electrones al combinarse con otros átomos. Así, por ejemplo, en el óxido de hierro, **FeO**, el hierro existe como **Fe²⁺**, es decir, como un átomo de hierro que ha perdido dos electrones, como un catión (Cuadro III.4).

CUADRO III.4 Algunos tipos de mena

<i>Tipo de mena</i>	<i>Algunos ejemplos</i>
Nativos	Cu, Ag, Au, Pt
Óxidos	FeO, Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , SnO ₂ , ZnO
Carbonatos	MgCO ₃ , PbCO ₃ , ZnCO ₃
Sulfuros	Ag ₂ S, Cu ₂ S, HgS, NiS, ZnS
Halogenuros	NaCl, KCl, MgCl ₂
Sulfatos	CuSO ₄ , CaSO ₄ , PbSO ₄
Fosfatos	LaPO ₄

Para extraer el hierro como metal es necesario reintegrarle los electrones que ha perdido al estar combinado con

oxígeno, azufre u otro anión.

Este es el paso crucial de la metalurgia, llamado *reducción del metal*. La reducción es el proceso inverso a la oxidación. Al oxidarse, un metal pierde electrones, al reducirse, vuelve a ganarlos.

**México es el primer
productor de plata en el
mundo**

CUADRO III.5 Valor de la producción minero-metalúrgica de México (metálicos en 1980. SEPARFÍN)

<i>Producto</i>	<i>Millones de pesos</i>	<i>(%)</i>
Plata	22 498	48.18
Cobre	8 670	18.57
Zinc	4 242	9.09
Plomo	3 231	6.92
Hierro	3 159	6.77
Oro	2 826	6.05
Otros	2 063	4.42
Total	46 693	100.00

CUADRO III.6 Valor de la exportación minero-metalúrgica de México en 1980 (Instituto Mexicano de Comercio Exterior)

<i>Producto</i>	<i>Millones de pesos</i>	<i>(%)</i>
Plata	15 477	61.66
Cobre	4 844	19.30
Zinc	2 462	9.81
Plomo	1 475	5.88
Otros	841	3.35
Total	25 100	100.00

**Municipios "superproductores":
Guanajuato, Gto.; Cananea, Son.; Taxco,
Gro.; Fresnillo, Gro.; Fresnillo, Zac.;
Saucillo, Chih.; Pachica, Hgo.**

Existen otros procesos metalúrgicos cuyo carácter no es químico sino más bien físico. Podríamos mencionar tres operaciones metalúrgicas bien definidas:

1. *Tratamiento preliminar*, donde se desea concentrar algún componente de la mena, se excluyen impurezas y se prepara el mineral para su tratamiento posterior.
2. *Reducción*, en el que el compuesto metálico se reduce para obtener el metal libre.
3. *Refinado*, donde el metal es purificado. En algunos casos, en esta fase se añaden ciertas sustancias para dar al metal propiedades específicas.

En los siguientes apartados ejemplificaremos estos procesos representativos.

Sodio: un metal de la familia 1

Los metales del grupo 1, llamados metales alcalinos, constituyen la familia más reactiva. Por tal motivo no existen libres en la naturaleza. Sus propiedades más notables son:

- Tienen una enorme tendencia a perder un electrón (oxidarse) cuando se combinan químicamente. Por ello, existen generalmente como iones unipositivos:



- Desarrollan una fuerte reacción con el agua, formando hidróxidos:

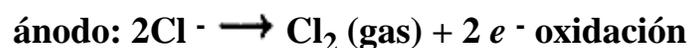


- Son ligeros y maleables, pueden cortarse con un cuchillo.
- Sus sales son casi siempre solubles en agua y conducen la corriente eléctrica.
- Se obtienen por electrólisis de sus sales fundidas. Pero ¿qué es la electrólisis? En este caso, es la forma en que logra reducirse el Na^+ a Na elemental: el paso de corriente eléctrica a través del cloruro de sodio, NaCl , fundido, logra que se reponga el electrón que el sodio había perdido al combinarse con el cloro.

Aun en la sal fundida, el cloro existe como anión, Cl^- , y el sodio como catión, Na^+ . El electrodo negativo (cátodo), rico en electrones, aporta uno a cada ion sodio



En tanto, en el electrodo positivo (ánodo), los cloruros pierden sus electrones, transformándose en cloro elemental:



Así, gracias a la electrólisis pueden elaborarse dos elementos mediante un mismo proceso (véase Figura III.5).

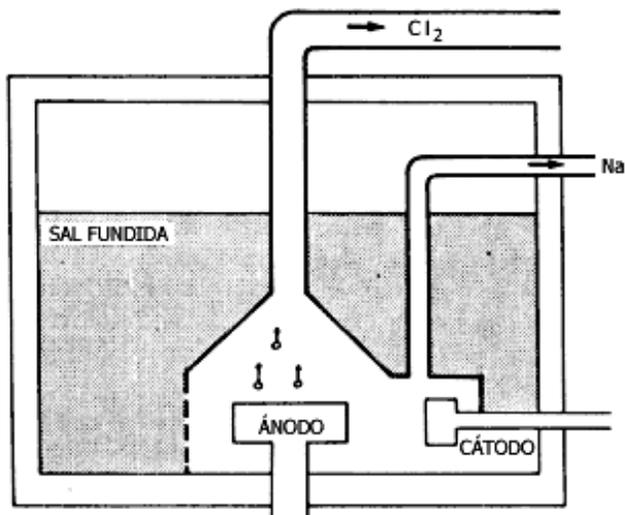


Figura III.5. Diafragma de una celda de producción de sodio y cloro.

El sodio se emplea fundamentalmente como componente de la sosa cáustica o hidróxido de sodio, **NaOH**, cuyos usos más importantes son:

- Manufactura de productos químicos
- Industria del papel
- Tratamiento de alúmina (Al_2O_3)
- Industria textil
- Refinación de petróleo
- Jabones y detergentes

La industria que utiliza el proceso electrolítico mencionado se denomina industria cloro-álcali. La más importante en México es "Cloro de Tehuantepec", que experimenta un rápido crecimiento, como se advierte en las gráficas de la figura III.6.

Propiedades de los metales de la familia 2

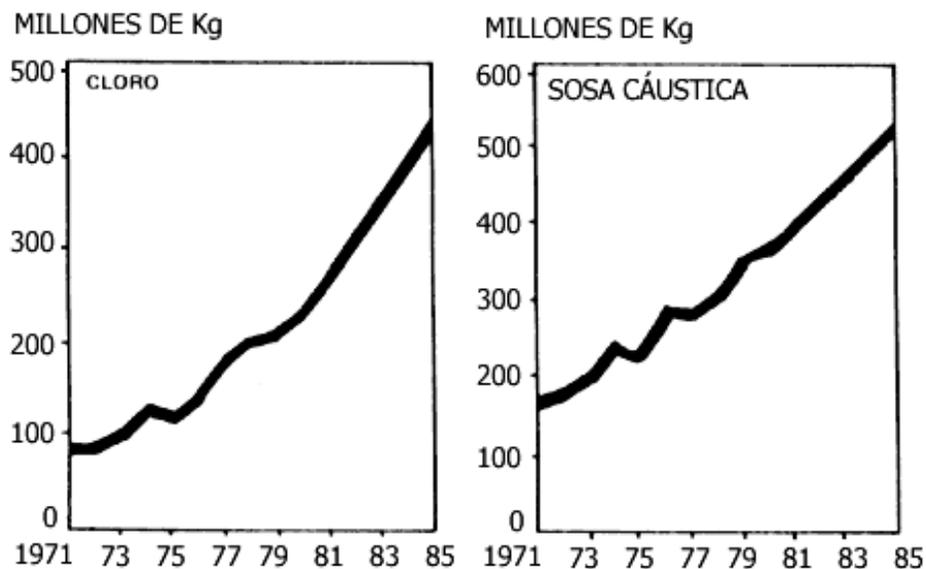
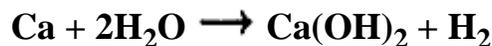


Figura III.6. Producción y tendencia de la industria cloro-álcali mexicana.

- Son muy reactivos, pero no tanto como los alcalinos.
- Al igual que el sodio, se obtienen por electrólisis de sus sales fundidas.
- Son divalentes y existen, más o menos bien definidos, como iones bivalentes en sus compuestos:



- Reaccionan también con agua formando hidróxidos:



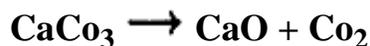
- Sus sales son menos solubles en agua que las de los metales alcalinos, aunque también conducen la corriente eléctrica. Son responsables de la "dureza" del agua, que deteriora las calderas y hace que el jabón no espume.

Usos y origen del calcio

- Se le emplea en metalurgia para desoxidar, decarbonizar y eliminar el nitrógeno de la fundición.
- Para el tratamiento de agua potable.
- Para el control de contaminación.
- Para preparar aleaciones (con el cerio, para piedras de encendedor, y con plomo, para placas de acumuladores).

Se presenta en la naturaleza como:

- 1) Piedra caliza (CaCO_3 con impurezas), ampliamente empleada en la elaboración de productos químicos. Al calentarse se descompone:



Esta reacción es una importante fuente industrial de bióxido de carbono. Los yacimientos más importantes en México son los de Huescalapa, Jal., Tolteca, Hgo. y Apasco, México.

2) Calcita o espato de Islandia (CaCO_3 cristalino y puro). Se obtiene de yacimientos en los estados de Chihuahua, Sonora, Sinaloa y Durango.

3) Yeso (principalmente sulfato de calcio, CaSO_4), de amplio uso en la industria de la construcción.

Metales de transición

Los metales de transición forman las familias 3 a 12 de la tabla periódica. Comparten un gran conjunto de propiedades físicas y químicas, y por ello se les agrupa bajo la misma denominación.

El hierro y el cobre son, seguramente, los más conocidos. La mayoría son densos y con altos puntos de ebullición y fusión. Su química es de un enorme interés teórico-práctico, y es tan extensa que lo que aquí diremos puede considerarse como "la primera palabra de una enciclopedia de diez tomos".

En general, en sus compuestos se presentan como cationes con cargas +2 y +3, aunque en la familia 11 existen también como iones monocargados:



Al igual que los metales alcalinos y alcalinotérreos, muchos metales de transición liberan el hidrógeno del agua, pero no lo hacen con tanta facilidad. Hay dos grupos que no lo logran: los metales de la familia 11 (**Cu, Ag, Au**) y los llamados metales nobles (**Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt**), que en general presentan poca reactividad.

Veamos cómo se obtiene uno de los metales de transición más conocidos, el hierro. A partir del año 1300 el hierro se obtiene en los llamados "altos hornos". Ello significa que antes de que la química naciera como ciencia, el hombre ya sabía reducir (con carbón) el hierro de sus minerales para convertirlo en hierro metálico. Y también sabía que el mismo carbón que actuaba como elemento reductor le confería al hierro una gran dureza (acero).

Ante todo el mineral se concentra en óxido de hierro (tratamiento preliminar), aprovechando sus propiedades magnéticas. Para ello se utiliza un imán, que atrae el óxido de hierro y no a otros compuestos que lo acompañan.

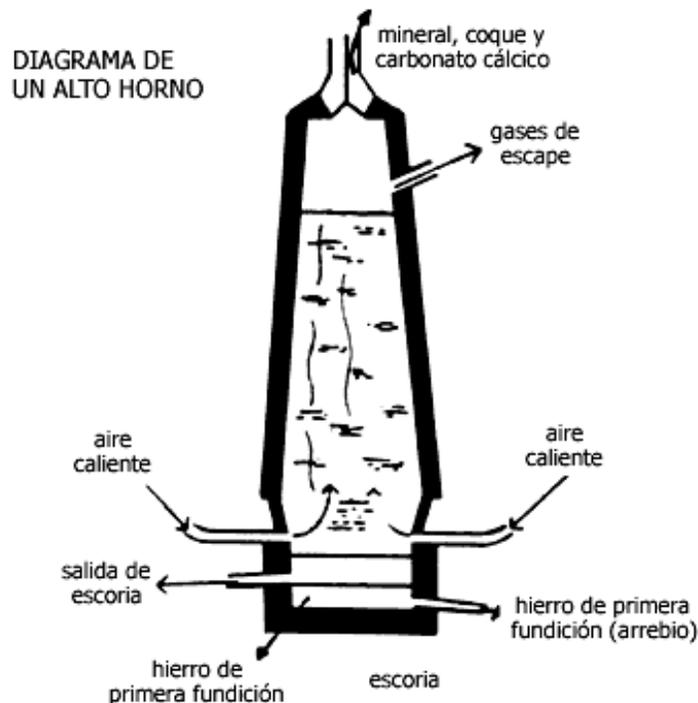


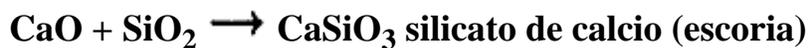
Figura III.7. Diagrama de una alto horno

Dentro de los altos hornos se producen dos reacciones fundamentales:



En esta última reacción, el óxido de hierro se reduce (pues pierde oxígeno) y el monóxido de carbono se oxida (ya que lo gana).

Como el mineral contiene muchas impurezas arenosas de sílica (dióxido de silicio, SiO_2), que se funden a temperaturas muy elevadas, se acostumbra añadir piedra caliza (CaCO_3) al mineral de entrada. Con ello se logra convertir la sílica en un silicato, al cual se le llama escoria, que en el horno se licua, con facilidad:



El hierro que sale del alto horno aún contiene 4% de carbón.

Como los mejores aceros son aquellos que poseen entre 0.15 y 0.85% de carbón, el hierro debe recibir un tratamiento posterior (refinado) por medio del cual se reduce su contenido de carbón al quemarlo en presencia de oxígeno.

Acero inoxidable:	
Cr	18%
Ni	8%
Fe	74%

Adicionando al hierro otros metales como níquel, cromo o cobalto, se obtiene una aleación muy resistente a la corrosión, llamada acero inoxidable.

Tal vez la tecnología mexicana mas conocida en el extranjero sea la que desarrolló la compañía "Hojalata y Lámina" (HYLSA), de Monterrey, respecto al llamado "hierro esponja". En 1957, un efecto de la guerra de Corea fue la elevación de los precios de la chatarra. HYLSA, que producía acero plano a partir de chatarra, hubo de iniciar un programa de investigación cuyo resultado fue el proceso de reducción directa del mineral de hierro; una tecnología tercermundista de primera línea.

Treinta años más tarde, cuando la producción mundial de hierro alcanza los 1 000 millones de toneladas, la tecnología de HYLSA es líder en la obtención de hierro por reducción directa.

La industria del hierro es de gran importancia en México. En 1976 arrancó la primera etapa de la Siderúrgica Lázaro Cárdenas, en Michoacán, que actualmente produce más de un millón de toneladas de acero al año. Su construcción concluirá hacia el año 2000, con una capacidad para procesar anualmente unos 10 millones de toneladas de acero.



Figura III.8. Proceso H y L 1, planta con capacidad de 2.1 millones de toneladas anuales en la siderúrgica de Orinoco (Sydor 2). Puerto Ordaz, Venezuela.

El aluminio: metal del futuro

La mena principal del aluminio es la bauxita, un óxido hidratado de aluminio: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x \text{H}_2\text{O}$.

El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre

La bauxita recibe un tratamiento previo para eliminar impurezas de hierro y se reduce electrometalúrgicamente, como los metales alcalinotérreos.

Aunque no es tan buen conductor como el cobre, el aluminio compite actualmente con él en la industria eléctrica, debido a su menor costo. También ha desplazado a otros metales en la fabricación de utensilios de cocina y en las industrias de la construcción y del transporte.

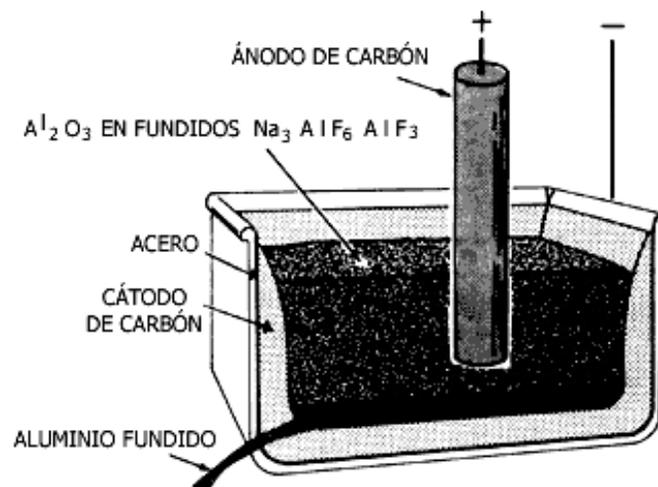


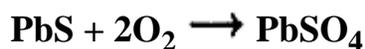
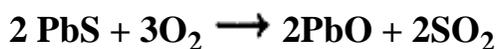
Figura III.9. Celda para obtener aluminio

Recientemente se ha descubierto que puede ser un temible tóxico. El aluminio penetra en el cuerpo humano de diferentes formas, pero particularmente por vía pulmonar, ya que el aire que respiramos está cargado de polvillo microscópico. Normalmente se excreta por vía urinaria. En caso de absorción importante y prolongada, el aluminio se concentra en diversos órganos: hígado, corazón, cerebro y médula ósea. Su acumulación puede dar lugar a diversos trastornos.

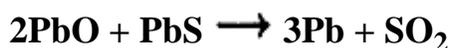
Obtención y usos del plomo

El plomo, **Pb**, es un metal de la familia 14. Este grupo de metales está poco extendido en la naturaleza, de ahí que resulte importante no malgastarlos, pues están en peligro de dejar de ser aprovechables. El plomo se encuentra principalmente como sulfuro, en un mineral llamado galena.

El tratamiento preliminar que recibe la galena para concentrarla en plomo se conoce como *flotación*. En este procedimiento, el mineral, finamente molido, se mezcla con ciertos aceites y agua. El mineral de plomo se moja por el aceite, y las impurezas (conocidas con el nombre de ganga), por el agua. La agitación con aire produce un sobrenadante que flota y que contiene, en su mayoría, el mineral de plomo mojado en aceite. Parte del mineral concentrado se somete a tostación con aire. Como resultado, ocurren las reacciones:



El óxido de plomo y el sulfato vuelven a mezclarse con la galena y se reducen con carbón en un horno, en el que se producen otras reacciones:



El plomo obtenido se somete entonces a refinado.

Los usos del plomo son varios: en baterías eléctricas, en cañerías y soldaduras, como protector de radiaciones, y se agrega a las gasolinas, como antidetonante, en forma de tetraetilo de plomo.  Su inhalación prolongada provoca una enfermedad llamada saturnismo y contribuye a la contaminación ambiental.

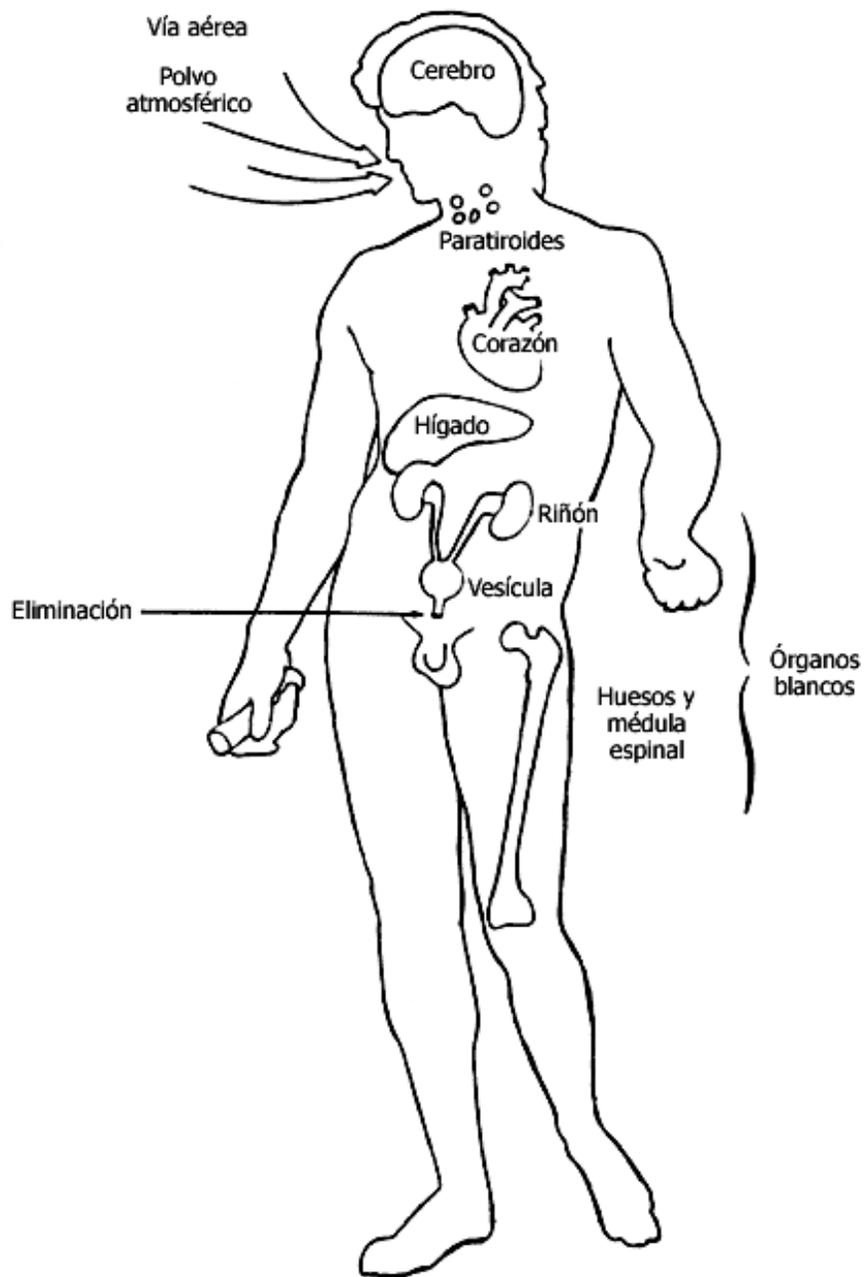


Figura III.10. Órganos en los que se concentra el aluminio.

COROLARIO

Los metales conforman la mayoría de los elementos químicos. Aquí hemos dado una breve reseña de sus procesos de obtención y propiedades, pero creemos que basta para entender su enorme importancia industrial y tecnológica. Por ello es que la química y la ingeniería metalúrgicas constituyen profesiones de gran trascendencia y futuro. Con esto termina nuestro paseo por la litosfera.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, G., *El hombre y los materiales*, colección "La ciencia desde México", 69, FCE, México, 1988.

"Alto horno o reducción directa", *Investigación científica y Tecnológica* **35** y **36**, 28 (diciembre de 1980).

Bargalló, M., *Tratado de química inorgánica*, Porrúa, México, 1962.

Celada, J., "La fusión del hierro esponja", *Ciencia y Desarrollo* **27**, 110 (julio-agosto de 1979).

Consejo de Recursos Minerales, *Anuario estadístico de la minería mexicana*, 1980, México, 1981.

Consejo de Recursos Naturales no Renovables, *Los recursos minerales de México*. vol. 1. *Metálicos*, México, 1969.

Choppin, G. R., y B. Jaffé, *Química, ciencia de la materia, la energía y el cambio*, Publicaciones Culturales, México, 1967.

"El aluminio reduce costos de fabricación en el sector eléctrico", *Investigación Científica y Tecnológica* **32**, 18 (octubre de 1980).

"Ferroaducto, otra posibilidad", *Investigación Científica y Tecnológica* **43**,12 (abril de 1981).

Galle, P., "La toxicidad del aluminio", *Mundo Científico* **6**, 856 (1986).

"Integración del sector siderúrgico paraestatal", *Investigación Científica y Tecnológica* **28**,12 (agosto de 1980).

"Investigación metalúrgica vinculada a necesidades industriales", *Investigación Científica y Tecnológica* **17**, 15 (marzo de 1980).

Lugo, J., *La superficie de la Tierra. Un vistazo a un mundo cambiante*, colección "La ciencia desde México", 54, FCE, México, 1988.

Petrucci, R. H., *Química general*, Fondo Educativo Interamericano, Bogotá, 1977.

Rangel, C. E., *Los materiales de la civilización*, colección "La ciencia desde México", 29, FCE, México, 1987.

"La siderurgia en México", *Información Científica y Tecnológica* **8** (1986).



[Nota 5] [←]

Piedra que, según creían los alquimistas, podría convertir cualquier cosa en oro, por simple contacto.

Inicio |

[Nota 6] 

El que, afortunadamente, se ha sustituido por metil terbutiléter, en la gasolina llamada "oxigenada".

Inicio |

IV. LA HIDROSFERA. DESALINIZACIÓN DEL AGUA DEL MAR

INTRODUCCIÓN

LA NECESIDAD de agua en el hombre, los animales y las plantas es bien conocida. La vida se originó en los océanos y salió de ellos cuando aprendió a desarrollar una piel impermeable, para retener el agua con ella. Somos, sin duda, animales de agua, sólo que la tenemos por dentro, no por fuera.

La cantidad absolutamente indispensable para el mantenimiento de la vida de un adulto normal en el calor más intenso del desierto varía de 7 a 15 litros, según la temperatura y el tipo de actividad que realice. En clima templado, la cantidad de agua que el hombre necesita diariamente se calcula en 2 litros (Figura IV.1).

El agua se está convirtiendo en un bien escaso, ya que no cesa de aumentar su consumo como resultado del crecimiento de la población y el incremento del nivel de vida. En el tercer mundo, el consumo medio de agua por habitante es del orden de 50 litros diarios, mientras que en las naciones industrializadas sobrepasa los 500 litros por día (estos datos comprenden todos los usos).

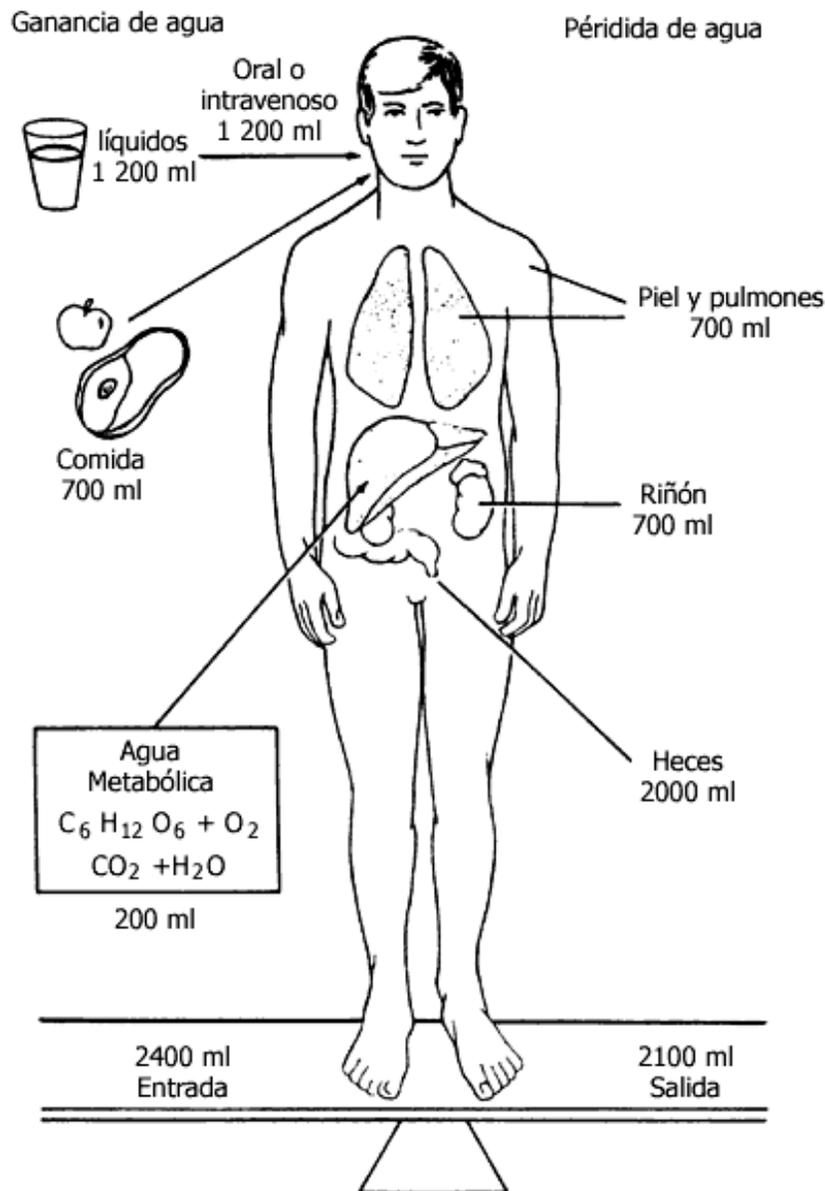


Figura IV.1. Balance del agua en el hombre.

LA HIDROSFERA

La hidrosfera incluye los océanos, mares, ríos, agua subterránea, el hielo y la nieve. Los océanos cubren aproximadamente tres cuartas partes de la superficie terrestre, con una profundidad promedio de 3.5 km, lo que representa 97% del total de agua de nuestro planeta. En ellos se han encontrado al menos 77 elementos, siendo con mucho los más importantes Na y Cl, que junto con el Mg y el bromo, Br, son de los pocos que se explotan comercialmente a partir del agua de mar. En la actualidad, se supone que prácticamente todos los elementos están presentes en los océanos (Cuadro IV.1).

CUADRO IV.1 Concentración de algunos elementos en 1 km³ de agua de mar

<i>Elemento</i>	<i>Miles de toneladas</i>	<i>Elemento</i>	<i>Kg</i>
Cl	21 485	U	3 360
Na	11 883	Ag	240
Mg	1 536	Ne	120
S	1 003	Th	48
Br	73	Au	4.8

Aunque propiamente no del agua de mar, sino debajo de ella, del lecho marino del Pacífico central, cerca de las islas de Hawai, se han iniciado las investigaciones para extraer nódulos de manganeso, **Mn** (del tamaño de una pelota de golf o una papa pequeña). Estos nódulos son una fuente renovable de minerales, ya que se forman a partir del manto al ritmo de entre 6 y 10 toneladas al año y contienen principalmente **Mn** y **Fe**, además de cantidades pequeñas de **Ni**, **Cu**, **Co**, **Zn**, **Cr**, **U**, **W** y **Pb**.

El agua dulce representa 3% del total y de esta cantidad aproximadamente 98% está congelada, de allí que tengamos acceso únicamente a 0.06% de toda el agua del planeta.

Si toda el agua de la tierra se encontrara en un barril de 200 L

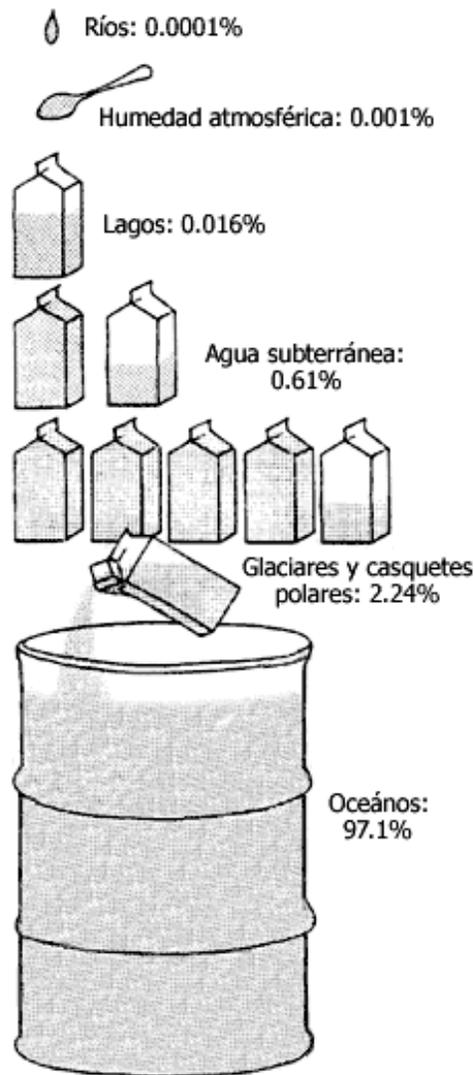


Figura IV.2. Distribución de agua en la Tierra

LA DESALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR

Desde los tiempos prehistóricos, los problemas suscitados por la cantidad y la calidad del agua fueron de solución imprescindible para la existencia de las agrupaciones humanas. Cuando el agua escaseaba, sobrevénía el éxodo de los pueblos, el abandono de terrenos que una vez fueron fértiles y aun la desaparición de culturas milenarias.

Expertos soviéticos prevén para el año 2015 el agotamiento de los recursos de agua consumible en las regiones habitadas del planeta. Sin embargo, en la Tierra estamos rodeados de agua salada. Si fuera posible quitar las sales del agua del océano mediante un proceso barato, podrían resolverse algunos de los problemas más urgentes de la humanidad. Las tierras áridas que cubren más de una tercera parte de la superficie de los continentes (la tierra de cultivo equivale sólo a una décima parte) podrían ser fértiles otra vez.

La conversión del agua de mar en agua dulce no es una idea nueva. La destilación, el método básico para hacerlo, se practica desde hace 2 000 años, particularmente por los marinos. El hombre primitivo hizo otro tanto, pero si procedía a la evaporación del agua era para obtener sal.

Hoy en día, tanto desde el punto de vista geográfico como económico, sólo en situaciones especiales se ha

justificado la instalación de grandes plantas para desalar el agua de mar. El mejor ejemplo lo constituyen los países petroleros del Golfo Pérsico, donde hasta hace 35 años se tenía que importar agua dulce por barco a un costo exorbitante. A partir de entonces se han ido construyendo grandes destilerías de agua alimentadas por gas natural y petróleo.

Comentaremos ahora brevemente los principales procedimientos para desalar el agua de mar. Estos son:

- Destilación
- Procesos a través de membranas
- Congelación

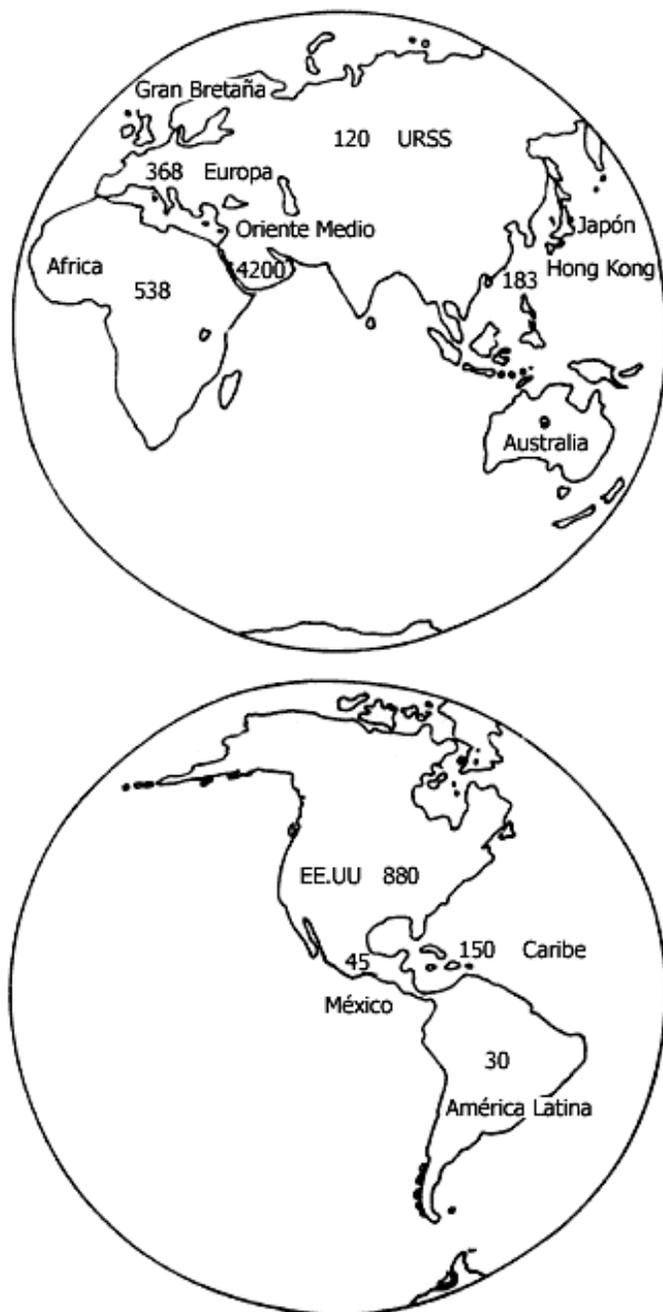


Figura IV.3. La distribución geográfica de las capacidades instaladas de desalación, en miles de m³ / día

(enero de 1980), muestra que con 4 200 000 m³ / día, el Oriente Medio representa el 61% del total. Le siguen los Estados Unidos, que totaliza el 13%. Europa no representa más que el 5 por ciento.

Destilación

El procedimiento más simple y barato para destilar agua de mar consiste en el invernadero destilador. El agua salada se calienta en el interior de un invernadero por la acción de los rayos solares.

El vapor que se forma se condensa sobre los cristales, y las gotas de agua se recogen en un canal. Un destilador de este tipo funcionó, durante 40 años, en las salinas de Chile a finales del siglo pasado, donde suministraba 20 m³ por día de agua dulce. Sin embargo, las posibilidades de este sencillo procedimiento son limitadas, ya que la producción no puede sobrepasar los 4 o 5 litros por día y por m² de superficie de agua.

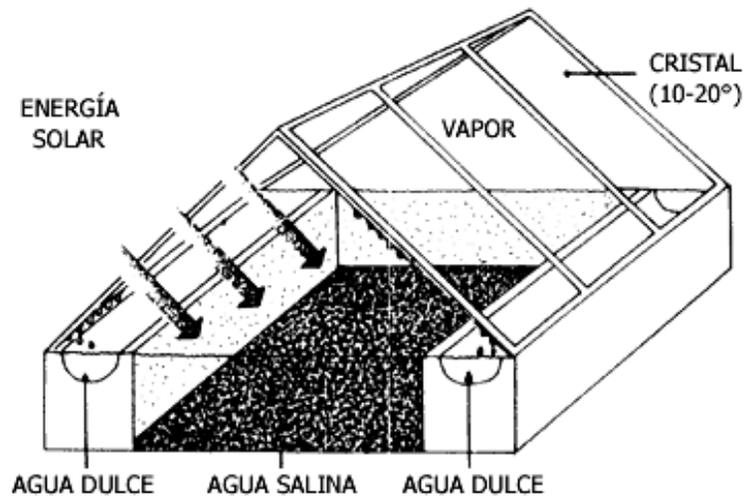


Figura IV.4. Invernadero destilador.

Para destilaciones a gran escala se emplea el método de evaporación súbita. Agua de mar bajo presión se calienta a 100° C y se introduce en una cámara que se encuentra a una presión menor. El resultado es una evaporación instantánea por descompresión, llamada destilación súbita. El vapor se condensa en tubos por los que fluye agua de mar fría, calentándola.

El agua dulce se separa, mientras que el agua salada no evaporada pasa a otra cámara que tiene una presión menor que la primera. La vaporización instantánea ocurre otra vez, la temperatura del agua salada disminuye, mientras que la del agua de mar que corre por los tubos, para condensar el vapor, aumenta.

En este procedimiento el intercambio de calor es muy eficiente. Cuando agua de mar a 20° C es calentada a 100° C, evaporada en varias cámaras y eventualmente descargada a 30° C otra vez al mar, las pérdidas de calor son escasas.

En la actualidad esta técnica representa 70% de la capacidad instalada en la Tierra. Sus desventajas son la corrosión y las incrustaciones de sales como carbonato de calcio (**CaCO₃**), hidróxido de magnesio (**Mg(OH)₂**) y sulfato de calcio (**CaSO₄**).

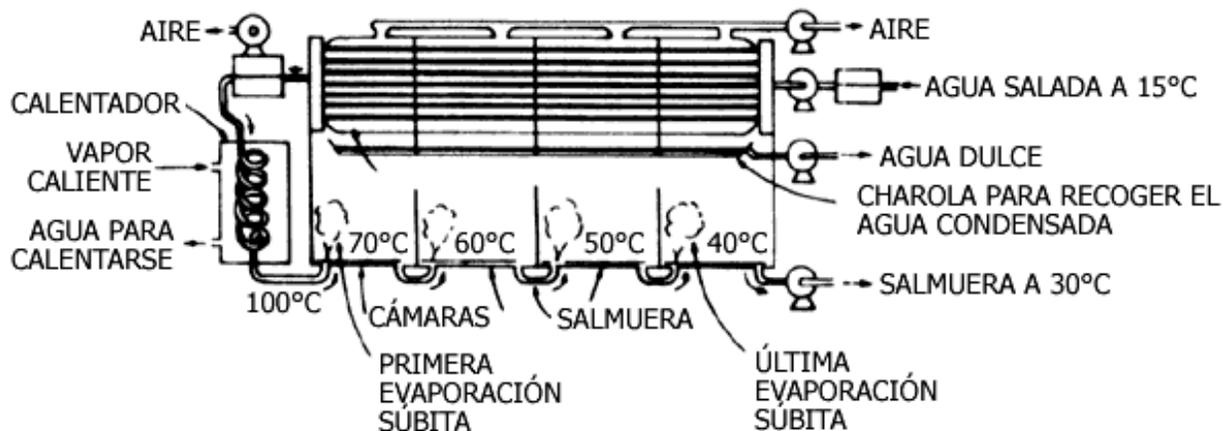


Figura IV.5. Evaporación súbita. Diagrama del proceso. Mediante un proceso similar al que se ilustra, la planta de Shuaiba, en Kuwait, una de las mayores del mundo, produce casi 50 millones de litros de agua dulce por día, en cada una de sus unidades.

Procesos a través de membranas

En estos procesos se utilizan membranas de plástico para permitir el paso selectivo de iones (electrodialisis) o agua (ósmosis inversa).

La primera instalación para electrodialisis data de 1960. El proceso consiste, como se muestra en la figura IV.6, de dos electrodos con cargas diferentes, separados por una serie de cámaras en las cuales se encuentran membranas aniónicas (es decir, son permeables únicamente a los aniones; por ejemplo, Cl^- , SO_4^{2-} , etc.). Cuando no hay paso de corriente mediante los electrodos, cada compartimiento está lleno de agua salada. Al aplicarse la corriente eléctrica, los iones migran hacia el electrodo de polaridad opuesta, pasando por la membrana catiónica. El Na^+ , el Ca^{+2} y el Mg^{+2} se mueven hacia el electrodo negativo y se detienen al llegar a la membrana aniónica; lo mismo sucede con los aniones: migran a través de la membrana aniónica y son detenidos por la catiónica. Después de cierto tiempo se tienen compartimientos alternadamente llenos de salmuera y de agua dulce. Este proceso se emplea en Japón, la Unión Soviética, Israel, Estados Unidos y Holanda, entre otros países.

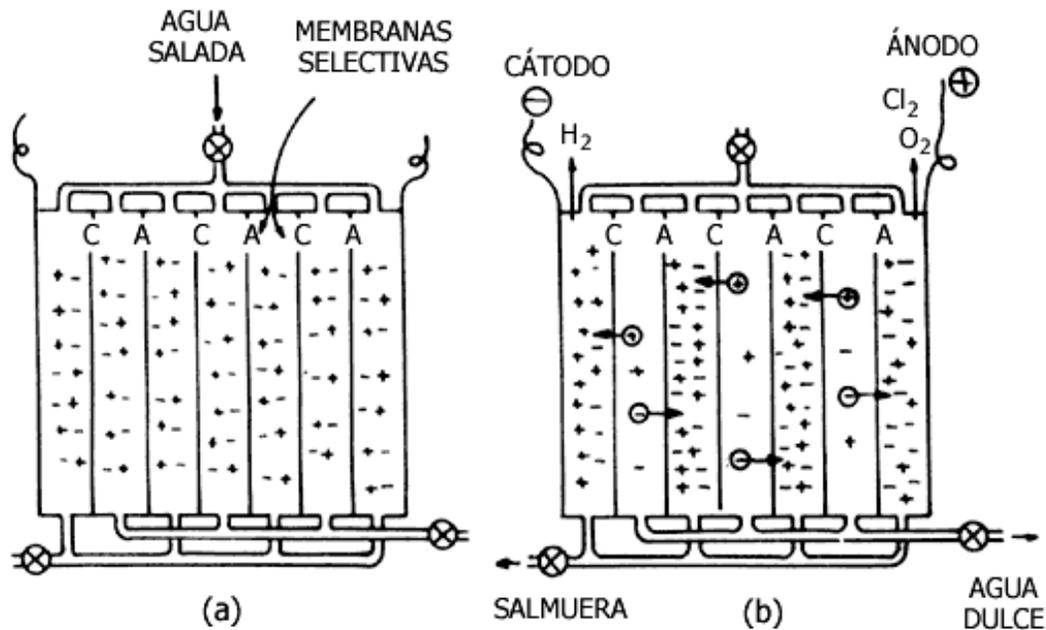


Figura IV.6. Principios de la electrodiálisis. (a) Conjunto de celdas separadas por membranas selectivas a los cationes (C) o a los aniones (A), antes de pasar la corriente eléctrica. (b) Después de pasar la corriente.

El segundo procedimiento con membrana, la ósmosis inversa, se ha desarrollado más recientemente. La ósmosis consiste en el transporte espontáneo de un disolvente de una solución diluida a otra más concentrada, a través de una membrana semipermeable.

Las membranas para ósmosis inversa son polímeros del poliestireno y divinilbenceno, con espesores menores que un milímetro

Cuando se encuentran agua dulce y de mar en lados opuestos de una membrana que es permeable únicamente al agua, se observa un flujo de agua dulce al agua salada. Para que este fenómeno no se presente, es decir, para que no haya transferencia del disolvente que diluya la solución salada, se requiere aplicar una presión llamada presión osmótica. El proceso de ósmosis inversa consiste en aplicar sobre la solución concentrada en sales (agua de mar) una presión mayor que la osmótica. El agua pasa por medio de la membrana en dirección contraria, aumentando el volumen total del agua dulce.

Un gran problema que enfrentan los procedimientos de membrana son las incrustaciones de sales y los depósitos de materias orgánicas presentes en el agua de mar; de allí que las unidades de ósmosis exijan un pretratamiento importante, particularmente filtración sobre arena o tierra de diatomeas.

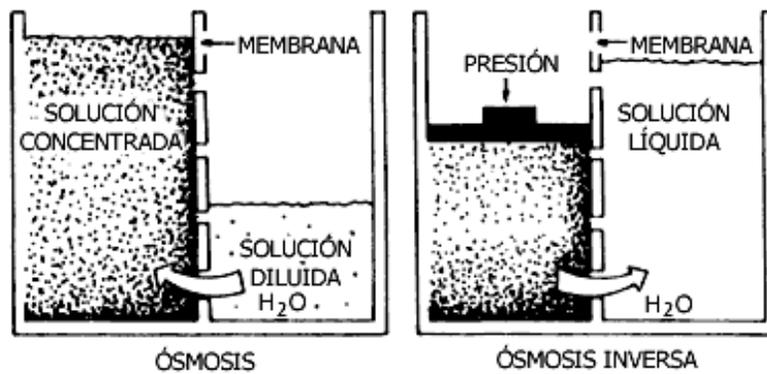


Figura IV.7. Ósmosis. Si en un compartimiento hay agua pura y en el otro salada, se observa un flujo de la primera hacia el compartimiento con agua salada: es el fenómeno de la ósmosis. Si se intenta impedir este flujo de agua aplicando una presión sobre la solución más concentrada, disminuye la cantidad de agua que traspasará por ósmosis. Al aumentar dicha presión llegará un momento en que el flujo de agua se detendrá. Esta presión de equilibrio es la denominada presión osmótica.

Congelación

El tercer método, objeto de intensos estudios en la actualidad, es el que consiste en desalar el agua de mar por congelación. Cuando el agua salada se congela, el hielo prácticamente no contiene nada de sal. Puede entonces obtenerse agua dulce a partir del congelamiento parcial del agua de mar, separando el hielo y luego derritiéndolo. La congelación supera a la destilación ya que se necesita menos energía para congelar el agua que para evaporarla, y en que no hay formación de depósitos minerales en las máquinas, como ocurre cuando se debe llegar a altas temperaturas. La mayor desventaja de este proceso consiste en la dificultad de eliminar la salmuera que tiende a adherirse a los cristales de agua dulce congelada.

El remolque de icebergs de las regiones polares a lugares que requieren agua dulce se relaciona con este proceso. Esta experiencia se realizó en 1890 y en 1900, cuando varios barcos arrastraron pequeños icebergs hasta Valparaíso, en Chile, y el Callao, en Perú, cubriendo una distancia de casi 4 000 km. Sin embargo, hay aún muchos problemas técnicos por resolver, como la ruptura del iceberg durante el viaje y la distribución del agua en el lugar requerido.

Las técnicas para desalar el agua de mar están bien establecidas. No obstante, el precio del metro cúbico de agua dulce producido es todavía muy alto, lo que las limita a los países ricos o a los que tienen energéticos baratos, como los países productores de petróleo.

Para terminar con el método de congelación, un detalle curioso. Hace unos 10 000 años, al término de la última glaciación en los glaciares de Groenlandia y la Antártida, se encontraba 80% del agua dulce del planeta en estado sólido. Una sociedad danesa está lanzando al mercado cubos de hielo cortados directamente de los icebergs. Al fundirse el hielo, las microscópicas burbujas de aire en él atrapadas hace miles de años, dan la efervescencia del agua gaseosa a las bebidas donde se colocan dichos cubos.

LA SITUACIÓN EN MÉXICO

Se estima que para el año 2000 nuestro país tendrá una baja disponibilidad de agua dulce (entre 1 000 y 5 000 litros anuales por persona, es decir, aproximadamente de 3 a 15 litros diarios), de ahí que el conocimiento y la puesta en marcha de técnicas para desalar agua de mar resulten de particular importancia.

Sin embargo, el problema no se resuelve únicamente con importar grandes y costosos equipos del extranjero, sino que resulta imprescindible la capacitación del personal idóneo a diferentes niveles de organización.

A pesar de que en diversos estados funcionan plantas desaladoras, un ejemplo de la situación por la que atraviesan las plantas en México es el caso de Quintana Roo. En este estado hay varias plantas de ósmosis inversa, como las de Xcalak, cerca de Chetumal, Isla Contoy y Cozumel; no obstante, prácticamente todas ellas están abandonadas, ya sea por falta de refacciones (en la actualidad para este proceso más de 50% del equipo es de importación), o porque realmente nunca falta agua en las comunidades donde se instalaron.

Resulta entonces fundamental que el gobierno, a través de la SEDUE, emita políticas y normas sobre la tecnología para desalar agua de mar, de acuerdo con las circunstancias de nuestro país.

Nos estamos quedando sin agua dulce, por lo que tenemos que aprender a optimizar las diversas formas para desalar el agua de mar. Con esta idea concluye nuestro tránsito por la hidrosfera.

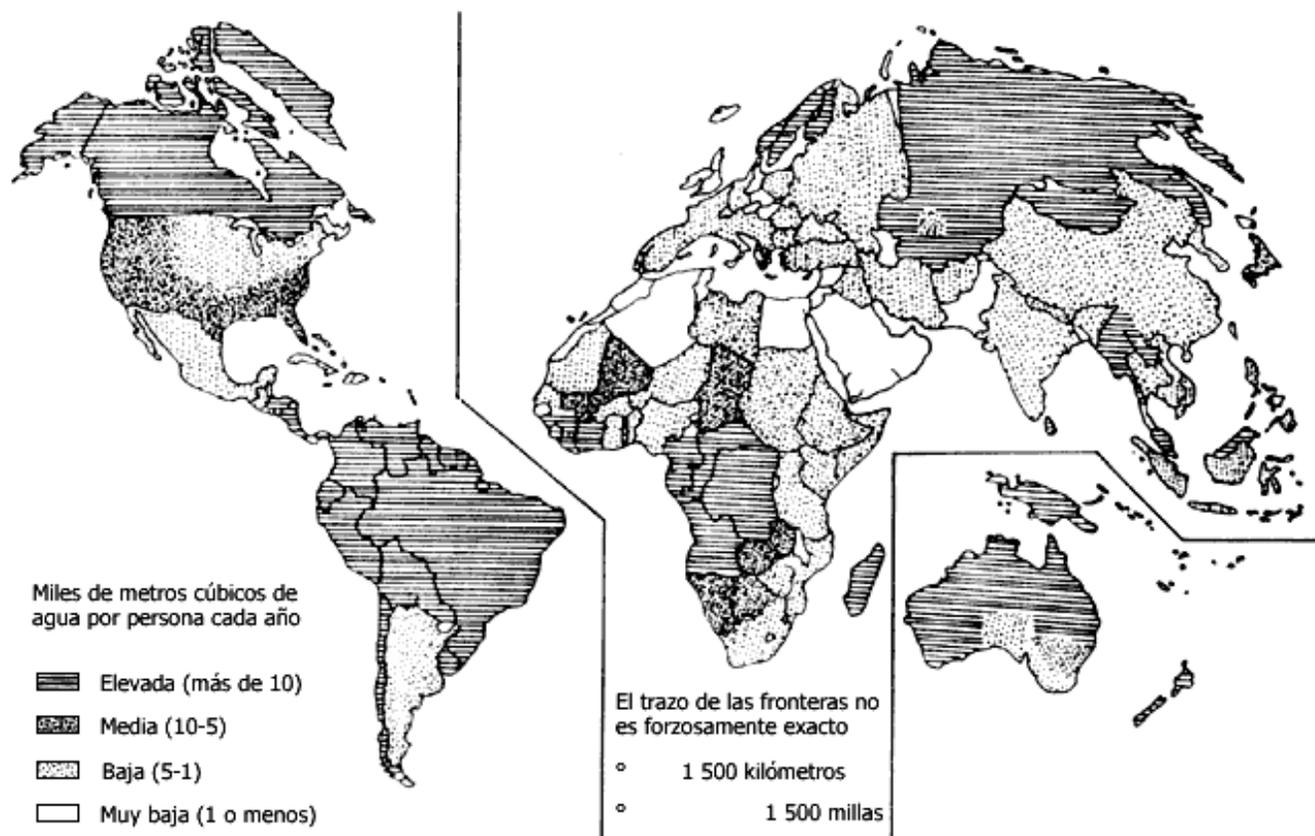


Figura IV.8. Disponibilidad proyectada de agua *per capita* en el inicio del nuevo siglo. Tomada de "Los recursos del mundo en el año 2000", *Ciencia y Desarrollo*, septiembre-octubre de 1983.

BIBLIOGRAFÍA

Candel, R., *El agua en la vida*, Libros de bolsillo, El Correo de la Unesco, Promoción Cultural, Barcelona, 1974.

Cifuentes, J. L., P. Torres García y M. Frías, *El océano y sus recursos II. Oceanografía geológica y oceanografía química, VIII. El aprovechamiento de los recursos del mar*, colección "La ciencia desde México", 12 y 67, FCE, México, 1986 y 1988.

Maurel, A., "La desalinación del agua de mar", *Mundo Científico* 1, 296 (1981).

Nordmann, J., *What is Chemistry*, Harper & Row, Nueva York, 1974.

Inicio



V. LA ATMÓSFERA. LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

INTRODUCCIÓN

LA MOTIVACIÓN fundamental que permitió la sobrevivencia del hombre fue la búsqueda de la mejor satisfacción de sus necesidades primordiales.

En nuestra sociedad actual, el avance tecnológico es enorme y en la obtención de satisfactores se ha perseguido generalmente el máximo beneficio, con el menor costo y esfuerzo. La acumulación de industrias, automóviles y otras fuentes de contaminación ha cumplido con aumentar la producción de bienes, pero a un enorme costo social, ya que ha originado una contaminación del ambiente que es incompatible con la salud humana y la sobrevivencia del ecosistema en que vivimos.

En las grandes urbes el fenómeno de la contaminación es crítico.

Aquél que piense que vivimos mejor ahora que antes, porque producimos más bienes, que piense también que estamos envenenando más, ahora que antes, el aire que aspiramos 13 veces por minuto.

Sin comida, podemos vivir cerca de un mes. Sin agua, sólo unos cuantos días. Pero sin aire, moriríamos en minutos. Un aire envenenado es tan nocivo como la ausencia del mismo. En lugar de llevar oxígeno a nuestras células, la hemoglobina transporta veneno.

Quizá el caso más notorio en la historia de la contaminación ocurrió la semana del 4 al 10 de diciembre de 1952, cuando una masa de aire frío cubrió la ciudad de Londres. Debido a la baja temperatura, gran parte de la población prendió sus estufas de carbón, y la industria y la circulación de vehículos no se detuvieron. El día 6, la luz del Sol apenas penetraba la densa nube de contaminantes, que no podía salir del valle del Támesis debido a la menor temperatura de la masa superior de aire. La incidencia de ataques al corazón y las dificultades respiratorias creció. Cuando al fin el viento despejó el cielo, se estima que unas 4 000 personas habían muerto por razones atribuibles al fenómeno.

Ésta y otras catástrofes similares han hecho tomar conciencia a diversos sectores de la población, aunque muchos otros aún ignoran las letales consecuencias de la contaminación.



Figura V.1. En la ciudad de México se emiten al día un promedio de cuatro mil toneladas de gases tóxicos que forman una capa contaminadora de hasta 300 metros de espesor.

Vale la pena aclarar que la mano del hombre y la era tecnológica no son los únicos culpables de la impureza del aire. Se estima que cuatro erupciones volcánicas recientes (Krakatoa, 1883; Katami, 1912; Hekla, 1947; y Chichón, 1982) han arrojado más gases y partículas a la atmósfera que el hombre a lo largo de su historia.

En este capítulo revisaremos los aspectos químicos más relevantes de la contaminación atmosférica. Iniciamos con la descripción de la atmósfera, para luego considerar los diversos contaminantes y sus efectos y, finalmente, citar las medidas más generalizadas para su control.



Figura V.2. El volcán Iztlacíhuatl (5 286 m) en el valle de México.

LA ATMÓSFERA

La atmósfera que rodea la Tierra es una delgada capa de gases. Hasta unos 30 km de altura, el aire constituye un 99% del peso total de la atmósfera. Sólo existe el suficiente oxígeno para la subsistencia vital a alturas menores de

los 6 km sobre el nivel del mar, y en los océanos (biosfera).

Comparativamente, la atmósfera es como la piel de una manzana

La atmósfera se estructura en capas que se encuentran a diferentes temperaturas y compuestas por distintos gases:

- a) La *troposfera*, entre 0 y 10 km sobre el nivel del mar, dentro de la cual se desarrolla la vida aérea.
- b) La *estratosfera*, hasta 80 km de altura, es un "aire" muy enrarecido, con mucha menor densidad. En ella existe una capa de ozono, **O₃**, de unos 20 km de altura, que resulta esencial para la vida. Esta capa es una especie de "escudo" que protege a la Tierra de radiaciones solares letales, conocidas como rayos ultravioleta.
- c) La *ionosfera*, que se extiende hasta unos 500 km hacia arriba, donde la concentración de materia es aún menor. Recibe su nombre debido a que la radiación ultravioleta y otros fenómenos eléctricos producen la ionización de sus componentes. Por lo tanto, allí existen iones. Estos son los responsables de que las ondas de radio "reboten" hacia la Tierra, lo que hace posible la comunicación radiofónica.

Para efectos de análisis de la contaminación, prestaremos atención a la troposfera y a la capa de ozono (**O₃**) en la estratosfera.

Cerca de la superficie de la Tierra, la composición del aire es la que se presenta en el cuadro V.1.

CUADRO V.1 Composición del aire (seco y limpio) al nivel del mar

<i>Fórmula</i>	<i>% en volumen</i>	<i>ppm</i>
N ₂	78.09	780 900
O ₂	20.94	209 400
Ar	0.93	9 300
CO ₂	0.0318	318
Ne	0.0018	18
He	0.00052	5.2
CH ₄	0.00015	1.5
Kr	0.0001	1
H ₂	0.00005	0.5
N ₂ O	0.000025	0.25
CO	0.00001	0.1
Xe	0.000008	0.08
O ₃	0.000002	0.02
NH ₃	0.000001	0.01
NO ₂	0.0000001	0.001
SO ₂	0.00000002	0.0002

Las concentraciones están dadas en partes por millón = ppm.

ppm= número de moléculas en un millón de moléculas de aire

Si se desea obtener el porcentaje en volumen a partir de ppm, hay que dividir entre 10 000. Entonces, fundamentalmente, el aire consiste de 78% en volumen de N_2 , 21% de O_2 y 1% de argón.

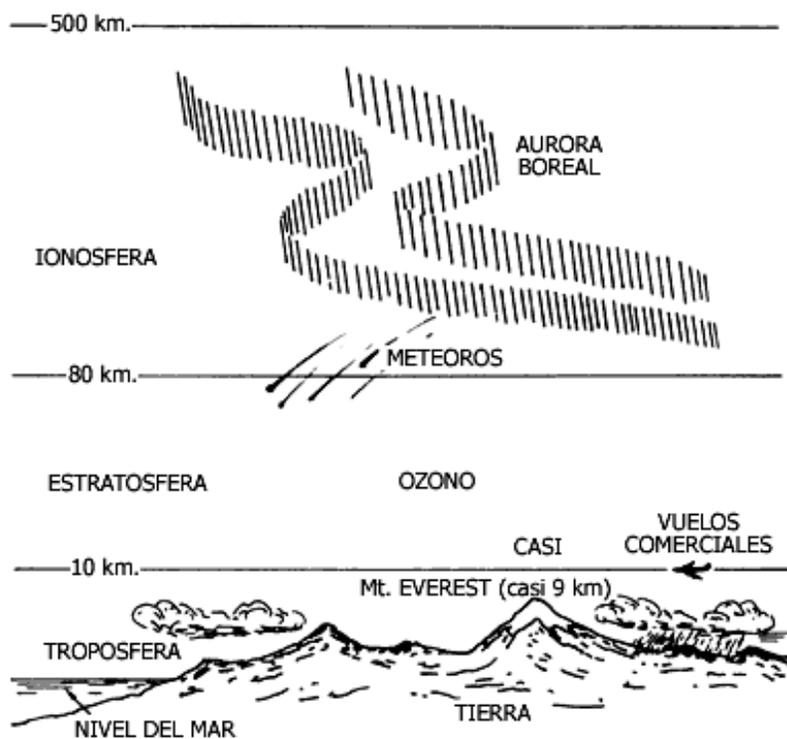


Figura V.3. Principales capas de la atmósfera (no está a escala).

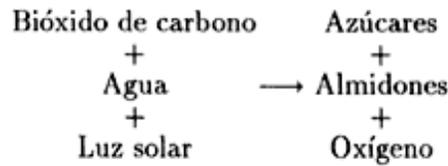
ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA ATMÓSFERA. LA CONTAMINACIÓN

Como ya mencionamos, la atmósfera de hoy ha evolucionado, no es la misma que aquella de la Tierra en formación (véase el capítulo 1).

La primera atmósfera de la Tierra estaba constituida primordialmente por H_2 y He , gases que escaparon a la fuerza gravitacional que consolidó al planeta. Al compactarse la Tierra, se elevó la temperatura interior y se inició una etapa de alta actividad volcánica que liberó hacia la atmósfera H_2O , CO_2 , SO_2 , N_2 , CH_4 y otras moléculas ácidas. Con la presencia del agua se inició la lluvia, la cual "lavó" la atmósfera, que conservó primordialmente

N_2 , H_2 , CH_4 y, en menor proporción, NH_3 y otros gases. Esta es la atmósfera reductora que permitió el arraigo de la vida en la Tierra hace 4 000 millones de años.

El proceso de fotosíntesis, que puede expresarse de la siguiente manera,



generó gran cantidad de oxígeno. Mucho hierro de la corteza se oxidó, formándose los minerales que hoy usamos para extraer el hierro. La creciente presencia de O_2 y su conversión en O_3 hizo posible que la superficie del planeta fuera menos inhóspita. Al proliferar la vida en el mar y en la tierra se formó la actual atmósfera, con una quinta parte de O_2 . Todo lo anterior puede observarse en la figura V.4 y el cuadro V.2.

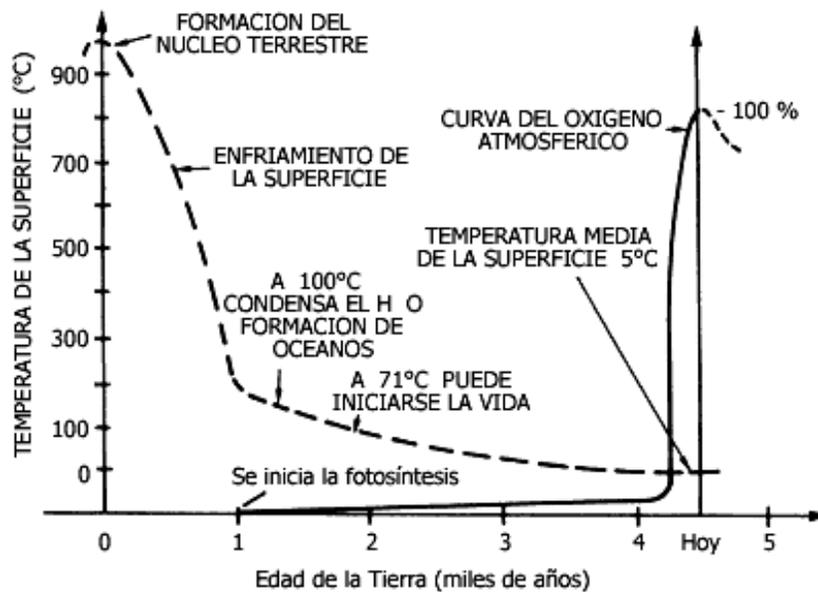


Figura V.4. Temperatura de la superficie terrestre ($^{\circ}C$)

CUADRO V.2 Componentes de la atmósfera

Atmósfera	Formativa	Reductora	En enfriamiento	Boigénica
Componentes mayores	H_2 , He	CH_4 , H_2 N_2	N_2 , CO_2	N_2 , O_2
Componentes menores	Ne, Ar, Kr, Xe	NH_3 , H_2S , H_2O , HCl , CO_2 , HCN	H_2O , CH_4 , CO , Ar, O_2 , SO_2	Ar, CO_2 , H_2O

La contaminación del aire proviene de la adición de sustancias que alteran su composición normal y producen efectos nocivos en las personas, animales y otros sistemas

Entre los fenómenos atmosféricos hay dos que guardan relación con la contaminación: a) la inversión térmica; y b) las reacciones fotoquímicas. Veamos cada uno de ellos.

Inversión térmica

El aire frío es más denso que el caliente. Cuando sobre una ciudad circula una corriente fría, ésta empuja el aire que se encuentra debajo, produciendo un ligero calentamiento por compresión. Por así decirlo, el aire frío atrapa a aquél sobre la ciudad y no permite la salida de los contaminantes generados. Unos pocos días en esta situación bastan para generar una crisis de contaminación.

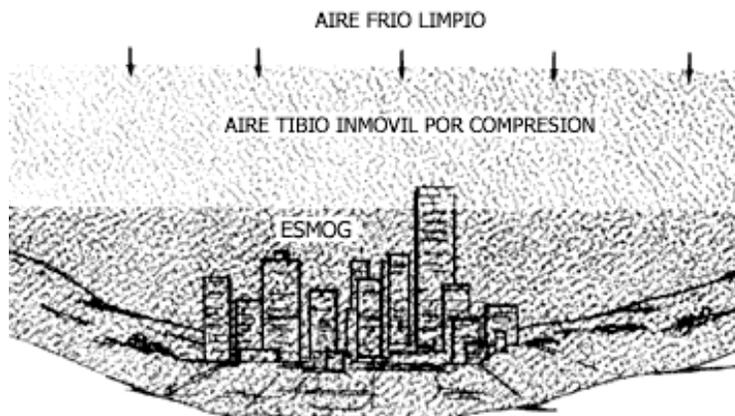


Figura V.5. Aire atrapado en una inversión térmica en un valle.

Nos hemos permitido castellanizar el término "smog", del inglés: *smoke*: humo; *fog*: niebla, como esmog. Este efecto es más peligroso en ciudades asentadas en valles cerrados, como la de México

Veamos por qué se conoce a este efecto como "inversión térmica".

En condiciones normales, la temperatura del aire crece conforme más cerca esté de la superficie. Al penetrar una capa de aire frío, esta tendencia se rompe; aquél se sitúa entre el aire tibio y comprime al que está por debajo. El fenómeno queda claro en la figura V.6.

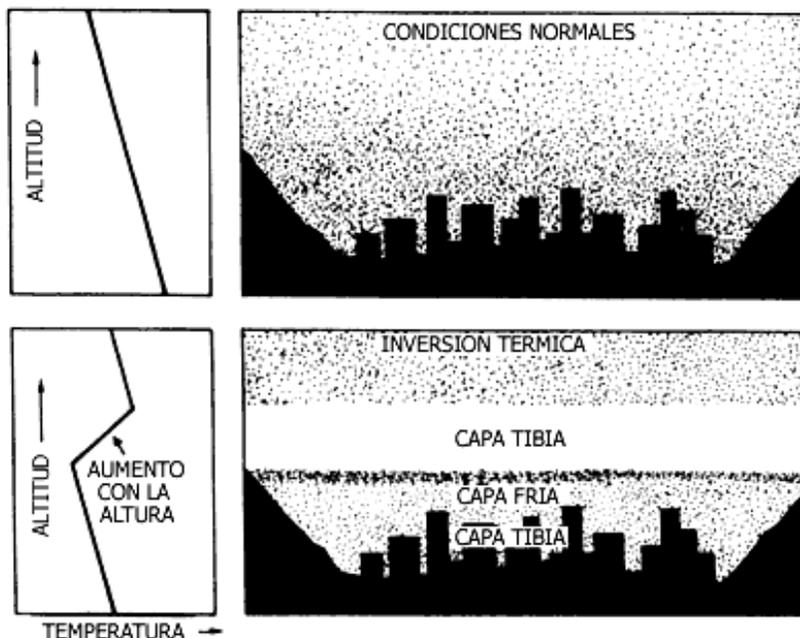


Figura V.6. Perfil de temperatura normal y bajo una inversión.

Como puede observarse, existe una pequeña zona donde la temperatura crece con la altura, una inversión respecto a la normalidad.

En Londres (1952), una inversión térmica de varios días junto con la continua emisión de SO_2 y CO_2 como producto de la combustión del carbón de coque, provocó el venenoso esmog.

Esmog fotoquímico

Existe un cierto tipo de reacciones que tienen lugar gracias a la presencia de la luz: las reacciones fotoquímicas. Un ejemplo es la fotosíntesis, ya mencionada, y otro la reacción que ocurre en las películas fotográficas, cuando el obturador de la cámara se abre durante una fracción de segundo.

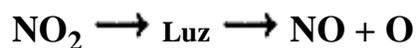
La energía de la radiación luminosa puede ser lo bastante alta como para ionizar un átomo:



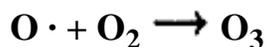
o romper un enlace químico:



En la atmósfera contaminada ocurren multitud de reacciones fotoquímicas, las que forman productos muy irritantes, aun en proporciones de 1 mg/m^3 . Los más peligrosos se forman a partir de óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y la acción de la luz, como los nitratos de peroxiacilo, conocidos como NPA. El proceso de su formación arranca debido a la luz, que rompe un enlace en el NO_2 atmosférico:

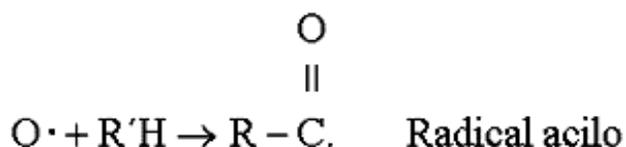


Este átomo de oxígeno liberado es muy reactivo, y forma ozono al chocar con oxígeno molecular:

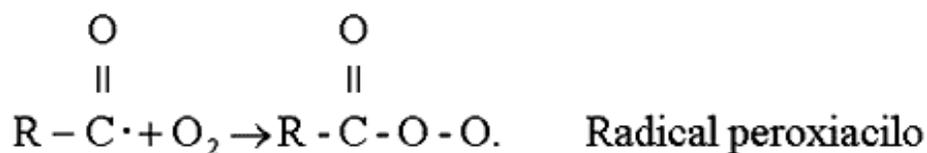


El ozono en la baja atmósfera es también un contaminante irritante

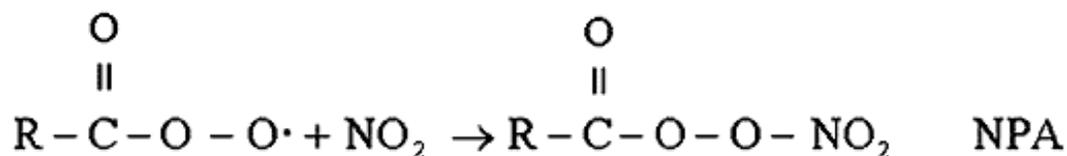
o bien, en presencia de un hidrocarburo (**R'H**) ocurre la reacción:



A su vez un radical acilo es fuertemente reactivo, de tal forma que puede adicionar oxígeno molecular:



Estos radicales peroxiacilo pueden sufrir diversas reacciones en una atmósfera contaminada, pero la más peligrosa es la que produce NPA:



Aun en concentraciones de 0.001 ppm, el NPA produce irritación ocular, alveolar, así como daños en las cosechas

PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL AIRE

Pueden distinguirse dos tipos de contaminantes: los *primarios* y los *secundarios*. Los primarios son los que se emiten como resultado de un proceso (fábrica, motor de combustión, etc.), y los secundarios (como el **NPA**) los que resultan en las reacciones atmosféricas.

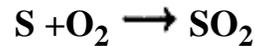
Prestaremos especial atención a los primarios, ya que su eliminación previene la formación de los secundarios. Así, los principales contaminantes atmosféricos son:

1) Óxidos de azufre; 2) óxidos de nitrógeno; 3) óxidos de carbono; 4) hidrocarburos; 5) plomo; 6) ozono; 7) partículas.

A continuación expondremos más detalles de cada uno de ellos y en los cuadros V.3, V.4, V.5 y V.8 presentaremos información relativa a nuestro país.

Óxidos de azufre

Se producen cuando el azufre elemental o sus compuestos se queman en el aire.



Parte del SO_2 proviene de erupciones volcánicas (originalmente como H_2S), así como de la acción de bacterias sobre la materia orgánica.

La otra parte es atribuible al hombre, por las siguientes acciones, entre otras: a) quemar carbón de coque con alto contenido de azufre; b) extraer metales de sulfuros; c) quemar combustibles sin reformar (diesel y combustóleo); y d) fabricar ácido sulfúrico.

Estudios recientes realizados en el D.F., demuestran que el **PH**  de toda el agua de lluvia es menor que 5.5 (valor menor al de una atmósfera limpia), de ahí que debido a la contaminación, en lugar de agua, sobre nuestra ciudad "llueve ácido".

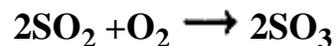
Los medios químicos son los más eficientes para eliminar el SO_2 . Puede quemarse la piedra caliza para obtener óxido de calcio.



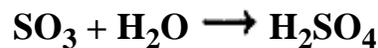
y usarlo para eliminar SO_2 , mediante la reacción:



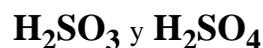
El SO_2 tiene un tiempo corto de residencia en la atmósfera. En presencia de oxígeno y de luz se oxida a SO_3 :



El trióxido también es peligroso, pues reacciona con el agua para dar ácido sulfúrico, sumamente corrosivo,



Con la lluvia, el SO_2 y el SO_3 son "lavados" de la atmósfera y se vierten sobre ríos y mares en forma de ácidos:



Con ello, la acidez aumenta, la vida acuática se daña, se provocan corrosión y deslaves. Con esta "lluvia ácida" se dañan incluso las construcciones, debido a la reacción



CUADRO V.3 La legislación mexicana

Con el propósito de hacer congruentes todas las disposiciones legales que rigen la materia ecológica, el 28 de enero de 1988 se publicó la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. En esta nueva ley, que entró en vigor en 1 de marzo del mismo año, se reconoce que un desarrollo sostenido y ambientalmente sano sólo puede lograrse con la intervención de todos los niveles del gobierno, y que la prevención es el medio más eficaz para preservar el equilibrio de los ecosistemas.

Título primero: Señalar el carácter reglamentario de la ley respecto a las disposiciones constitucionales, se precisa el objeto de la misma, así como sus conceptos fundamentales. Define el sistema de concurrencia entre los tres niveles de gobierno y dispone la descentralización, a las entidades federativas y a los municipios, de las diversas facultades en materia de contaminación, áreas rurales protegidas, ambiental y ordenamiento ecológico, delimitando sus ámbitos de competencia. Precisa las atribuciones de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología y la coordinación de las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal. Establece los principios de la política ecológica, precisa los instrumentos que deberán aplicarse para su ejecución, como son la planeación y regulación de los asentamientos humanos, el ordenamiento y la evolución del impacto ambiental, las normas técnicas y la investigación y educación ecológicas.

Título segundo: Señala las áreas naturales del territorio podrán ser materia de protección, mediante la imposición de limitaciones para su uso y aprovechamiento racionales. Precisa las normas a las que se sujetará su establecimiento, conservación, administración, desarrollo y vigilancia. Prevé que, para su desarrollo, se observe lo dispuesto por otros ordenamientos legales aplicables y se otorgue la participación que corresponda a las dependencias del Ejecutivo Federal y a las comunidades que las habiten. Dentro de las áreas naturales protegidas, considera las que tienen como propósito la preservación de suelos y aguas y asegura que su establecimiento y administración se lleve a cabo conforme a lo dispuesto por las Leyes Forestal y Federal de Aguas.

Título tercero: Comprende las regulaciones sobre el aprovechamiento racional de los elementos naturales, derivadas de los conceptos que define la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Señala los criterios que deberán observarse para el aprovechamiento racional del agua y los ecosistemas acuáticos, así como del suelo y sus recursos. Prevé también los efectos de la exploración y explotación de los recursos naturales no renovables.

Título cuarto: Se refiere a la prevención y el control de la contaminación de la atmósfera, del agua, de los ecosistemas acuáticos del suelo.

Título quinto: Tiene como propósito establecer las bases para que la sociedad participe, de manera permanente, en las acciones ecológicas. Regula, además, las vías de participación previstas en otros títulos de la propia ley, como la consulta en el ámbito del "Sistema Nacional de

Planeación Democrática", la celebración de convenios de concertación y la presentación de opiniones y propuestas en el seno de la Comisión Nacional de Ecología.

Título sexto: Establece las medidas de control, de seguridad y sanciones que se aplicarán para hacer efectivo el cumplimiento de las disposiciones de la Ley.

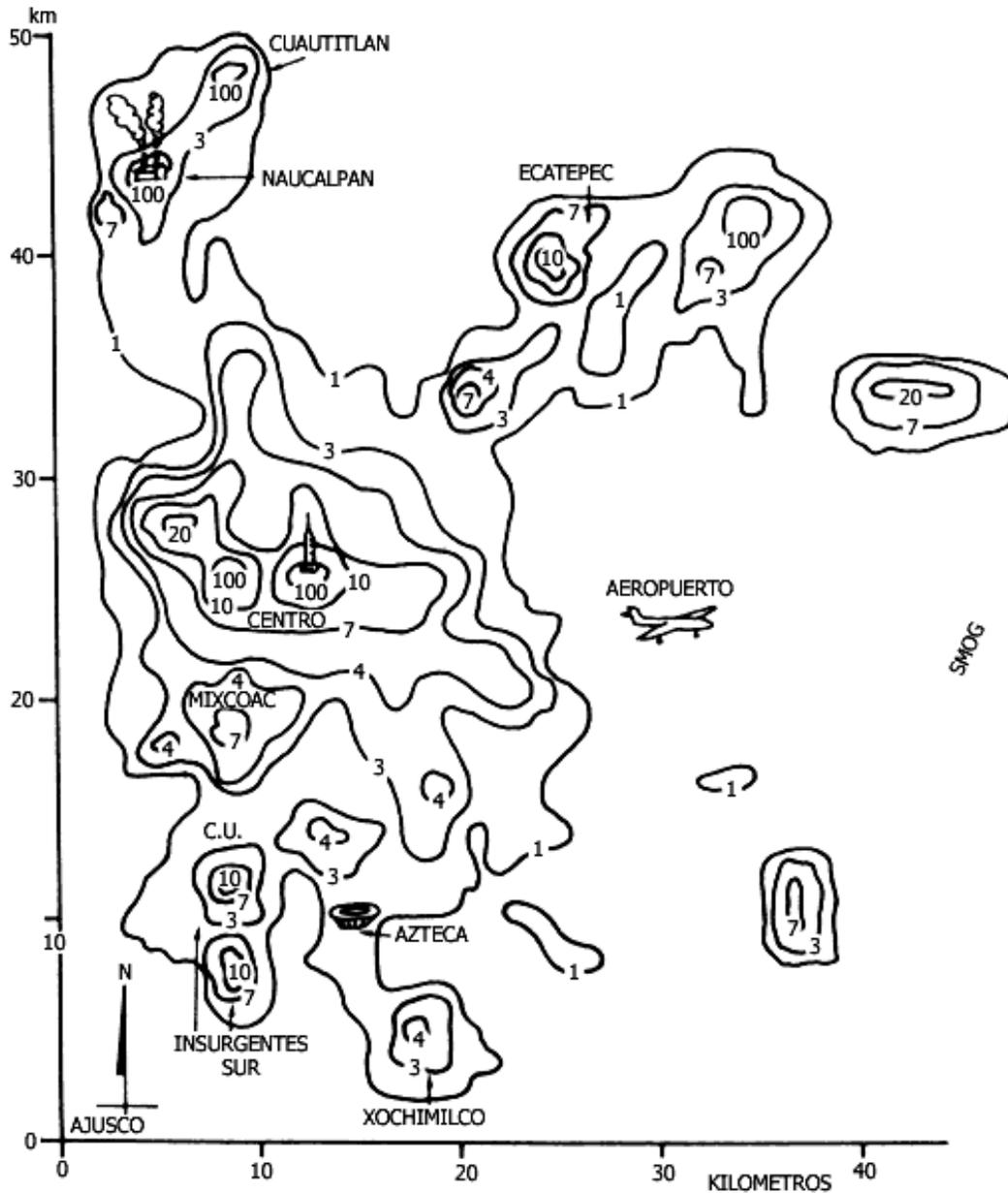


Figura V.7. Niveles de contaminación. Recientemente, las matemáticas han ayudado a simular los niveles contaminantes. Aquí se muestra (sobre la ciudad de México) la cantidad de partes de SO₂ por cada 100 millones en un diagrama de curvas de nivel. Por ejemplo, la línea con el número 100 (alrededor de la Torre

Latinoamericana) marca los lugares donde existen 100 ppm de SO_2 .

Óxidos de N_2

La presencia mayoritaria de N_2 en el aire y la necesidad de este elemento para la síntesis de proteínas en los seres vivos marcan la gran importancia del nitrógeno en la biosfera.

Entre los óxidos de nitrógeno, el NO_2 es el de mayor interés para efectos de la contaminación. Una fuente de NO_2 está constituida por los motores de los vehículos. En la cámara de combustión se alcanzan temperaturas tan elevadas que N_2 y O_2 (del aire) se combinan, dando lugar a varios óxidos de nitrógeno.

Lo interesante por analizar, además de sus posibles efectos nocivos directos, es el papel que desempeñan en el llamado ciclo de nitrógeno. Un desbalance en dicho ciclo puede dar lugar a una catástrofe en la que se haga imposible la vida en la Tierra.

Toda vida animal es posible gracias a la vida vegetal. De las plantas tomamos las proteínas con las que animales y humanos fabricamos las propias. Pero ¿de dónde obtienen su nitrógeno las plantas?

Las proteínas contienen nitrógeno

El N_2 atmosférico no puede ser empleado por la mayor parte de los vegetales para fabricar proteínas, pues es una molécula muy estable. *Las plantas sólo pueden tomar el nitrógeno de varios compuestos, existentes en el suelo, pero no del N_2 del aire.*

Gracias a pequeñísimas bacterias y algas que pueden transformar el N_2 en otros compuestos (bacterias y algas fijadoras de nitrógeno) resulta posible la existencia de la vida vegetal y, por ende, la vida animal y humana.

La fabricación artificial de fertilizantes nitrogenados hace posible que el hombre nitrifique el suelo y lo cultive sin depender de bacterias y de algas.

En la figura V.8 se presenta un diagrama del ciclo del nitrógeno en la biosfera.

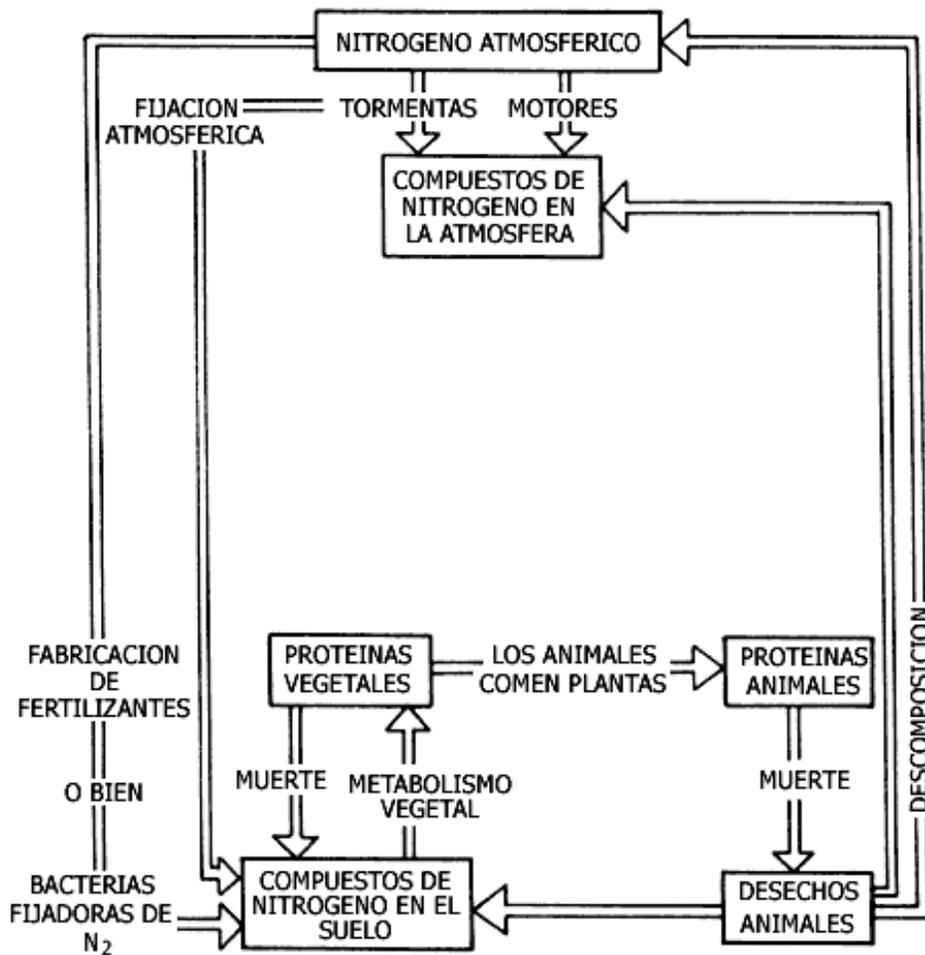
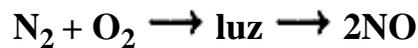
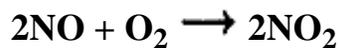


Figura V.8. Ciclo del nitrógeno en la biosfera.

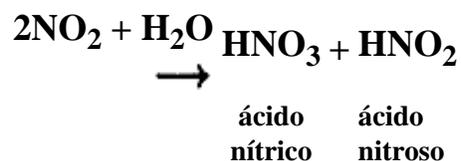
Una vez revisado el ciclo, veamos cómo llegan a la atmósfera los óxidos de nitrógeno. En cualquier proceso de combustión en el aire (o en tormentas eléctricas) se forma cierta cantidad de NO:



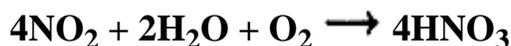
A éste no se le considera peligroso para la salud, pero reacciona rápidamente con el oxígeno del aire, produciéndose NO_2 , un gas de color café, sofocante, con toxicidad directa en los pulmones:



El NO_2 reacciona con el vapor de agua:

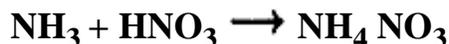


y con el oxígeno y el agua de la atmósfera:



dando un carácter ácido al aire atmosférico, el que pasa al suelo al llover.

Estos ácidos pueden reaccionar ahora con amoníaco, produciendo partículas de nitrato de amonio:



Los ácidos y las sales del nitrógeno forman peligrosos aerosoles, que pueden ser "limpiados" por la lluvia y llevados al suelo. Una vez allí, participan en el ciclo de N_2 , nitrificando los vegetales. Desde este punto de vista, es útil su formación, pero como el NO_2 permanece en la atmósfera durante un promedio de tres días, en este tiempo puede causar graves intoxicaciones si se acumula en proporciones peligrosas.

CUADRO V.4 La contaminación en la ciudad de México

Para el año 1987 se estimó que la emisión de contaminantes fue de 4.9 millones de toneladas distribuidos de la siguiente manera

<i>Contaminantes</i>	<i>Fuentes fijas 13%</i> (Toneladas)	<i>Fuentes móviles 82%</i> (Toneladas)	<i>Fuentes naturales 5%</i> (Toneladas)	<i>Emisión total</i> (Toneladas)
Partículas	128 000	41 241	251 000	420 421
SO ₂	236 000	7 291		243 291
Hidrocarburos	137 500	309 890		447 390
CO	53 000	3 573 427		3 626 427
NO _x	68 000	111 324		179 324
TOTAL	622 500	4 043 173	251 000	4 916 673

donde por fuentes fijas se identifica principalmente a las industrias (como la refinería de Atzacapotzalco, las termoeléctricas, y las de papel, siderúrgicas y de productos químicos), móviles a los vehículos y naturales a los incendios, volcanes, etcétera.

Siguiendo las recomendaciones internacionales en México se ha implementado el Índice Metropolitano la Calidad de Aire (IMECA, Diario Oficial, 29 de noviembre de 1982, cuadro V.5, un parámetro que identifica los niveles de concentración de los diversos contaminantes promediados de diversos lapsos (de 1 a 24 horas) y que posee las siguientes características:

- a) Transforma las unidades científicas de concentración de cada contaminante separado en un número entero adimensional (de 0 a 500) para que sea (o así al menos se quiere) de fácil comprensión para el público.
- b) Relaciona los valores de la concentración de contaminantes con los efectos a la salud.

c) Relaciona los valores de la concentración de contaminantes con el "Programa de Contingencias por Episodios de Contaminación del aire" elaborado por la SEDUE.

El IMECA no cumple sin embargo algunos de los objetivos para los cuales fue creado ya que:

a) El valor que reporta no permite comparar la magnitud de los contaminantes con las normas de calidad del aire internacionales.

b) Generalmente se informa el valor del contaminante más alto sin indicar el de los otros contaminantes que también en ocasiones pueden estar en concentraciones peligrosas.

Los niveles de contaminación son muy altos en nuestro país, particularmente en la ciudad de México, no sólo en lo que respecta al aire sino también al agua y suelo, además del ruido (la Organización Mundial de la Salud considera que el límite máximo aceptable para el ser humano es de 85 decibelios, límite que fue sobrepasado desde 1975; en algunas zonas de la ciudad actualmente se encuentran en niveles hasta de 120 decibelios).

Sólo alrededor de 30% de las industrias instaladas en el valle de México, cuentan con un equipo anticontaminante y en muchas ocasiones éste es insuficiente e inoperante. El 94% de la producción pecuaria del D.F. se realiza en zonas densamente pobladas, lo que convierte a la ciudad en un enorme establo. Alrededor de tres millones de capitalinos practican el fecalismo al aire libre; según el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, estos desechos producen la proliferación de 50 a 120 colonias patógenas por metro cúbico de aire. En la vía pública se depositan diariamente 2 500 toneladas de basura y otras 7 500 se llevan a basureros a cielo abierto, verdaderos criaderos de ratas y focos de infección (La Secretaría de Salubridad y Asistencia afirma que hay 78 millones de ratas en el área urbana de la ciudad de México, o sea 4 por cada capitalino).

Como resultado de las carencias de vegetación (en la ciudad de México el promedio de áreas verdes por habitante es, de acuerdo con el DDF, de $3.94 \text{ m}^2 / \text{p}$, cuando la norma internacional establece $9^2 / \text{p}$) y la erosión de la tierra (tolvaneras) en la zona urbana y suburbana levante anualmente más de 300 000 toneladas de polvo.

De continuar las tendencias actuales y de no tomar entre todas las medidas más enérgicas contra la contaminación, dentro de poco tiempo nos encontraremos frente a un verdadero desastre ecológico.

CUADRO V.5 Índice metropolitano de la calidad del aire (IMECA). Nivel aproximado de contaminantes

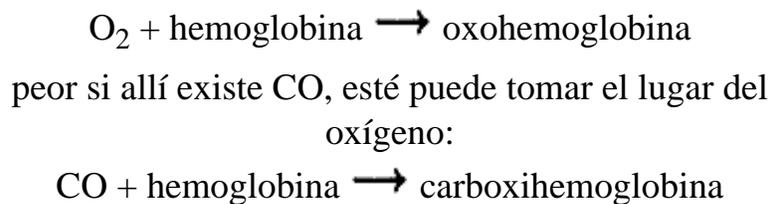
Nivel aproximado de contaminantes (ppm)

IMECA	Partículas	SO ₂	CO	O ₃	NO ₂	Efecto en la salud (PSI)	Medidas a tomar por niveles desfavorables de dispersión (SEDUE)
	24 h mg/m ³	24 h	8 h	1 h	1 h		
100	275	0.18	13	0.1	0.2	Insalubre	Sintomas de irritación en las personas sanas Vigilancia las 24 h del día de los niveles de contaminación
200	420	0.35	21	0.21	0.7	Muy insalubre	Disminución de la tolerancia al ejercicio físico Implantar el primer nivel de reducción de emisiones de fuentes industriales (promedio 30%)
300	600	0.56	31	0.35	1.15	P	Aumento prematuro de reducción de emisiones de fuentes industriales (promedio 50%)
400	790	0.78	41	0.45	1.6	L	varias enfermedades
500	950	1	50	0.6	2	G	Muerte prematura de enfermos ancianos Implantar el tercer nivel de reducción de emisiones de fuentes industriales (promedio 70%)

Óxidos de carbono

El más nocivo es, sin duda, el monóxido, **CO**. Es un veneno letal, pues interfiere en el transporte del oxígeno a las células del organismo.

La hemoglobina de la sangre toma el oxígeno del aire alveolar:



Lo grave es que la carboxihemoglobina es 140 veces más estable que la oxihemoglobina, así que las moléculas de hemoglobina que se combinan con **CO** quedan inútiles para el transporte de oxígeno, pues ese monóxido de carbono bloquea la entrada de **O₂**. Conforme las moléculas de hemoglobina son inhabilitadas por el **CO**, no les es

posible transportar O_2 a las células y sobreviene la muerte por asfixia.

El CO es incoloro e inodoro pero venenoso

Una concentración de 30 ppm de CO durante 8 horas basta para provocar fuerte dolor de cabeza y náuseas (Cuadro V.6).

CUADRO V.6 Efecto del CO (%)

<i>Concentración de CO en el aire</i>	<i>100 ppm</i>	<i>200 ppm</i>	<i>1 000 ppm</i>	<i>10 000 ppm</i>
% de moléculas de hemoglobina bloqueadas	17	20	60	90
			con la aspiración prolongada sobreviene la muerte	

Es normal que en las grandes ciudades se tengan niveles prolongados de 30 ppm o más en las calles transitadas, pues una fuente de CO es la combustión realizada en los automóviles.

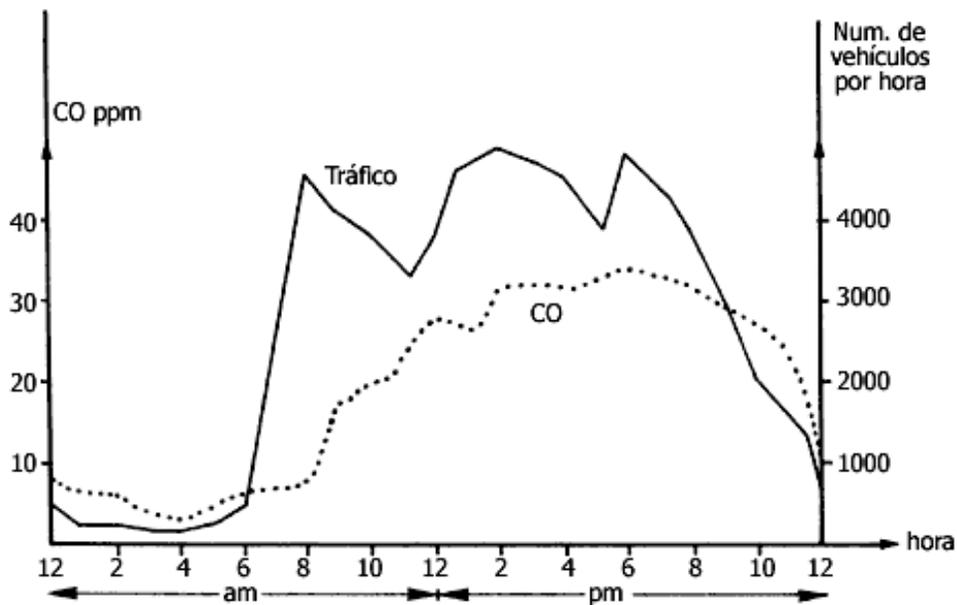


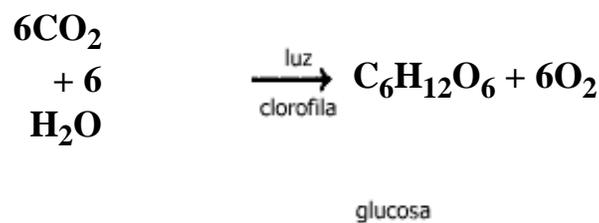
Figura V.9. Definitivamente, hay relación entre el CO atmosférico y el tránsito de vehículos.

Cuando los autos no tienen ningún control para reducir la emisión de **CO**, por cada 100 litros de gasolina quemada se generan unos 30 gramos de monóxido de carbono.

En 1982 ocurrió una intoxicación masiva notable en la ciudad de México, cuando cientos de coches querían salir al mismo tiempo de un estacionamiento subterráneo. La emisión de **CO** y la lentitud del sistema de cobro propiciaron lo que pudo convertirse en una catástrofe, de no ser porque el cobrador resolvió dejar salir a los vehículos sin pagar.

El otro óxido de carbono, el **CO₂**, es el contaminante en mayor proporción en la atmósfera. Sus efectos no son tan graves como los del monóxido, y como la propia naturaleza logra eliminarlo eficazmente, no causa ningún problema agudo de contaminación.

Los vegetales controlan el nivel de **CO₂** en la atmósfera al emplearlo para sintetizar carbohidratos:



Si el proceso de fotosíntesis se detuviera, bastarían 2 000 años para que desapareciera todo el oxígeno de la atmósfera.

Recientemente ha preocupado el hecho de que la cantidad de **CO₂** en la atmósfera parece ir en aumento, como se observa en la cuadro V.7.

CUADRO V.7 Aumento de la cantidad de CO₂ en la atmósfera

<i>Año</i>	CO ₂
1900	296 ppm
1980	320 ppm

La razón de ello es que el **CO₂** absorbe fácilmente la radiación calorífica que la Tierra emite debido a la entrada de los rayos solares a su superficie. A este fenómeno se le conoce como "efecto de invernadero", pues el vidrio o plástico de un invernadero cumple la función de no permitir la salida del calor, con lo que se logra que aun en lugares fríos puedan cultivarse plantas tropicales.

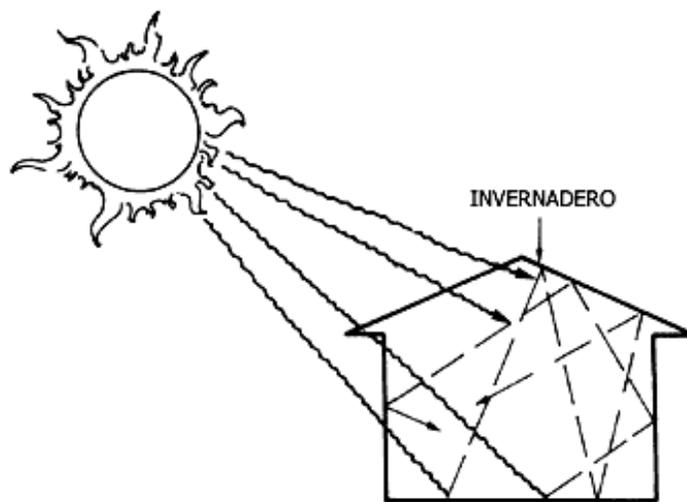
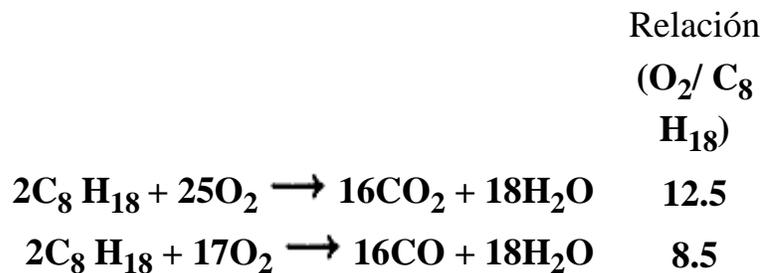


Figura V.10. Efecto de invernadero

Así, se teme que si sigue creciendo el nivel de CO_2 atmosférico, el calor empiece a acumularse en la Tierra, y que la temperatura del planeta aumente hasta hacerlo inhabitable, derritiéndose antes los casquetes polares y aumentando la altura del nivel del mar en varios metros.

El transporte, una de las mayores fuentes de óxidos de carbono

Las reacciones de formación de CO y CO_2 a partir de gasolina (octanos), junto con sus cocientes volumétricos de oxígeno a combustible, son:



Así, cuando la gasolina se quema con poco aire, tiene lugar preferentemente la segunda reacción, mientras que si existe exceso de aire se produce la primera. De esta forma, es recomendable que el pistón reciba más de 12.5 moléculas de O_2 por cada molécula de gasolina. Así, es mínimo el CO producido.

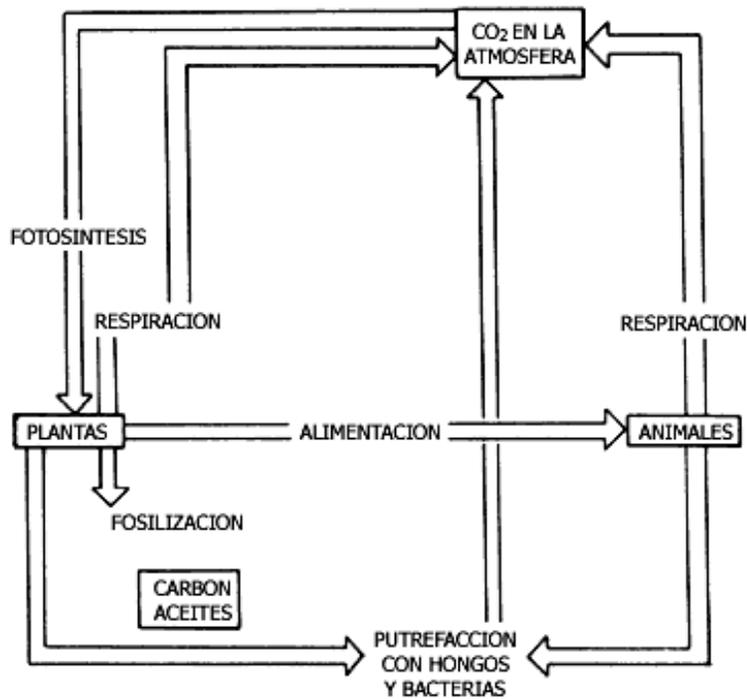


Figura V.11. Ciclo del carbono. El CO₂ atmosférico se elimina en el proceso de fotosíntesis de las plantas. Por ello es indispensable dejar intactas grandes áreas arboladas en las ciudades.

Los coches, camiones y aviones cuentan, desde hace pocos años, con mecanismos para reducir la emisión de contaminantes. Estos son, entre otros:

- Carburador rediseñado
- Convertidor $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$
- Reductor de emisiones de óxidos de nitrógeno
- Bomba de inyección de aire
- Motor que funciona con gasolina sin plomo

La altura de la ciudad de México sobre el nivel del mar (2 240 m) origina que la cantidad de oxígeno por cada metro cúbico de aire se reduzca de 275 g a 212 g. Los motores de los autos están diseñados para operar al nivel del mar y la reducción del oxígeno atmosférico afecta su funcionamiento y los hace más contaminantes.

Se estima que la contaminación producida por los 2.5 millones de automóviles en la ciudad es equivalente a la que producirían 6.3 millones de vehículos al nivel del mar. De ahí la importancia de acciones, aunque aisladas, como la de "hoy no circula".

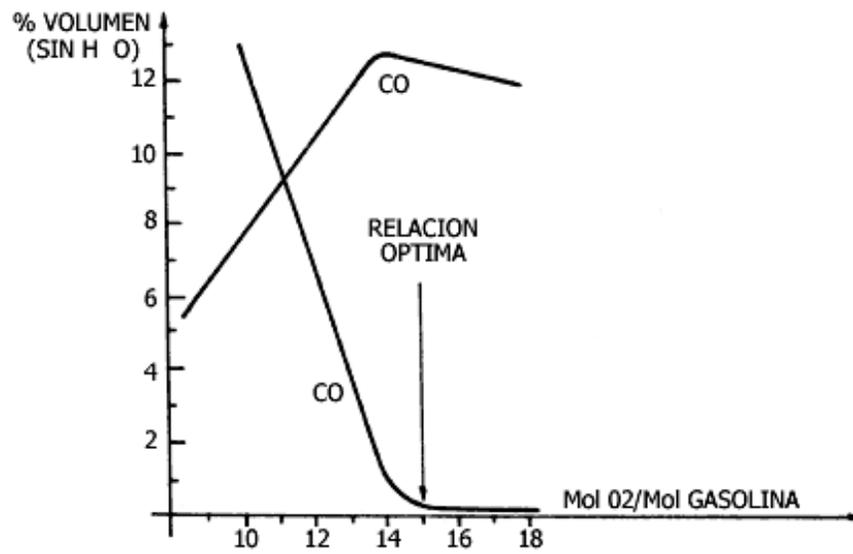


Figura V.12. Contaminantes producidos por la gasolina

Hidrocarburos

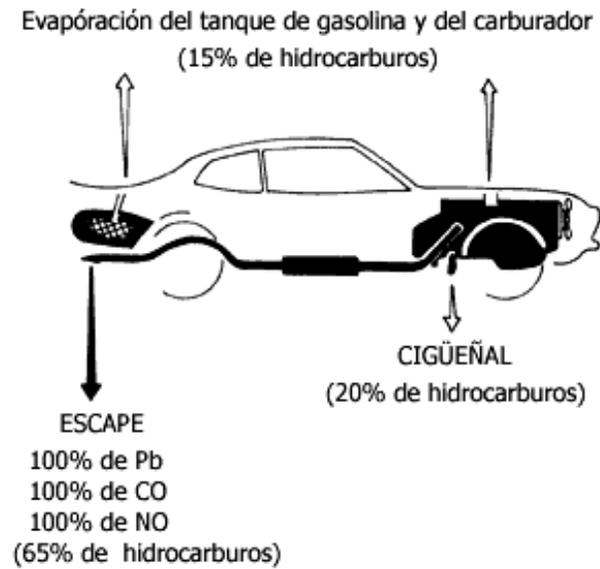
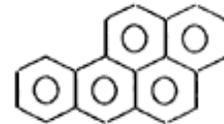


Figura V.13. Fuentes de emisión de contaminantes de un automóvil.



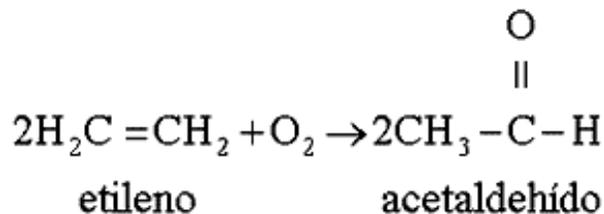
**Este hidrocarburo,
con cinco anillos,
llamado benzopireno,
es cancerígeno**

Ya se mencionó que la presencia de hidrocarburos en el aire conlleva la formación de peligrosos contaminantes secundarios, como el NPA.

En las ciudades, la mayor fuente de hidrocarburos proviene de la evaporación de la gasolina. Varios hidrocarburos aromáticos son cancerígenos (su inhalación provoca muerte por cáncer a los ratones de laboratorio).

**La gasolina se escapa de cuatro partes del
coche: carburador, escape, cárter y tanque.
La mitad de los hidrocarburos se escapan
debido a la mala afinación**

Los hidrocarburos no saturados, como el etileno, intervienen en las reacciones fotoquímicas que crean el esmog, ya que producen aldehídos:



Plomo

Su presencia en la atmósfera se debe a la adición de tetraetilo de plomo en las gasolinas (para elevar su octanaje). Dentro del pistón, debido a la alta temperatura, se forma el óxido de plomo, **PbO₂**. Como éste es un sólido no volátil, que daña las bujías, a la gasolina también se le adicionan algunos hidrocarburos dorados, para que se forme **PbCl₂**, que sí es volátil, y salga del pistón, hacia la atmósfera.

El plomo y sus sales son tóxicos para el organismo y llegan a afectar el sistema nervioso central. Afortunadamente, el cuerpo humano logra deshacerse de unos **230 µg** de plomo cada día, pero si la cantidad que entra es mayor, se acumula y provoca intoxicación.

Pb: puede entrar en el organismo a través de la piel

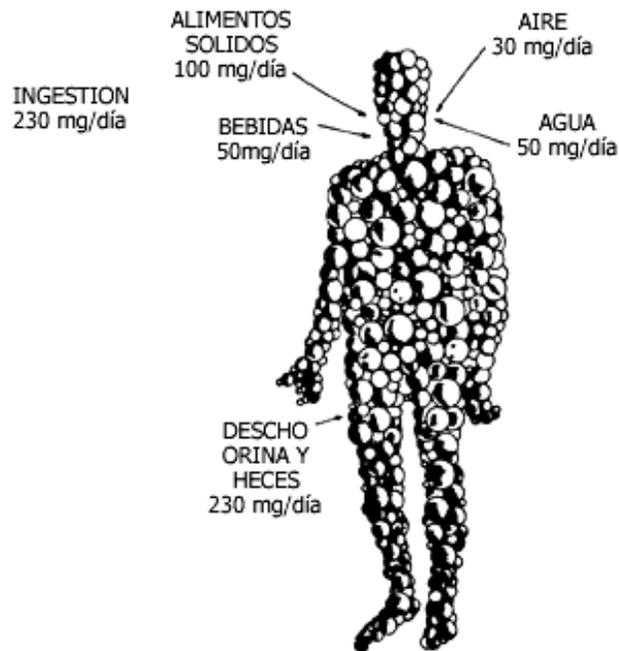


Figura V.14. Ingestión y desecho de Pb en un ser humano.

Ozono

El ozono, O_3 , es el gas picante e irritante que a menudo se percibe cerca de los motores eléctricos. Ya mencionamos que se forma en la atmósfera baja debido a reacciones fotoquímicas, de manera que es un contaminante secundario.

Sin embargo, como parte de la estratosfera, nos es indispensable para detener los rayos ultravioletas que provienen del Sol.

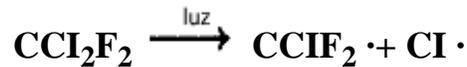
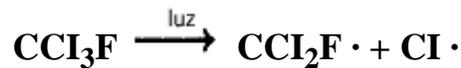
El ozono es un escudo protector de la vida

Recientemente se ha descubierto que ciertos compuestos producidos por el hombre llegan a la estratosfera y pueden destruir el ozono. Se trata de los cloro fluorocarbonos, también conocidos como freones:

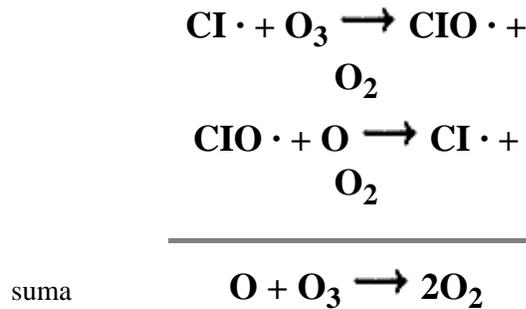
$CCl_2 F_2$
freón 12

$CCl_3 F$
freón 11

los cuales se han venido usando como líquidos refrigerantes e impulsores en latas de aerosoles. Como son muy volátiles e inertes, permanecen entre 10 y 30 000 años en la atmósfera, por lo que llegan a difundirse hasta la estratosfera, donde se localiza la capa de ozono. Allí reaccionan fotoquímicamente y producen átomos de cloro:



Ese cloro estratosférico destruye el ozono:



Se ha estimado que si el ozono estratosférico se redujera en 1%, habría 2% más casos de cáncer en la piel, debido a la mayor cantidad de rayos ultravioleta que llegarían a la superficie de la Tierra.

Desde fines de los años setenta, se detecta cada año, durante los meses de septiembre y octubre, una disminución drástica de la concentración de ozono estratosférico sobre la Antártida, a la que se denomina desde entonces el "hoyo de ozono".

De acuerdo con la interpretación más aceptada, en el invierno del hemisferio sur se forma un cinturón de vientos en la estratosfera, a 66 grados latitud sur. Al llegar la primavera, ese vórtice aísla el aire sobre el Polo Sur y evita la entrada del más cálido proveniente de las latitudes medias. La temperatura reducida permite la activación de los productos químicos clorofluorados que destruyen el ozono.

El hallazgo reciente (*Nature*, 16 de noviembre de 1989) es que existe también un anillo de bajo ozono alrededor del hoyo antártico, según indican los resultados de diversos vuelos de medición realizados desde la base de Punta Arenas, Chile.

Si el estudio posterior verifica tal pérdida de ozono alrededor del hoyo, los científicos habrán de estudiar sus causas y mecanismos. Recordemos que la vida en la Tierra pudo originarse y podrá persistir gracias a esta capa estratosférica protectora.

Partículas

Para finalizar, revisaremos brevemente la contaminación de polvos suspendidos.

Cuando una partícula pequeña (o, en general, cualquier otro cuerpo sólido) cae en el aire, inicialmente se acelera, pero en virtud de una fuerza de resistencia alcanza después una velocidad constante, llamada velocidad terminal.

En el vacío todos los cuerpos caen acelerados, pero esto no sucede cuando caen en el aire

Cuanto más pequeña es la partícula, su velocidad terminal es menor. Por ejemplo, una que tuviera radio de $1\ \mu\text{m}$ necesitaría dos horas y media para caer 30 cm (en aire inmóvil). En pocas palabras, estos polvos finos se encuentran suspendidos en el aire, forman parte de él, y esa mezcla aire-partículas es un aerosol.

Al respirar, muchas partículas entran por nuestros orificios nasales. Sin embargo, podemos sobrevivir gracias a un eficaz mecanismo eliminador en nuestro sistema respiratorio. La mayor porción de las partículas es detenida antes de llegar a los alveolos. No obstante, las que tienen diámetros menores que $5\ \mu\text{m}$ pueden llegar hasta el espacio alveolar y depositarse. Allí existen células "limpiadoras" que se mueven para englobar el polvo extraño y transportarlo hasta los ganglios linfáticos. La partícula puede disolverse en los líquidos celulares y distribuirse por el organismo, pero si no es soluble permanece en el pulmón o en el sistema linfático, produce inflamaciones y, cuando se acumulan, llegan a provocar dificultades respiratorias y cardíacas.

En especial, las partículas que contienen sílice o metales son las más peligrosas.

Así, lo importante para evitar la contaminación por polvos es no enviar a la atmósfera las partículas con diámetros pequeños (menores de $7\ \mu\text{m}$).

Para detectar la fuente de polvos en una fábrica se aprovecha el efecto de Tyndall, para lo que se usa una luz intensa portátil sobre un fondo oscuro. Una vez localizada la emanación de polvos, puede usarse (entre otros) algunos de los equipos que se describen en las figuras V.15, V.16 y V.17.

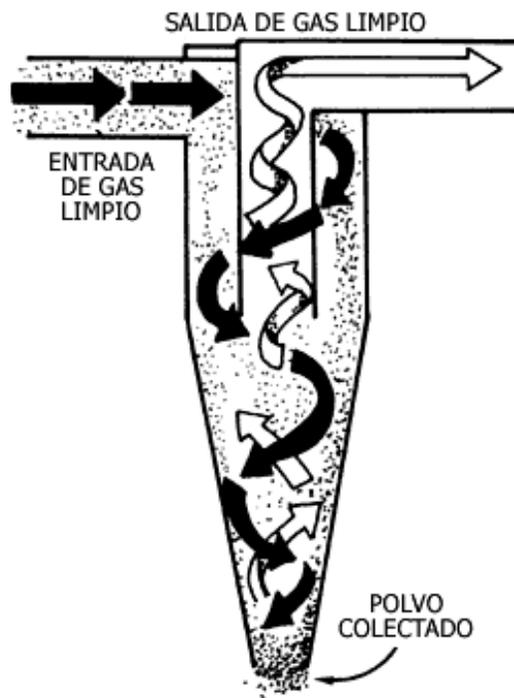


Figura V.15. Ciclón. La trayectoria espiral envía a las partículas a los lados, de donde caen.

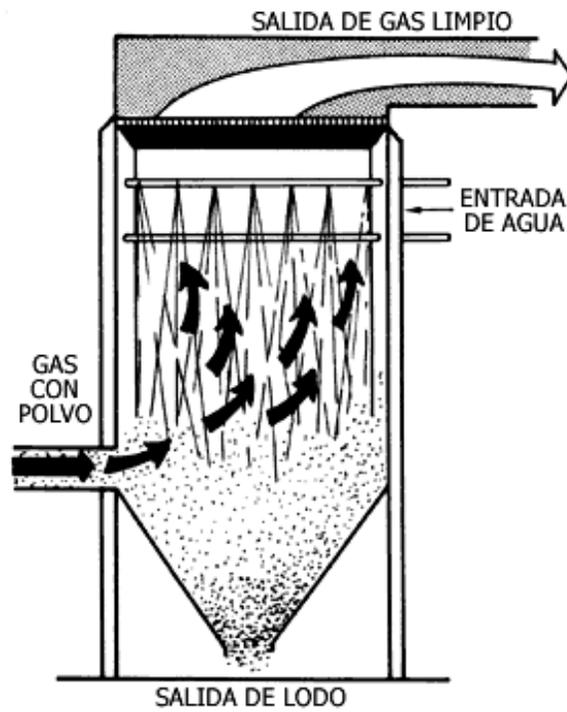


Figura V.16. *Colector húmedo*. El agua se atomiza en una regadera que absorbe impurezas.

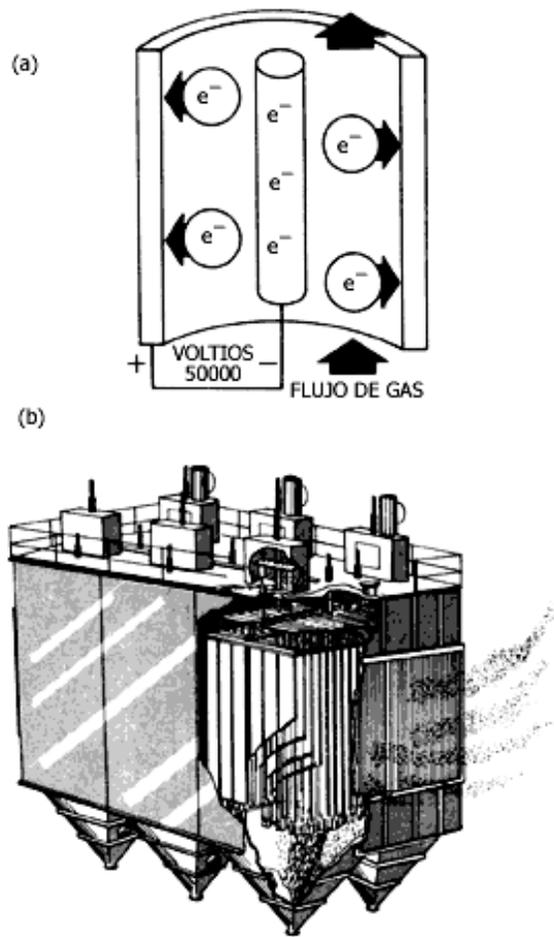


Figura V.17. Precipitador electrostático. Las partículas sólidas adquieren carga eléctrica y "se pegan" a la pared.

Creemos oportuno concluir este capítulo con tres pasajes tomados del libro de Ortiz Monasterio. Esperamos que hagan reflexionar al lector.

- Si alcanzamos el imperioso equilibrio armónico entre nosotros mismos y el medio ambiente, se vislumbran años en que, utilizando la actual tecnología, podrán ser satisfechas las necesidades de: comida, habitación, empleo, educación, arte y permanente recreación en un medio natural.

Si mantenemos nuestro actual comportamiento habremos estimulado el desequilibrio y la aterradora destrucción de la humanidad.

- En este mundo de extremas contradicciones te pido que te detengas, que reflexiones, que no te confunda la ilusión del progreso ni que te arrolle la masa.

- Nuestros problemas, entre ellos el de la contaminación ambiental, tienen solución, pero pronto no la tendrán.

Una vez concluido el ejemplo atmosférico, termina también esta segunda parte y, con ella, este intento de divulgación de la química terrestre.

Al lector valiente que haya llegado hasta aquí, además de agradecerle su paciencia, le deseamos que se lleve un corolario con dos ideas centrales:

1) Muy recientemente se han desarrollado nuevas teorías y nuevo conocimiento sobre el origen de la materia que puebla nuestro Universo, Sistema Solar, Tierra y país. Como la ciencia es una búsqueda interminable, aún no sabemos todas las respuestas. Es más, en México se ha hecho muy poco por estudiar el entorno que nos es propio. Estamos ante un asunto donde queda casi todo por hacer. ¡Tú, lector, puedes ser parte activa de este proceso de conocimiento!, cuyo objetivo es tomar mejores decisiones, por el bien de todos.

2) Si hemos y habremos de habitar este planeta, es indispensable conocerlo mejor, para convivir mejor con él y en él. La química nos ayuda a hacerlo y es nuestra aliada para este propósito. No es simplemente algo que nos fuerzan a estudiar en la escuela. Es parte de la cultura imprescindible de todo ciudadano. De otra manera, siempre serán otros los que tomen las decisiones por nosotros.

CUADRO V. 8 Acciones ecológicas en el Distrito Federal

A continuación indicamos algunas de las acciones emprendidas por el gobierno en el Distrito Federal (Informe General de Ecología, noviembre de 1988) en los últimos años:

"Se cuenta que con una unidad de Protección y restauración ecológica en Xochimilco. La red automática de monitoreo atmosférico en el Valle de México. Se cuenta con una unidad móvil de evaluaciones de ruido y vibraciones y un laboratorio de análisis de la calidad del agua. Se equipó y se dotó de infraestructura básica al parque Los Coyotes. Se implantó un programa obligatorio de verificación de automóviles para los modelos 1977-1982. Se concertó la introducción de nuevas gaolinas, diesel y combustóleo y se suministra gas natural a las termoeléctricas del Valle de México.

Se cuenta con un programa de emergencia para episodios críticos de contaminación atmosférica y se han modificado los horarios escolares en época invernal. El DDF incrementó el transporte eléctrico no contaminante en 161.3 km. Se construyeron 7 grandes rellenos sanitarios, y la cobertura del control de la basura actual es de 90%. Se plantaron más de 30 millones de árboles en el Valle de México y se realizaron importantes acciones de reatauración ecológica en la zona sur oriente del D.F. para recargar el acuífero. Se cuenta con un centro de decomisos en el parque ecológico Los Coyotes en Coyoacán. Por parte de PEMEX se han realizado, en la Refinería de Atzacapotzalco, una planta de tratamiento de aguas amargas para eliminar compuestos de azufre y la ampliación del sistema de tratamiento de aguas residuales que se encuentran en ejecución. Se iniciaron proyectos de reproducción en cautiverio del lobo mexicano y otras especies en riesgo de extinción. Se creó la red de criaderos de fauna silvestre."

Estas acciones, junto con la declaración emitida por nuestro país en acuerdo con otras naciones de América Latina y el Caribe (México, mayo de 1987), de la cual transcribimos una parte, indican que la gravedad del asunto exige la participación de todos nosotros.

"Para preservar el ambiente es de particular interés cambiar los mecanismos actuales de transferencia de tecnología. Nuestras naciones han recibido, salvo algunas excepciones, tecnología obsoleta; tecnología que los países desarrollados habían desechado por sus efectos nocivos negativos en el ambiente. La búsqueda de mejores condiciones en la transferencia de tecnología es un elemento fundamental en la lucha por la

independencia y soberanía de la región, así como por la supresión de todos los vestigios del colonialismo".

BIBLIOGRAFÍA

"Acuerdo que establece los lineamientos para determinar el criterio que servirá de base para evaluar la calidad del aire en un determinado momento", Secretaría de Salubridad y Asistencia, *Diario Oficial*, México, 29 de noviembre de 1982.

Bermúdez, G., "Patología urbana y enfermedades del campo", *Información Científica y Tecnológica*, 15 (abril de 1983).

Brill, W. J., "Fijación biológica del nitrógeno atmosférico", *Ciencia y Desarrollo* **17**, 30 (noviembre-diciembre de 1977).

"Control de polvos tóxicos en la industria", *Investigación Científica y Tecnológica*, **25** (15 de marzo de 1981).

Chávez, E. A., "La crisis ambiental en México", *Ciencia y Desarrollo* **27**, 30 (julio-agosto de 1979).

Ecología. 100 acciones necesarias, Comisión Nacional de Ecología, México, 1987.

Gay, C., *La atmósfera que nos rodea. Nuestro hogar en el espacio*, colección "La ciencia desde México", 66, FCE, México, 1988.

Informe general de ecología, Comisión Nacional de Ecología, México, noviembre de 1988.

Legorreta, J., y M. A. Flores, "Crónica de un desastre anunciado", *Siempre*, 47 (12 de febrero de 1986).

"Ley federal de protección al ambiente", *Diario Oficial*, México, 11 de enero de 1982.

Lizárraga, J. A., "La destrucción de la capa de ozono", *Ciencia y Desarrollo* **25**, 123 (marzo-abril de 1979).

Madras, M., *et al.*, *Química. Curso preuniversitario*, McGraw Hill, México, 1980, p. 85.

Organización Mundial de la Salud, *Contaminación de la atmósfera*, OMS, Ginebra, 1962.

Ortiz Monasterio, F., *Introducción al estudio de la contaminación en la nave espacial Tierra*, Kaleidoscopio, México, 1973.

Páramo, V. H., *et al.*, "Acidez de las precipitaciones en el D.F.", *Ciencia y Desarrollo* **72**, 59 (enero-febrero de 1987).

Scientific American, "La biosfera", Alianza Editorial, Madrid, 1980.

Velasco, L. A., *et al.*, "Sistema automático de adquisición de datos meteorológicos", *Comunicaciones Técnicas del IIMAS*, UNAM, 1981.

Velasco, L. A., "La contaminación atmosférica en la ciudad de México", *Ciencia y Desarrollo* **52**, 59 (septiembre-octubre de 1985).

Início



[Nota 7] 

Se acostumbra colocar un (.) sobre los átomos que poseen un electrón solitario, no enlazado.

Inicio |

[Nota 8] 

El pH es una escala para medir la acidez (pH de 0 a 7) o basicidad (pH entre 7 y 14) de una solución.

Inicio |

COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de octubre de 1995, en Impresora y Encuadernadora Progreso, S.A. de C. V. (IEPSA), Calz. de San Lorenzo, 244; 09830 México, D.F. Se tiraron 3000 ejemplares.

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



CONTRAPORTADA

En última definición la Tierra, nuestro planeta, no constituye sino un enorme conjunto de mezclas de sustancias químicas. Además, se halla incluida en un Universo formado de materia, un Universo químico. Así, para iniciarnos en sus secretos es necesario un acercamiento a la química nuclear y su desarrollo, y analizar las teorías que casi desde que cobró conciencia ha venido elaborando el hombre sobre el origen del Universo. La ciencia ha permitido ofrecer algunas respuestas sobre el tema. Tal vez no sean totalmente correctas, aunque parecen ser acertadas y podrían ser modificadas en el futuro a la luz de nuevas ideas y nueva información.

Claro, no es posible viajar al pasado a descubrir el origen de la materia, mas en el mundo que nos rodea es posible encontrar indicios que permiten plantear hipótesis sobre lo sucedido millones de años atrás. El estudio de la corteza terrestre ha permitido conocer las diversas etapas —grandes periodos geológicos— de la formación de la Tierra; también es posible analizar los meteoritos, se cuenta ya con muestras de las rocas lunares; además, el análisis de la luz que nos llega de las estrellas y galaxias lejanas ha revelado a los científicos, entre otras cosas, su composición química pues los átomos y moléculas de cada elemento se manifiestan en forma nítida aun a distancias enormes. Esto último ha dado lugar al nacimiento de la cosmoquímica.

"*Química terrestre* —afirman los autores— constituye el intento, con un mínimo de formalidad, de poner en contacto a los interesados en la química con algunos de los problemas cardinales aunque prácticamente desconocidos de esta ciencia: aquellos importantes en cuanto a su relación con la Tierra y la humanidad".

José Antonio Chamizo hizo su licenciatura y maestría en la Facultad de Química de la UNAM y cursó su doctorado en Sussex, Inglaterra. Andoni Garriz hizo su carrera, hasta el doctorado, en la Facultad de Química de la UNAM. Ambos son profesores de tiempo completo del posgrado de la Facultad de Química y miembros del Sistema Nacional de Investigadores.

Inicio

