

Origen y evolución de los elementos químicos en el universo

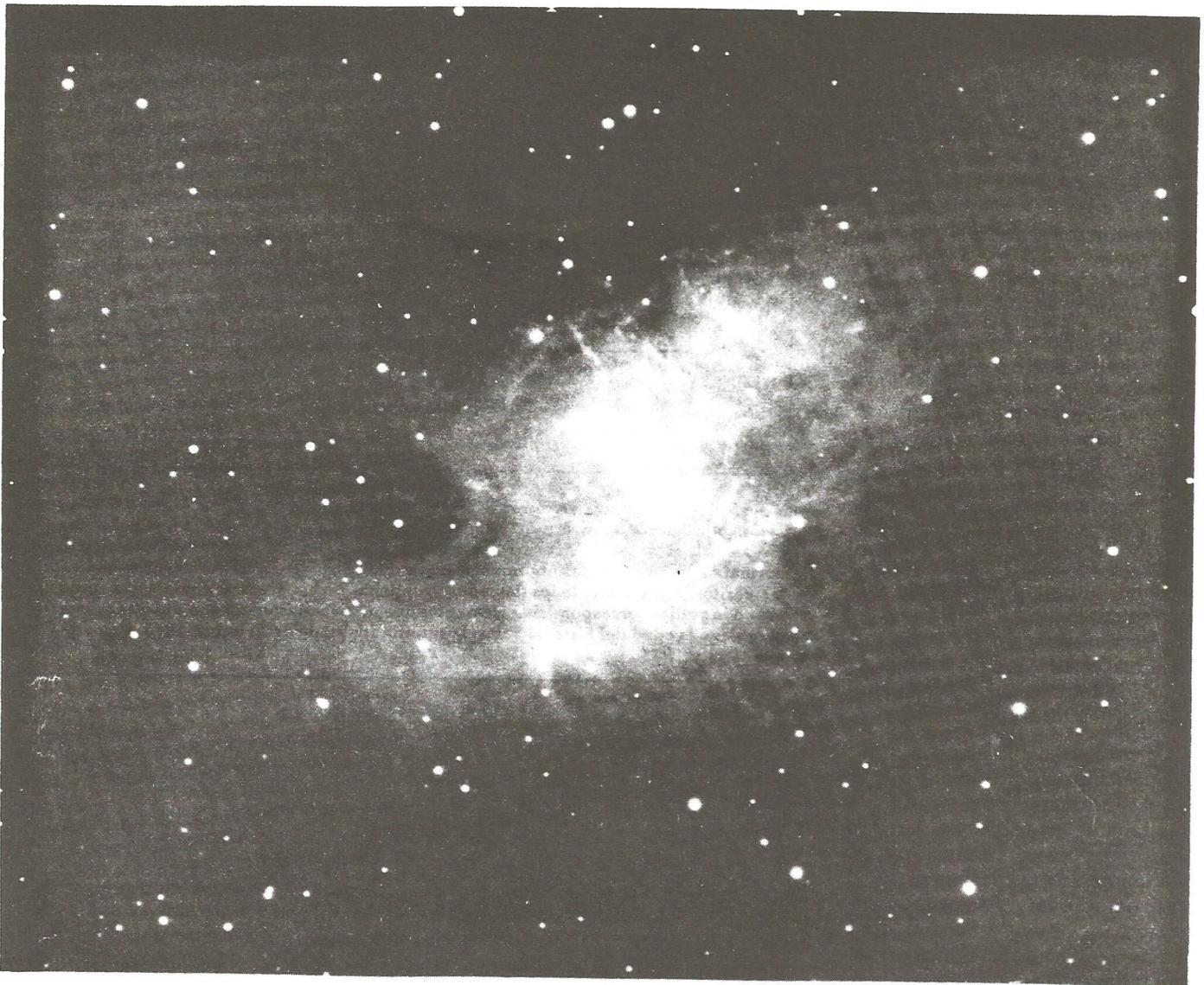


Figura 1. La Nebulosa del Cangrejo (Messier 1)

En la constelación del Toro, alrededor de un grado al noroeste de la estrella *Zeta Tauris* (véanse los mapas celestes), se encuentra situado un extraordinario objeto: la Nebulosa del Cangrejo. La nebulosa es visible durante el presente bimestre en la parte este del cielo, muy cerca del horizonte, al principiar la noche. Descubierta por J. Bevis en 1731, fue reencontrada por Messier, en 1752, al observar un cometa, y lleva el número 1 en su catálogo. Con un telescopio pe-

queño, *Messier 1* se ve como un óvalo, débilmente luminoso y sin detalles distintivos. Con telescopios mayores, se observa una complicada estructura filamentaria (véase la figura 1). Como mencionamos en el número pasado de *Ciencia y Desarrollo*, la Nebulosa del Cangrejo emite también ondas de radiofrecuencia, radiación infrarroja, radiación ultravioleta y rayos X. En su interior se encuentra un pulsar, es decir, una estrella de neutrones que delata su presencia emitiendo pulsos de ra-

dio periódicos; el pulsar del Cangrejo, con un período de 33 milisegundos, es el que gira más rápido de todos los conocidos.

La Nebulosa del Cangrejo ha podido ser identificada como el resto gaseoso en expansión que dejó una estrella al explotar como supernova. La gigantesca explosión que dio origen a la Nebulosa del Cangrejo fue observada, en el año de 1054 d.C., por los astrónomos chinos, quienes anotaron minuciosamente la súbita

“aparición” de una estrella “nueva” en el cielo, su posición, su intenso brillo (fue visible a plena luz del día) y la paulatina disminución de éste con el paso del tiempo, hasta volverse invisible a simple vista.

Gracias a las observaciones de los astrónomos chinos en la antigüedad, y al intenso estudio del que ha sido objeto la Nebulosa del Cangrejo en fechas recientes, sabemos hoy que esta nebulosa es el resto gaseoso de la muerte violenta de una estrella masiva.

En números anteriores de esta revista vimos la manera como transcurre el ciclo vital de las estrellas, desde su nacimiento hasta su muerte. Mencionamos que las estrellas pasan la mayor parte de sus vidas generando, a partir de la transmutación de hidrógeno a helio en sus centros, la energía que radian al espacio circundante. Vimos que, cuando se agota el hidrógeno en la parte central de la estrella, entran en juego otras reacciones termonucleares de fusión que transmutan sucesivamente helio, carbono, nitrógeno, oxígeno y silicio en elementos químicos cada vez más pesados, hasta llegar al hierro; todas estas reacciones liberan energía, con la cual la estrella puede suplir la que su superficie radia al exterior.

De esta manera, es claro que la composición química de las estrellas se ve continuamente alterada como resultado de las reacciones termonucleares que ocurren en sus centros, y que son necesarias para generar, durante tiempos larguísimos, la energía que radian. En consecuencia, la composición química del universo no es algo inmutable, sino que varía con el transcurso del tiempo, y las abundancias de los elementos químicos que en la actualidad observamos son un resultado, concreto y palpable, de toda su historia anterior, historia que comprende, además de la evolución de muchas generaciones de estrellas, la formación misma del universo.

Las abundancias cósmicas actuales de los elementos químicos están representadas en la figura 2. Según la visión astronómica moderna, en esta figura se encuentra plasmada toda la historia del universo. Al verla por primera vez, sin embargo, surgen de inmediato algunas preguntas. Las

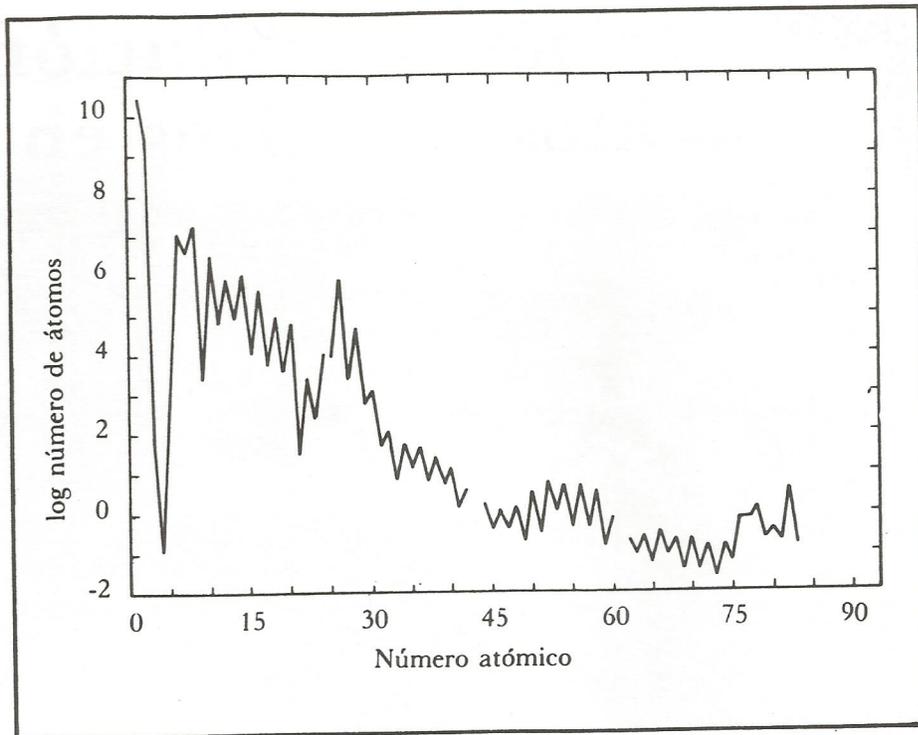


Figura 2. Las abundancias cósmicas actuales. En el eje horizontal se ha presentado gráficamente el número atómico (que es igual al número de protones en el núcleo, es decir, a la carga eléctrica de éste), en el vertical el logaritmo del número de núcleos arbitrariamente normalizado, es decir, las abundancias. Los datos provienen en su mayoría de estudios de meteoritos, especialmente los llamados “condritas carbonáceas de tipo I”. Las interrupciones en la gráfica corresponden a elementos que no tienen isótopos con vidas mayores o comparables a la edad del Sistema Solar. Diagrama adaptado de Trimble, 1975; datos de Cameron 1968 y 1973

abundancias de la figura, determinadas mediante datos meteoríticos, ¿son realmente representativas de las abundancias “cósmicas”, es decir, universales? Es evidente que la Tierra, Júpiter, el Sol y los meteoritos difieren radicalmente en su composición química. El Sol también difiere de otras estrellas en cuanto a abundancia de helio y de elementos más pesados (véase la figura 3) y, en principio, no tenemos derecho a suponer que la composición química de otras galaxias sea similar a la de la nuestra. ¿Qué sentido tiene, entonces, hablar de abundancias “cósmicas”?

Es muy sorprendente y profundamente significativo el hecho de que, una vez tomados en cuenta algunos procesos secundarios, las abundancias de los elementos químicos sean similares en todos los objetos conocidos del universo. Es obvio que los meteoritos, por ejemplo, han perdido la mayor parte de su material volátil (hidrógeno, helio, carbono, nitrógeno, oxígeno y los gases nobles), pero

los elementos que conservan se presentan en las mismas proporciones relativas que en el Sol. Algo parecido ha ocurrido con la corteza terrestre y con la superficie de la Luna: sólo conservan los elementos más refractarios, pero éstos nuevamente se dan en proporciones solares. Más aún: los distintos isótopos* de un átomo también se presentan en las mismas proporciones relativas que en el Sol.

Después de tomar en cuenta todos los efectos secundarios conocidos, se obtiene una tabla de abundancias como la que aparece en la figura 2; estas abundancias corresponden a la composición química de la superficie del Sol en la actualidad y son típicamente representativas de todo el Sistema Solar.

Por otra parte, se ha encontrado que en el medio interestelar la abun-

* Isótopos son núcleos con la misma carga eléctrica, pero distintas masas; es decir, núcleos con el mismo número de protones, pero distinto número de neutrones.

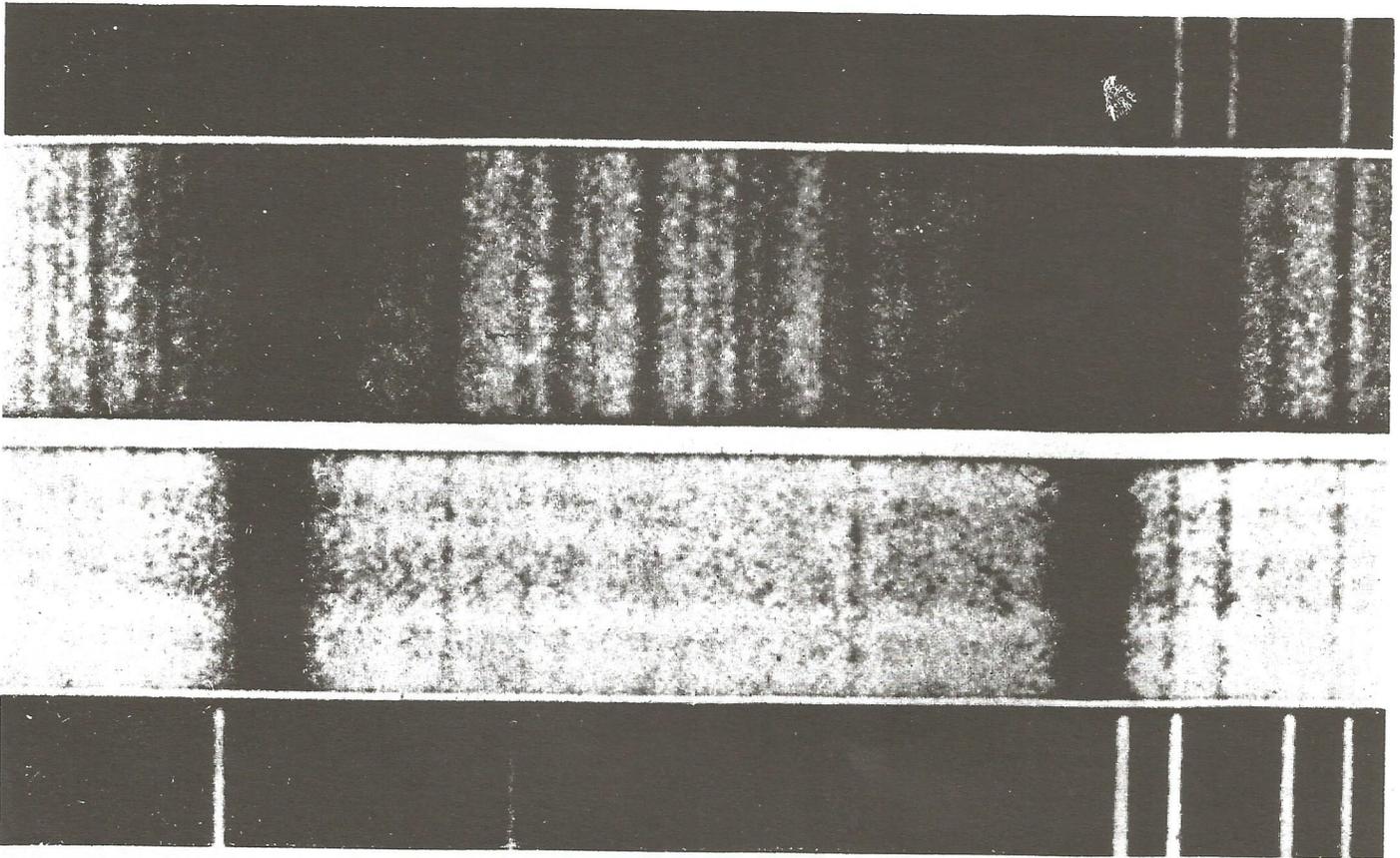


Figura 3. Espectros de dos estrellas de nuestra galaxia, con igual temperatura superficial y radios parecidos, y espectros de comparación (primero y último). El segundo espectro corresponde a una estrella vieja, del halo de la galaxia; el tercero a una estrella como el Sol, perteneciente al plano galáctico. Nótese que las líneas del espectro de la estrella del halo son muy débiles (excepto las del hidrógeno). Esto indica que la abundancia de los elementos químicos más pesados es mucho menor en las estrellas del halo que en las estrellas del plano galáctico

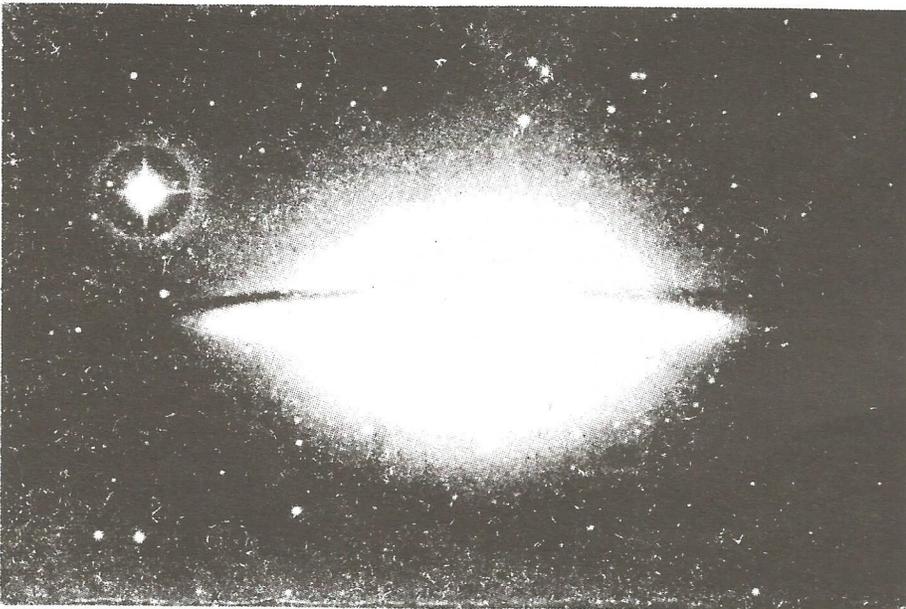
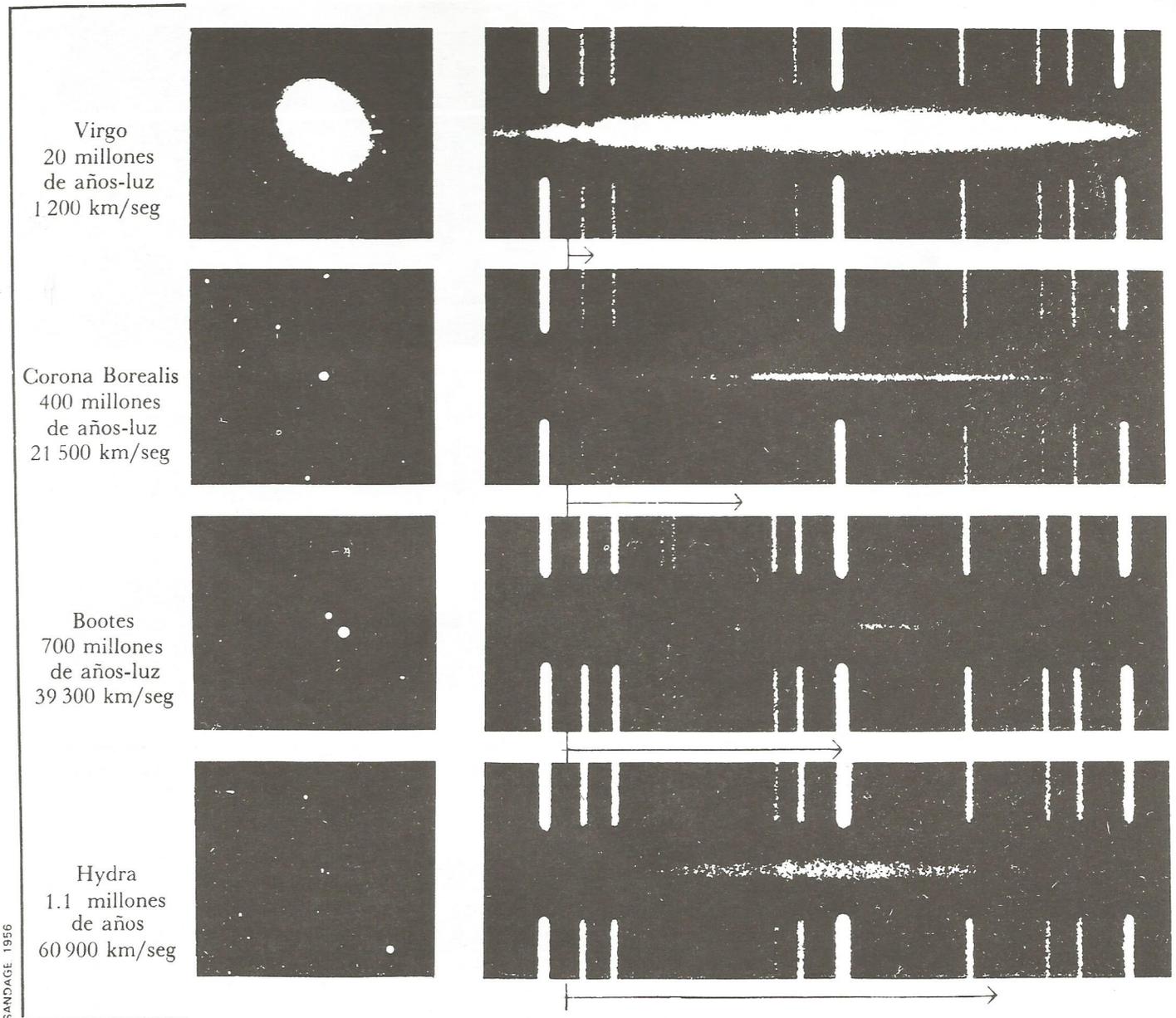


Figura 4. La galaxia espiral *Messier 104*, vista casi de canto. En las galaxias espirales se presentan típicamente dos poblaciones estelares: las estrellas de población I, confinadas al plano galáctico y asociadas al gas y al polvo, y las estrellas de población II, cuya distribución es esférica, formando una especie de halo. En la foto, se aprecian claramente ambas poblaciones. Nuestra propia galaxia, fotografiada desde el lugar adecuado, daría una imagen similar a la de M104, aunque su plano se vería comparativamente más brillante, y su halo más débil

OBSERVATORIOS HALE

dancia de los elementos químicos es muy similar a la del Sol. Esto es válido también para las partículas que componen la radiación cósmica. Entre las estrellas de nuestra galaxia, con algunas excepciones, las abundancias químicas son, en primer lugar, las estrellas ya muy evolucionadas, cuyas superficies se encuentran contaminadas por los productos de las reacciones termonucleares que ocurren en el interior, y, en segundo, las estrellas más viejas, que se formaron durante los primeros mil millones de años de vida de nuestra galaxia y que pertenecen al llamado halo (veáanse las figuras 3 y 4). Incluso en galaxias espirales externas a la nuestra los elementos químicos tienden a presentarse esencialmente en las mismas proporciones que en el Sol. Por las razones expuestas, es válido referirse a las abundancias químicas que aparecen en la figura 2 como "abundancias cósmicas" y considerar que son la norma en el Universo, norma de la cual algunos



SANDAGE 1956

Figura 5. La expansión del Universo, puesta en evidencia por la recesión de las galaxias. La figura muestra cuatro galaxias situadas en cúmulos a distintas distancias de nosotros, con sus correspondientes espectros. Mientras mayor es la distancia, mayor es la velocidad de recesión observada

objetos excepcionales se apartan.

Con esta perspectiva, es científicamente válido y de profunda importancia plantearse las siguientes cuestiones: ¿cuáles son los procesos naturales que ocurren en el universo y que determinan las abundancias cósmicas de los elementos químicos? ¿Por qué algunos objetos se desvían de ellas?

La respuesta a estas interrogantes, la cual creemos conocer en sus rasgos principales, reúne esfuerzos de casi todas las ramas de la astronomía moderna, y de otras ciencias afines.

En términos generales, la tarea consiste en producir, mediante procesos naturales, las abundancias cósmicas observadas (véase figura 2) a partir del elemento más ligero y abundante: el hidrógeno.

Dentro del marco de un universo estacionario, Burbidge, Burbidge, Fowler y Hoyle, en un trabajo de fundamental importancia publicado en 1957 (conocido humorísticamente como *B²FH*), propusieron que la nucleosíntesis en el interior de las estrellas era el proceso que determinaba las abundancias cósmicas; estudiaron

en detalle siete grupos de reacciones nucleares, mediante los cuales podían sintetizarse, a partir del hidrógeno, prácticamente todos los elementos químicos conocidos. Los grupos de reacciones que utilizan como materia prima al hidrógeno (para formar helio) y al helio (para formar carbono, principalmente) están asociados a etapas de muy larga duración en la vida de las estrellas (véase *Ciencia y Desarrollo* núm. 32). Otros grupos de reacciones ocurren en etapas de corta duración, o incluso explosivas. Mediante este proceso, *B²FH* logra-

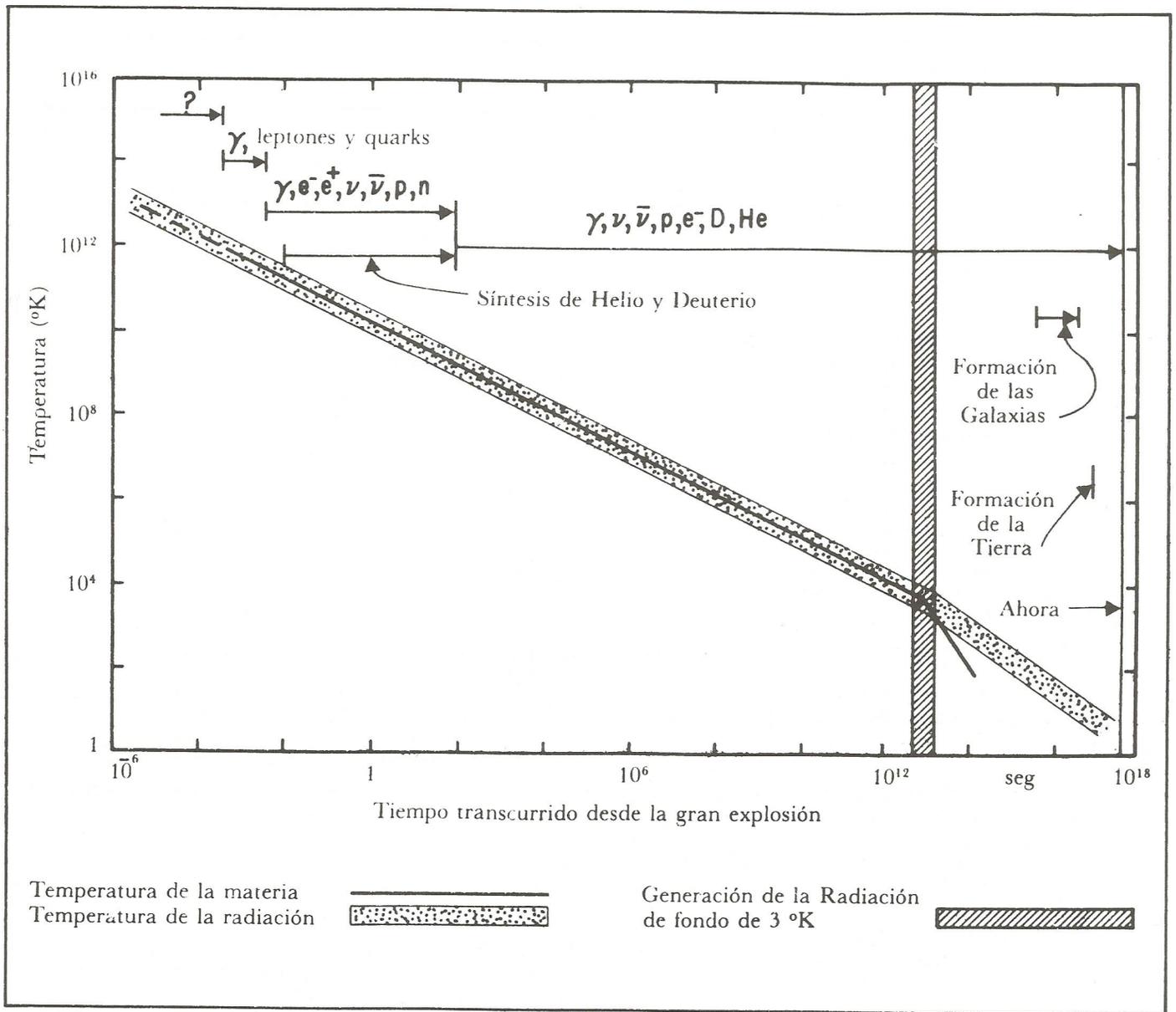


Figura 6. Procesos principales en el Universo, a partir de la Gran Explosión. Las letras significan: e^+ , e^- : electrones y positrones n: neutrones u, \bar{u} : neutrinos y antineutrinos D: deuterio p: protones He: helio b: fotones

ron reproducir, en forma bastante aproximada, las abundancias químicas observadas para los elementos más pesados que el boro; los dos defectos principales del esquema de B^2FH eran que quedaba sin explicar la supervivencia de la abundancia observada de lo llamados "elementos ligeros" (litio, berilio y boro), los cuales se destruyen a temperaturas como las que típicamente reinan en los interiores estelares, y que la cantidad de helio producida era apreciablemente menor que la observada, aun entre las estrellas más viejas, del halo. Para remediar el primer defecto

propusieron un proceso "x", capaz de producir Li, Be y B; en la actualidad, se piensa que estos elementos se producen por espalación nuclear, al chocar los protones y partículas alfa de la radiación cósmica con núcleos de carbono, nitrógeno y oxígeno del medio interestelar (o viceversa). El segundo defecto de la teoría de B^2FH , es decir, la poca cantidad de helio que produce, no tiene remedio dentro del marco de un universo estacionario.

En contraste con la teoría de B^2FH estaba la teoría de Alpher, Bethe y Gamow (humorísticamente conocida

como *Alfa-Beta-Gama*), formulada en 1948, que proponía la nucleosíntesis de los elementos químicos en estados de gran densidad y alta temperatura, asociados a la Gran Explosión que dio origen al universo. La dificultad principal de esta teoría era que no permitía la síntesis de núcleos más pesados que el litio 7 en cantidades comparables a las observadas.

La visión moderna del problema de la nucleosíntesis de los elementos en el universo reúne, como veremos, aspectos de las teorías B^2FH y *Alfa-Beta-Gama*. Toma de la segunda concepto de que el universo "se c

nó" en una gran explosión, que tuvo lugar hace alrededor de 20 000 millones de años. La recesión de las galaxias (véase la figura 5) descubierta por Hubble en 1929, implica que el universo está en expansión, y que en el remoto pasado su densidad fue mucho mayor. El descubrimiento de la radiación de fondo de 2.7° K, hecho por Penzias y Wilson en 1965 (por el cual obtuvieron el Premio Nobel), vino a confirmar una brillante predicción teórica que Gamow hizo en 1946. La radiación de fondo, completamente isotrópica, tiene un espectro térmico con su máximo en una longitud de onda de aproximadamente dos milímetros; constituye una evidencia bastante directa de una fase densa, caliente y opaca del universo, fase asociada a la Gran Explosión.

De acuerdo a las teorías modernas (véase la figura 6), el universo, una milésima de segundo después de la Gran Explosión (DGE), estaba compuesto principalmente de fotones (radiación), leptones (en especial neutrinos), antileptones, quarks y antiquarks (sobre la composición del universo en etapas previas se sabe muy poco). En el intervalo comprendido entre una centésima de segundo y cien segundos DGE, aunque aún son abundantes, los neutrinos y antineutrinos ya no interactúan fácilmente con otras partículas, por lo cual dejan de ser importantes para la evolución química; el universo consiste en esta etapa principalmente de fotones, electrones, positrones, neutrinos, antineutrinos y unos cuantos protones y neutrones; en esta misma fase, se combinan los electrones con los positrones; los protones se fusionan con neutrones para dar núcleos de helio (la mayor parte del helio observado en la actualidad se forma durante los primeros dos o tres minutos de vida del universo), y se forman también núcleos de deuterio y tritio, así como pequeñas cantidades de litio.

El universo continúa expandiéndose y su temperatura descendiendo; este enfriamiento, causado por la expansión, es la razón por la cual la Gran Explosión no produce cantidades apreciables de elementos más pesados que el helio. En efecto, cuando la temperatura del universo ya es su-

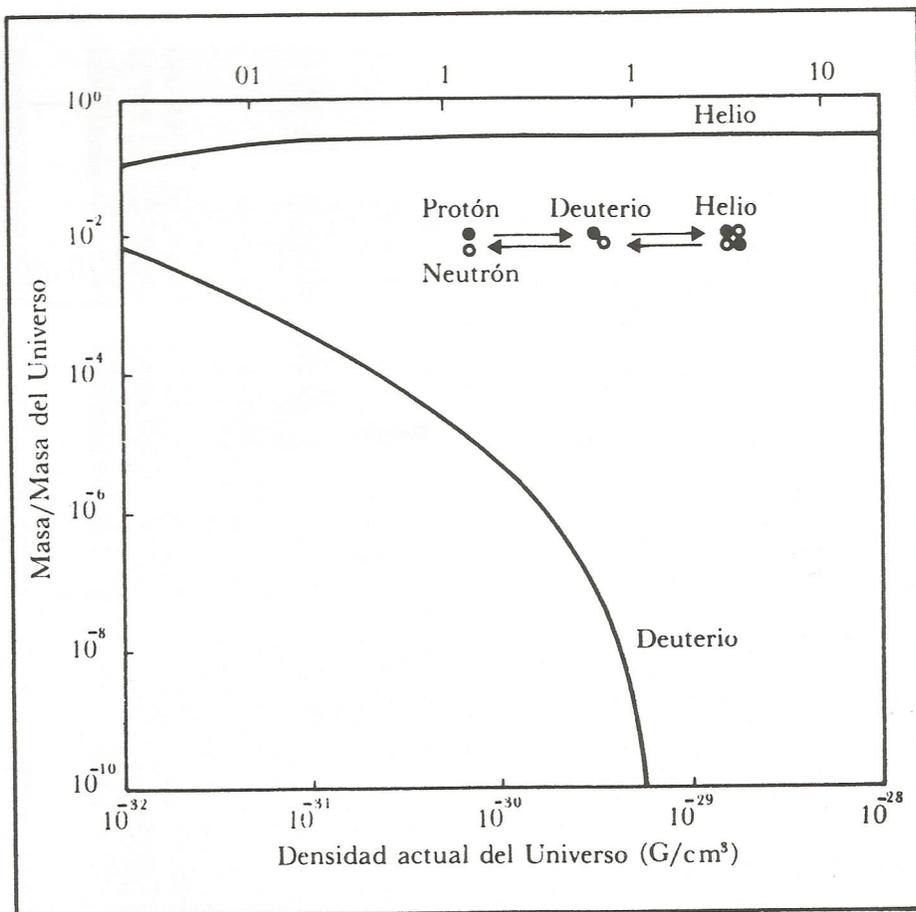


Figura 7. Fracción de masa en forma de deuterio y de helio sintetizada durante la Gran Explosión, como función de la densidad actual del universo. La abundancia actual observada del deuterio sugiere, bajo ciertas hipótesis, que la densidad actual es menor que 4×10^{-31} gramos por centímetro cúbico

ficientemente baja para que el deuterio —primer eslabón en la cadena de la nucleosíntesis— sobreviva, la densidad es ya demasiado baja para que las reacciones que dan elementos como el litio o el carbono se realicen con rendimientos significativos. Si la masa total del universo fuera mayor, la densidad también hubiera sido mayor durante los primeros minutos de su vida, y se hubieran formado desde entonces elementos como el carbono, nitrógeno, etcétera. Además, se hubieran formado grandes cantidades de deuterio y de helio, mayores que las observadas (véase la figura 7).

La expansión del universo prosigue, y, alrededor de 300 000 años DGE, los fotones, que hasta entonces habían interactuado fácilmente con otras partículas, se desacoplan (como antes se independizaron los neutrinos del resto del universo). De aquí en adelante la materia y la ra-

diación continúan enfriándose por separado (la temperatura hasta la cual se ha enfriado la radiación es actualmente 2.7°K).

De acuerdo con lo anterior, la nucleosíntesis cosmológica explica satisfactoriamente la abundancia cósmica del deuterio y del helio. Para explicar las abundancias de los elementos restantes es preciso recurrir a la nucleosíntesis en el interior de las estrellas, en forma similar a como la propusieron *B²FH*.

El universo continúa expandiéndose, y 100 millones de años DGE empiezan a formarse las galaxias; en ellas, se condensan las primeras generaciones de estrellas; la composición química de ellas será la que dé la nucleosíntesis cosmológica. Por razones hasta ahora desconocidas, algunas galaxias (las esféricas y elipsoidales) transforman rápidamente *todo* su gas en estrellas, mientras que otras (las espirales y las irregulares)

NUCLEOSINTESIS
DE ALGUNOS ELEMENTOS REPRESENTATIVOS

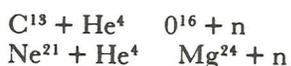
I. Por captura de He⁴:

Berilio:	He ⁴ + He ⁴	Be ⁸
Carbono:	Be ⁸ + He ⁴	C ¹² + γ
Oxígeno:	C ¹² + He ⁴	O ¹⁶ + γ
Neón:	O ¹⁶ + He ⁴	Ne ²⁰ + γ
Magnesio:	Ne ²⁰ + He ⁴	Mg ²⁴ + γ
.....
Hierro:	Cr ⁵² + He ⁴	Fe ⁵⁶ + γ

II. Por captura lenta de neutrones y desintegración beta:

Cloro:	S ¹⁶ + n	S ¹⁷ + γ
	S ¹⁷	Cl ¹⁷ + e ⁻ + ν̄
Bromo:	Se ⁸⁰ + n	Se ⁸¹ + γ
	Se ⁸¹	Br ⁸¹ + e ⁻ + ν̄
Kriptón:	Br ⁸¹ + n	Br ⁸² + γ
	Br ⁸²	Kr ⁸² + e ⁻ + ν̄
Tantalio:	Hf ¹⁸⁰ + n	Hf ¹⁸¹
	Hf ¹⁸¹	Ta ¹⁸¹ + e ⁻ + ν̄

Los neutrones provienen de reacciones como:



(El C¹³ se forma durante el ciclo CNO - ver *Ciencia y Desarrollo* No. 33, el Ne²¹ a partir de Ne²⁰ por captura de un neutrón).

III. Por captura rápida de neutrones:

Molibdeno:	Fe ⁵⁶ + 40n	Mo ⁹⁶ + γ's
Oro:	Fe ⁵⁶ + 141n	Au ¹⁹⁷ + γ's
Mercurio:	Fe ⁵⁶ + 146n	Hg ²⁰² + γ's
Uranio:	Fe ⁵⁶ + 182n	U ²³⁷ + γ's

Los neutrones se forman durante la explosión de la supernova

Figura 8

sólo transforman una parte del gas en estrellas. Cuando hay rotación apreciable, como en el caso de las galaxias espirales, el gas restante se aplana y se forma un disco. A partir de este momento, el nacimiento de nuevas estrellas podrá ocurrir solamente en donde haya gas, es decir, en el disco de las galaxias espirales, y prácticamente habrá cesado en las galaxias elípticas.

En las estrellas ocurren, según la visión de *B²FH*, dos tipos de reacciones nucleares que sintetizan elementos distintos: las reacciones en equilibrio y las explosivas.

Las primeras ocurren durante fases relativamente estables de la evolución estelar. Las más largas de ellas corresponden a la nucleosíntesis a partir del hidrógeno y del helio; los productos de estas reacciones son helio, en el primer caso, y carbono, oxígeno, magnesio, nitrógeno, flúor y neón, con una gran variedad de isótopos, en el segundo.

En fases evolutivas más avanzadas ocurren reacciones a partir del carbono, del oxígeno y del silicio, que producen isótopos de silicio, azufre, argón, potasio, etcétera, hasta llegar al níquel y al hierro. Ilustramos algu-

nos ejemplos de reacciones nucleares en la figura 8.

El resultado final de las reacciones termonucleares es la formación de núcleos atómicos (hasta el hierro) en proporciones parecidas a las que se dan en el Sol, aunque no exactamente iguales. Las estrellas, al perder masa en fases avanzadas de su evolución, le regresan al medio interestelar material enriquecido con elementos más pesados que el helio. Nuevas generaciones de estrellas, formadas a partir del medio interestelar cada vez más enriquecido con elementos pesados, tendrán abundancias cada vez mayores de éstos. Como mencionamos antes, esto está de acuerdo con los datos que se han observado, los cuales indican que las estrellas relativamente jóvenes tienen abundancias de elementos pesados mayores por un factor hasta de 100 que las estrellas viejas.

Sin embargo, para darle los últimos toques a las abundancias de elementos (e isótopos) más ligeros que el hierro, y llevarlas a una perfecta concordancia con los valores "cósmicos", es necesario que ocurran reacciones termonucleares explosivas. Por otra parte, la producción de núcleos más pesados que el hierro no libera energía sino que la consume. Se piensa que estos núcleos se forman por capturas sucesivas de neutrones, seguidas por desintegración beta. Los neutrones necesarios los proporcionan ya sean reacciones nucleares en equilibrio, en fases evolutivas muy avanzadas, o bien reacciones explosivas.

El sitio idóneo para las reacciones termonucleares explosivas es el interior de una estrella en el momento que explota como supernova (véase *Ciencia y Desarrollo* núm 33). Aunque los cálculos detallados de la explosión aún son objeto de gran controversia, parece claro que durante ella efectivamente se sintetizan los elementos pesados en proporciones adecuadas, y se ajustan las abundancias de los elementos más ligeros para llegar, en suma, a una coincidencia extraordinariamente buena con los valores "cósmicos". Estos resultados se presentan en forma resumida en la figura 9, que muestra las abundancias observadas de los elementos y sus isótopos estables, e indica el proceso

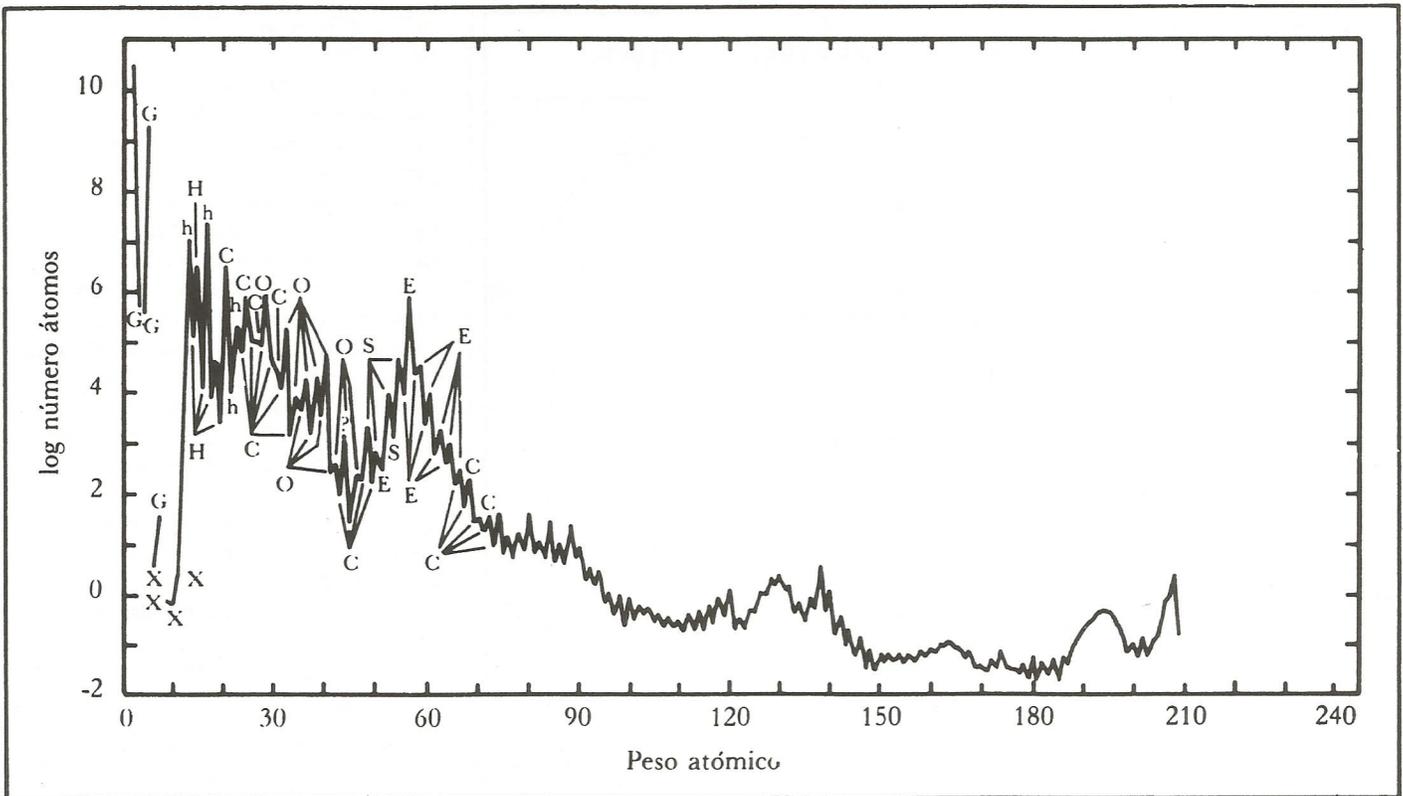


Figura 9. Abundancias cósmicas actuales, y procesos responsables de la formación de cada núcleo. Esta figura es análoga a la figura 2, pero se ha graficado en el eje horizontal el peso atómico, para exhibir a todos los isótopos. Las letras indican los procesos a los cuales se atribuye la síntesis, y que dan abundancias en concordancia con las observadas.

G: nucleosíntesis en la Gran Explosión
 X: espalación nuclear por rayos cósmicos
 H: nucleosíntesis a partir del hidrógeno
 h: nucleosíntesis a partir del helio
 C: nucleosíntesis a partir del carbono
 E: procesos nucleares en equilibrio.

Los núcleos con pesos atómicos superiores a 70 se forman por captura de neutrones (o de protones), algunos en condiciones de equilibrio, otros explosivamente

responsable de su formación en proporciones que concuerdan con las cósmicas. Por otro lado, durante la explosión la estrella pierde una fracción de su masa, y le regresa al medio interestelar material enriquecido en elementos pesados.

A partir de datos como la frecuencia con que ocurren las supernovas en nuestra galaxia, la masa que expulsan, el número de estrellas en fases evolutivas avanzadas, la masa que éstas pierden, etcétera, es posible calcular el ritmo con el cual la galaxia, como un todo, se ha ido enriqueciendo en elementos más pesados que el hidrógeno, desde su formación hasta el presente; nuevamente, se obtiene una buena concordancia con las observaciones.

De la manera que hemos esboza-

do, la astronomía moderna puede explicar, en forma bastante satisfactoria, la manera como se forman los elementos químicos a partir del hidrógeno (el más sencillo y abundante de todos), así como sus abundancias relativas. Hemos visto, en síntesis, que el helio se forma durante la Gran Explosión, y que su abundancia está íntimamente ligada a propiedades globales de nuestro universo (su masa total). Otros elementos se sintetizan en el interior de las estrellas, por medio de las mismas reacciones que les permiten a éstas brillar. Otros más se forman en fases explosivas. Las estrellas, antes de morir o al hacerlo, devuelven al medio interestelar material contaminado con los productos de las reacciones nucleares, lo cual trae consigo un gradual

aumento en él de la abundancia de elementos pesados. Las nuevas generaciones de estrellas se condensan de este material, cada vez más rico en elementos más pesados que el hidrógeno, y el ciclo continúa.

Es fascinante meditar que, según la visión anterior, todos los elementos químicos más pesados que el helio se formaron alguna vez en el interior de una estrella. Así, el oxígeno y nitrógeno que respiramos, el carbono de nuestros tejidos (y de nuestra materia gris), el calcio y fósforo de nuestros huesos, todos los elementos que nos componen, fueron alguna vez parte de una estrella. De esta manera somos una componente orgánica de la evolución del universo, y puede decirse, sin exageración alguna; que somos descendientes de las estrellas.

La exploración y explotación de las minas se han hecho tradicionalmente con un fin utilitario, económico. Es necesario erradicar este punto de vista y estudiar los yacimientos minerales desde un enfoque científico, en el contexto de la geología regional.

LA GEOLOGÍA, CIENCIA ESTRATÉGICA

Inventario de Sonora: la carta metalogénica

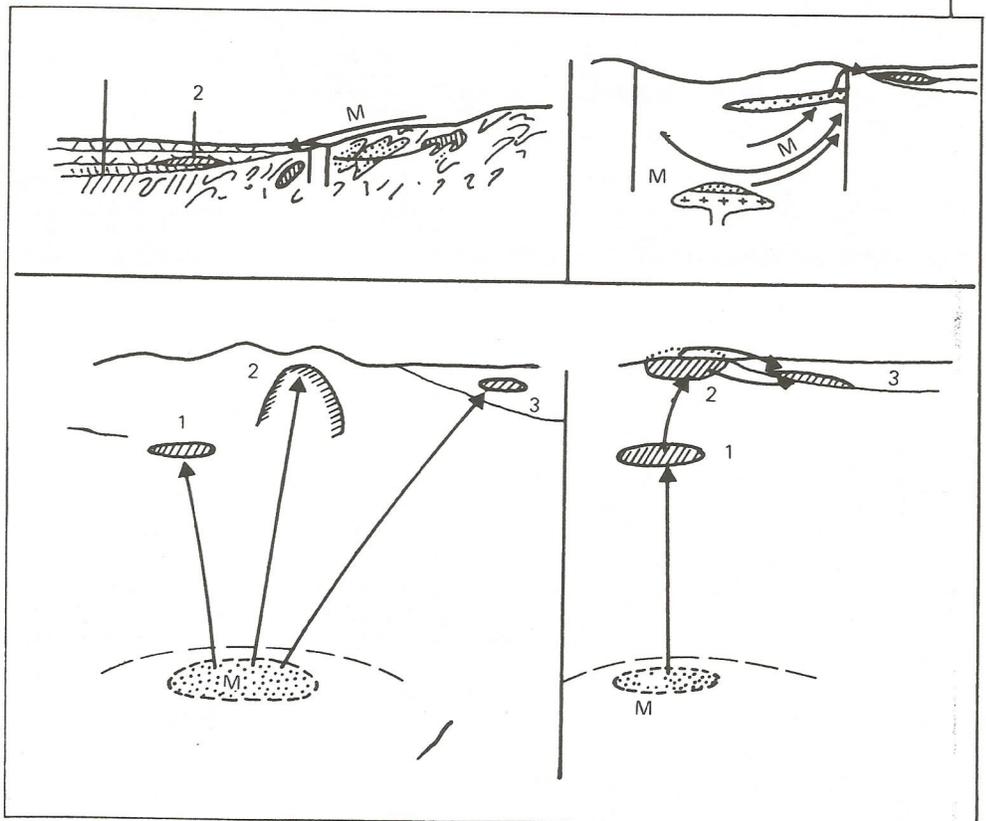
NORMA HERRERA

Estudiar los yacimientos minerales como fenómenos geológicos que ocurren en el tiempo y en el espacio, que se relacionan con leyes específicas de la geología; entenderlos como procesos naturales que ocurren en la Tierra y no desde la concepción tradicional —cuyo fin es meramente lucrativo—, son los objetivos principales de todos y cada uno de los trabajos que lleva a cabo, bajo la dirección del doctor Efrén Pérez Segura, el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora (US).

En coordinación con la Dirección de Minería, Geología y Energéticos —dependencia del gobierno estatal—, la US se ha dado a la tarea de estudiar la metalogénia* del estado de Sonora. En 1981, se publicó la primera edición de *La Carta Metalogénica de Sonora*, a una escala de uno a un millón. Antes de finalizar el presente año, se editarán los resultados de la segunda fase del programa. Dos son las modificaciones más importantes en este segundo documento: la escala será de uno a 250 mil y se empleó un enfoque interpretativo de los recursos minerales, que complementa al aspecto descriptivo. ¿Por qué un yacimiento se encuentra en determinado lugar y no en otro? ¿A qué se debe que en Sonora se localicen las minas más importantes del país —La Caridad y Cananea— y no en la península de Yucatán, por ejemplo?

Se habla mucho de nuestro potencial minero —dice a *ICYT* el doctor Pérez Se-

*Relativo a *metalogénesis*, proceso mediante el cual se origina un yacimiento metálico en una zona determinada.



Los yacimientos son "monstruos" que contienen enormes cantidades de minerales. El dibujo muestra cómo una misma masa mineral puede dar lugar a diferentes tipos de yacimientos, lo cual ocurre al mismo tiempo o en diferentes épocas geológicas. (Dibujo: Pierre Routier. Oú sont les métaux pour l'avenir?. 1980.)

gura—, pero lo cierto es que apenas tenemos una vaga idea de cuál es éste. ¿Cuánto oro, plata, uranio, carbón, tungsteno, etcétera, tenemos? ¿Dónde y por qué están ahí? "La geología es una ciencia estratégica. Sin embargo, se ha hecho muy poca investigación científica acerca

de los yacimientos minerales. Sin separar lo aplicativo, es necesario considerar los yacimientos minerales bajo una óptica distinta que rebasa las metas simplemente utilitarias, y entender su relación con todo el entorno geológico, a nivel regional y continental."



Hace cuatro años, cuando se inició el proyecto sobre la metalogénia de Sonora, se enfatizó principalmente la cuestión descriptiva. Se trataba de inventariar los recursos minerales del estado. El documento aludido muestra los diferentes tipos de yacimientos existentes, así como sus características y relaciones con el entorno geológico. Para sintetizar la información obtenida de fuentes bibliográficas y visitas a los lugares, se utiliza cierta simbología y colores.

No conformes con el inventario, los investigadores del Departamento de Geología decidieron seguir trabajando a una escala más pequeña y además, de acuerdo con la ciencia, tenían que llenar el vacío de la interpretación. "Es bastante interesante poder afirmar que en determinado lugar hay un yacimiento de oro, pero es más importante decir por qué está ahí. No se debe a relaciones circunstanciales, sino a factores geológicos."

En la nueva carta metalogénica se sintetiza la información de más de quinientos yacimientos minerales en el estado. La conclusión, de más de cien cuartillas que acompañan al documento, pone en tela de juicio las bases pragmáticas y dogmáticas con las que se ha abordado la geología económica y la explotación de los yacimientos minerales en México durante los últimos decenios.

Efrén Pérez Segura destaca dos as-

El estudio de los minerales debe hacerse desde un punto de vista científico. La galena naica extraída de una mina chihuahuense y el cuarzo de Amatitlán. Guerrero. son pequeñas muestras. Colección del doctor Miguel Romero Sánchez. (Fotos: Jesús Gallardo.)

pectos de la conclusión:

1. Sólo puede comprenderse la existencia de yacimientos minerales si se les estudia en el contexto de la geología regional, relacionándolos con las rocas encajonantes, las cuales abrazan a la veta. No es posible comprender por qué un yacimiento está en determinado lugar si no se conoce la historia de su entorno. Este tipo de análisis se contraponen a la explotación geológica tradicional, mediante la cual se trata de encontrar el yacimiento y su justificación en el mismo lugar.

2. Los yacimientos encontrados deben enmarcarse en el proceso histórico de los sucesos geológicos que precedieron y siguieron a su formación. El yacimiento es parte de la geología. Tiene una justificación de acuerdo con su historia geológica.

"Durante años nos hemos preocupado por la búsqueda de 'guías' para la exploración —llámense fracturas, zonas de fallas, troncos porfídicos o domos en bordes de estructuras anulares—. Estas 'guías' agrupadas en 'lineamientos' son, para algunos, condiciones necesarias para que exista un yacimiento. Nosotros

creemos que no son suficientes para formarlos. La suficiencia se logra con la acumulación del elemento a partir de una roca madre o de otro yacimiento anterior. Nuestra hipótesis de trabajo es que los yacimientos proceden de una masa mineral, la cual puede dar lugar a diferentes tipos de yacimientos, o bien que éstos se pueden haber formado en diferentes épocas geológicas, pero proceden de un origen común." (Véase la figura 1.)

Esta manera dialéctica de ver la metalogénia revolucionó lo que en el país se había dicho sobre geología minera y económica, señala el doctor Pérez Segura. "Esta visión abre muchas perspectivas de qué y en dónde buscar. No hay que rastrear el secreto de la existencia del yacimiento en él mismo, sino en relación a su ambiente y su historia geológica."

Con base en esta hipótesis, adoptada de la escuela francesa, ya se tiene un modelo comparable con el que otros científicos han aplicado en diversos países. En el estado de Sonora se propone aplicarlo en los grandes yacimientos de cobre, como Cananea y La Caridad.

El documento de la segunda fase del proyecto contiene varios apéndices. En uno se mencionan las características generales de las minas; en otro, los potenciales económicos de los principales yacimientos —lo cual puede orientar las in-

para a la pág. 25

versiones y apoyar zonas relativamente marginadas que, de este modo, hallarían en la minería un pistón para el desarrollo regional—, y un tercero detalla el volumen de la producción minero-metalúrgica, durante los últimos veinte años, de los principales elementos del estado: cobre, oro, plata, zinc, fierro, antimonio, grafito, molibdeno, tungsteno y barita.

El próximo reto para el doctor Pérez Segura y la US es un proyecto sobre la metalogenia de todo el territorio nacional, en un contexto parecido al realizado hasta el momento. Este programa se presentará a la Secretaría de Educación Pública o a la UNESCO.

“También seguiremos trabajando a nivel regional. Por ejemplo, en la metalogenia del oro en el noroeste de México. Hay muchos yacimientos detectados. Existe personal y tecnología, pero debe entenderse que la minería es una actividad complicada y riesgosa. Desde el punto de vista de su explotación, no está supe- ditada únicamente al contexto nacional sino también al mundial —el precio de los metales se fija en las bolsas de valores internacionales—. Representa una industria de riesgo en la que hay que invertir mucho, y los bancos no prestan dinero para trabajar minas.

“No existe capital mexicano para aprovechar cabalmente una mina de la talla de La Caridad, que requiere de una inversión cercana a los mil millones de dólares. Sin embargo, es posible trabajar a diferentes escalas. Hay yacimientos chicos que podría explotar la pequeña minería. Son importantes porque ocupan mucha mano de obra y pueden consolidarse como polos de desarrollo regional. Los recursos no se acaban, no van a acabarse. Los avances científicos y tecnológicos hacen cada vez más atractivos los yacimientos.”

En opinión de Pérez Segura, el abor- daje a la exploración y comprensión de los yacimientos, desde el punto de vista geológico, debe darse atendiendo dos razones: los metales estratégicos y preciosos, oro y plata fundamentalmente, y los elementos en los que el país presenta déficits, por ejemplo: níquel, cobalto, cromo y platino.

Desde la perspectiva económica, dos son los principales yacimientos en Sonora: La Caridad, la mina más grande de México y como la quinta en el mundo, que explota mineral de cobre y molibdeno a una tasa de 65 mil toneladas por día, y cuyo valor bruto de producción equivale a los ingresos de la agricultura y ganadería juntos; y Cananea, que durante muchos años fue la mina más grande del país, donde se explotan los mismos elementos.

Además de estos trabajos de investi-

gación, la US alimenta otra preocupa- ción: dar a los estudiantes y geólogos en formación una metodología diferente con base en hechos científicos y no empíricos. “Tenemos que olvidarnos, y esto cobra mayor peso en las generaciones que esta- mos formando, de lo ‘económico’, ya que esto es muy relativo. Lo que es ahora ma-

ñana no será, y viceversa. A fin de cuen- tas, los yacimientos y lo que de ellos se extrae son materias primas, y como tales se manejan en el mercado mundial. El sa- ber por qué se apoya o se busca tal o cual mineral en el mundo está fuera de lo científico y dentro del terreno político, económico.” □

METALOGÉNESIS Y TECTÓNICA DE PLACAS

“El método geológico no es experimental en su esencia: es histórico... La postura de un geólogo es la de un médico: debe fundar su diagnóstico sobre un conjunto de datos inmediatos y sólo operar una vez seguro, evitando experimentar con el paciente. Es por ello que la geología, ciencia cada día más exacta, se transforma casi en un arte, en el cual el geólogo, historiador o médico de la tierra, ejerce un bello oficio”: Jean Aubouin

MARÍA FERNANDA CAMPA*

La geología es una ciencia tan vasta y sin límites precisos, que la hacen extraña y difícil de comprender, incluso para quienes la ejercen. Su larga tradición va paralela con la marcha misma de la humanidad, plena de orgullosos avances en medio de largos extravíos. Surge con la observación del medio que rodea al hombre, tanto para usar sus recursos y simplemente subsistir como para gozar de su naturaleza circundante.

La utilización de los materiales aparece desde las etapas primitivas, cuando el hombre los emplea para construir su vivienda casi animal —la cueva en las rocas—; alimentarse mediante la cacería —puntas de flecha y herramientas de obsidiana— y adornar artísticamente su existencia —aprovecha las arcillas para crear las pinturas rupestres y diseñar las grecas que dibuja sobre la piel—. Desde entonces, hay quienes se interesan en la búsqueda de las rocas y minerales como materia de estudio, observación y utilización. Se desarrolla una temprana ciencia de las rocas, minerales y cristales, al parejo de la física, química e ingeniería. Los metales son pronto conocidos y usados.

Pero ¿cómo se forman? ¿Cómo se localizan? ¿Dónde encontrarlos cuando se

* Labora en la Subgerencia de Planeación de Exploración de PEMEX. También es asesora del proyecto de Recursos Naturales de la Universidad Autónoma de Guerrero.

agotan los primeros descubrimientos aleatorios?

El conocimiento de la Tierra como planeta, la astronomía, tempranamente centró al hombre en el espacio: éramos un planeta más en el infinito, pero no conocíamos nuestro mundo más allá de pequeñas porciones en los continentes poblados. Pronto se descubrieron los fósiles en las rocas de las montañas más elevadas de los Alpes. ¿Eran restos de peces y mariscos dejados por los peregrinos durante las largas marchas que anualmente realizaban los pueblos, desde los confines asiáticos de Europa hasta el Cabo de Finisterre en el extremo noroccidental de la península Ibérica? ¿Era el fin de Europa y, por lo tanto, también el fin de la Tierra!

Tuvieron que pasar largos años para comprender que los continentes, firmes y estables como la roca que los conforma, estaban constituidos por materiales que provenían del centro incendiado y fluido de la Tierra y por otros que, aun cuando hoy yacen en lo alto de las cadenas montañosas, se habían formado en los fondos marinos.

¿Pero qué significaban los fósiles? La geología de aquella época tuvo que esperar el desarrollo de la biología y el reconocimiento de la evolución de las especies en el tiempo, para centrarse en la historia. Los seres vivientes de este planeta no solamente ocupaban un lugar más en el espacio, sino también atravesaban por un prolongado periodo de evolución y cambios continuos. ¿Acaso sucedía lo mismo

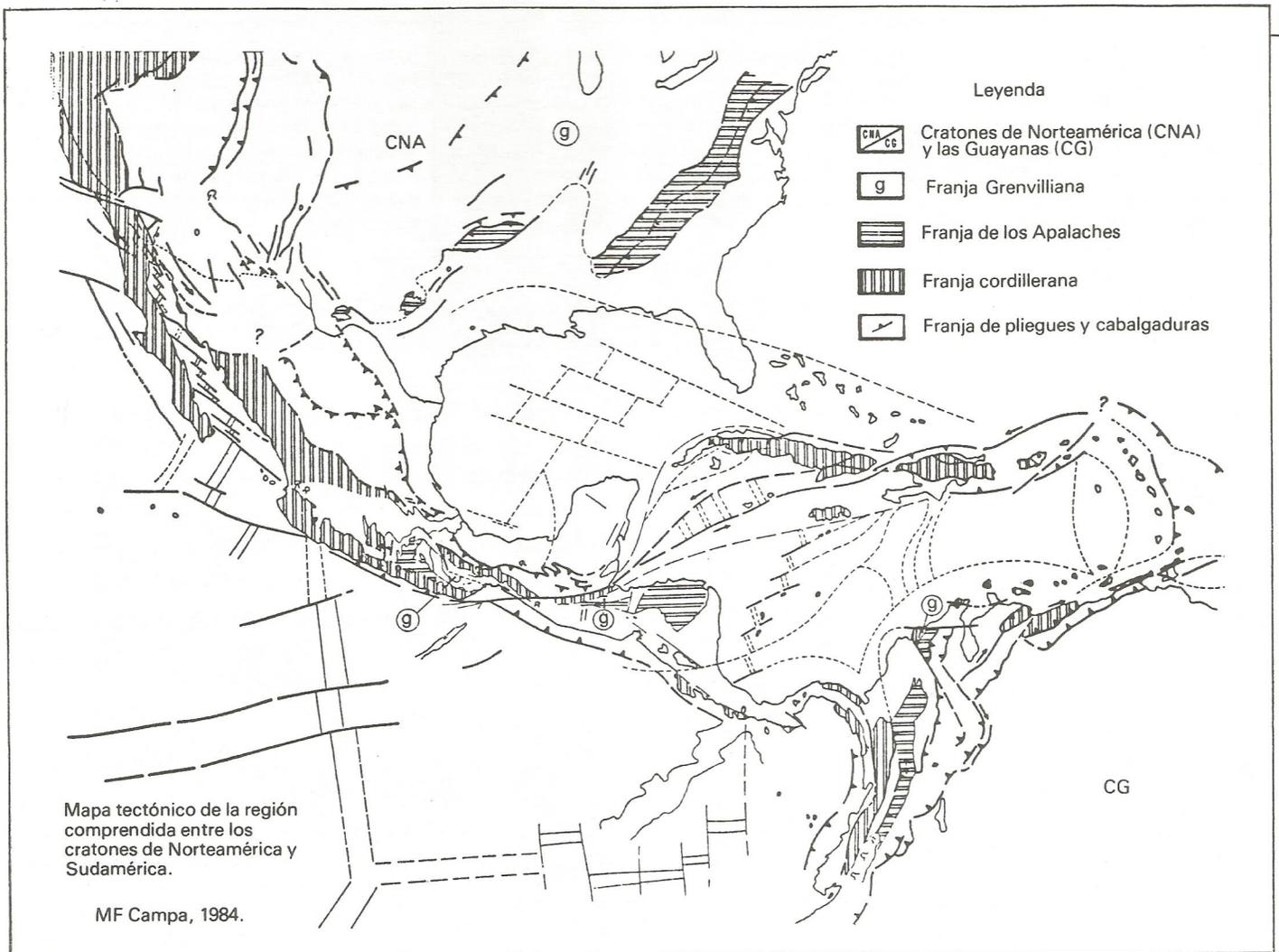


Figura 1

con la solidez efímera y la estabilidad de las rocas? También tenían sus orígenes en millones de años diferentes. ¿Y los terribles terremotos y explosiones de volcanes y calderas que cambiaban la faz de los continentes, haciendo desaparecer islas completas? ¿La Atlántida?

Luego entonces, las montañas se formaban por agregados de material proveniente del manto interno y también por la elevación de los fondos marinos. ¡También se movían las rocas! Se formaban y destruían al mismo tiempo por la erosión y el intemperismo de las lluvias, vientos, explosiones y temblores. Rocas que se construyen y rocas que se destruyen. El reconocimiento de los movimientos horizontales de las rocas en los continentes, era motivo de la más moderna polémica sostenida hasta la primera mitad de este siglo.

La geología, una vez más, tuvo que esperar los avances tecnológicos necesariamente complejos del conocimiento de los fondos marinos actuales, formados como rocas en edades diversas, hasta de 150 millones de años, para compararlos con los antiguos fondos marinos hoy trepados

en las montañas, reconocidos desde el siglo pasado. Es más, los primeros reconocimientos directos e indirectos de los actuales fondos marinos, o corteza oceánica, fueron realizados por los físicos y geofísicos. Sólo después de esta experiencia, los científicos modernos se dieron cuenta de que los geólogos eran indispensables en los estudios oceanográficos. Aún hoy, hay un retraso notable en nuestro país, dado que tanto la oceanografía como la astronáutica requieren de tal magnitud de riqueza, que siguen siendo patrimonio de los países del primer mundo: Europa y Estados Unidos.

La geología consigue así su síntesis hasta nuestra generación. Logra por fin, en la segunda mitad del siglo XX, comprender, medir y proponer un modelo que explica el momento presente de la eterna dinámica de la corteza terrestre, que no sólo se mueve de tiempo en tiempo sino que éste es su estado cotidiano. La corteza terrestre, esa cáscara sólida de rocas y minerales formada y destruida a través del tiempo, se desplaza flotando y cubriendo el fluido interno de mineral fundido del

planeta —de acuerdo con leyes de la dinámica— en movimientos horizontales con desplazamientos laterales, rotaciones de bloques continentales y choques que provocan movimientos verticales y la emergencia de cadenas montañosas. Tensiones, compresiones, rozamientos y rupturas de unas porciones de la cáscara sólida con respecto a otras. Tal es el pensamiento esencial de la tectónica de placas: la teoría que representa la revolución más importante del pensamiento científico de nuestra época.

La tectónica de placas y los recursos minerales de México

La distribución preferencial de los depósitos minerales ha sido observada desde siempre, pero las causas de esta distribución de concentraciones no se buscaban en relación con otros procesos geológicos de la corteza terrestre, tales como distribución similar de los sismos, volcanes, cadenas montañosas, etcétera. La génesis de estos procesos era investigada de manera aislada en procesos aparentemente inde-

pendientes unos de los otros, mediante estudios y análisis altamente especializados y compartimentados. En este contexto, por ejemplo, el emplazamiento de los depósitos minerales con una distribución en zonas geográficas preferenciales asociadas al magmatismo, ha tratado de explicarse mediante numerosas teorías controvertidas como un resultado de diferencias espaciales del manto y de las concentraciones preferentes de elementos en la corteza. Sin embargo, un modelo coherente, global, que explicara la conexión de todos esos fenómenos y procesos, fue encontrado gracias a la teoría de tectónica de placas.

De esta manera, la tectónica de placas integró todos los fenómenos geológicos activos en nuestros días en un modelo geométrico sencillo, que explica su actual distribución espacial y su génesis en la dinámica cuantificable de la corteza terrestre. Pero esta condición actual y los modelos para explicarla no bastan.

Los modelos fueron importantes sólo para calcular exactamente y demostrar cuantitativamente un modelo cualitativo

de la deriva continental ideado hace cincuenta años sobre un pensamiento filosófico del siglo XVII, el cual tuvo que esperar la revolución tecnológica de nuestra época para convencer a la ciencia oficial de nuestros días.

Los depósitos minerales tienen edades diferentes y muestran una estrecha relación con la historia de la evolución tectónica de la provincia en la que están emplazados; se requiere de un análisis global y la reconstrucción de los hechos geológicos que se conjuntan favorablemente para la mineralización, sobre la base de llevar a cabo estudios detallados y especializados sin perder de vista el contexto geológico regional, como parte del conjunto que nos interesa específicamente observar y entender.

El laborioso proceso de investigar más de cien mil distritos mineros del país, fue realizado por el Consejo de Recursos Minerales. La compilación final se publicó en 1975 por Guillermo P. Salas en una obra denominada *Carta y Provincias Metalogenéticas de la República Mexicana*.¹ La distribución de los distritos mineros en

provincias fisiográficas, es la base de la regionalización de esta obra. Ello significa que el criterio básico de las provincias metalogenéticas es geomorfológico-geográfico.

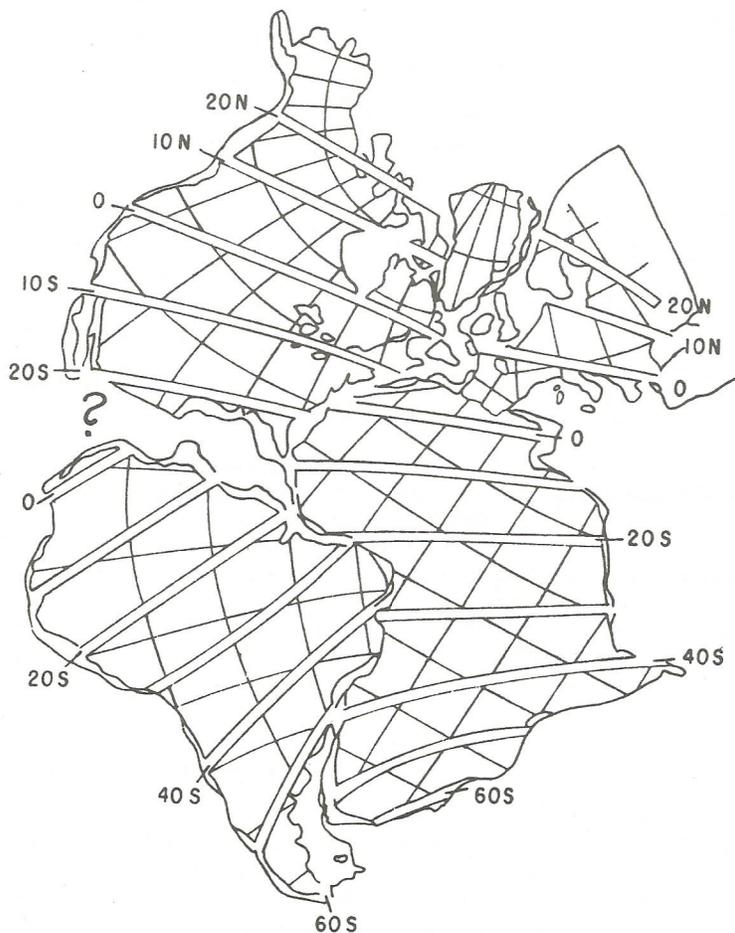
Otro trabajo que da una visión global de los recursos minerales de México lo publicó en 1981 P.E. Damon en Arizona, Estados Unidos. La distribución de los recursos minerales en franjas está basada en las diferentes edades de los grupos de depósitos, explicada en función de la evolución dinámica de la trinchera o zona de subducción del Pacífico contra el Territorio Continental de México.²

Después de numerosas propuestas para explicar la región circumpacífica, y basados en los primeros modelos de arcos insulares volcánicos y su relación con la zona de subducción de la corteza oceánica, se encontraron problemas sin explicación. Uno de ellos es el emplazamiento actual de los minerales en esta enorme región donde se localiza el territorio de México.

La falta de comprensión cabal del emplazamiento del territorio nacional y los problemas que ello acarrea, son definitivos. Es el límite sur del subcontinente de Norteamérica donde se mezclan rasgos geológico-tectónicos de los antiguos montes Apalaches Paleozóicos, la apertura Mesozóica (180 millones de años) del Atlántico y del golfo de México, así como de la Cordillera Occidental Peripacífica. Las implicaciones paleogeográficas de esta compleja unión, así como el límite sur del cratón (núcleo más antiguo del continente) Precámbrico-Paleozóico Temprano de Norteamérica, han sido una incógnita sin explicación desde hace mucho tiempo. Además, el territorio mexicano representa la transición de Norteamérica hacia la región del Caribe y Centroamérica, región que, a su vez, se mezcla con Sudamérica en la Cordillera Andina de Colombia y Venezuela (véase la figura 1).

Se sabe que el Caribe es una de las regiones mal explicadas por los modelos de tectónica de placas, inclusive en los límites controvertidos de sus placas actuales.

La parte esencial de estos problemas se relaciona con las reconstrucciones geométricas de la Pangea y con los modelos de evolución más aceptados de la apertura del Atlántico hace 180 millones de años (véase la figura 2). La reconstrucción de la Pangea plantea el traslape de Sudamérica sobre la región del Caribe y Centroamérica, incluyendo gran parte del actual territorio mexicano, lo que significa que no hay más de dos posibilidades: o las rocas expuestas en la región traslapada no existían durante el Permo-Triásico, o bien estaban en alguna otra región y fueron trasladadas a su posición presente, a lo largo de una compleja evo-



**Modelo de reconstrucción de la Pangea
(según Irving, 1964, y Bullard, 1965)**

Figura 2

La fundación Principado de Asturias

convoca los

Premios "Príncipe de Asturias" 1985.

PREMIOS

Premio "Príncipe de Asturias"
de Investigación Científica y Técnica
Premio "Príncipe de Asturias" de las
Artes

Premio "Príncipe de Asturias" de las
Letras

Premio "Príncipe de Asturias"
de Ciencias Sociales

Premio "Príncipe de Asturias"
de Comunicación y Humanidades

Premio "Príncipe de Asturias"
de Cooperación Iberoamericana

Las academias, centros culturales o de investigación, universidades, instituciones y personalidades de Hispanoamérica, Brasil, Portugal y España; pueden enviar por correo certificado o en mano, al domicilio social de la Fundación Principado de Asturias, calle Pérez de la Sala, 20, 33007 Oviedo, España, propuestas de candidatos a los Premios "Príncipe de Asturias".

Todas las candidaturas se harán llegar avaladas por alguna institución o personalidad, siendo rechazadas aquellas que no cumplan tal requisito.

Los originales presentados no serán devueltos.

La documentación para la presentación de las candidaturas a los Premios "Príncipe de Asturias" deberá estar formada por los siguientes documentos: Propuesta formal por parte de la institución o personalidad correspondiente, que contenga un resumen de los motivos de la propuesta.

Currículum vitae del candidato o candidatas, sintetizado.

Lista de publicaciones más relevantes, si procede.

Cada Premio "Príncipe de Asturias" contará de un diploma, un símbolo distintivo y representativo del Premio consistente en una escultura de Joan Miró, y una dotación en metálico de dos millones de pesetas.

El plazo de presentación de candidaturas quedará cerrado el día 20 de abril de 1985, a las 14 horas.

lución dinámica, hasta alcanzar la geometría vigente.

La movilidad implicada arroja serias dudas sobre las clásicas interpretaciones fijistas de la historia tectónica de México. Cuando esos hechos se tienen en consideración, la metalogénesis de México requiere de otra explicación.

Esto nos ha conducido a otro tipo de análisis de las rocas Permo-Triásicas, las más antiguas de México. Desde hace mucho tiempo se conoce su distribución en afloramientos diseminados sin continuidad aparente entre unos y otros.

Nuevos mapas geológicos y tectónicos se han construido especialmente en el sur de México, y nuevas interpretaciones movilizadas se han propuesto.³

El trabajo más reciente que trata también de la distribución de los recursos minerales de México se publicó en Canadá (M. F. Campa y P. J. Coney, 1983).

Los criterios de regionalización están basados en el análisis tectonoestratigráfico de las secuencias de roca (terrenos) donde se emplazan los yacimientos minerales.⁴ La simple descripción de la estratigrafía y el estilo de deformación estructural que las caracteriza, nos ha conducido a un nuevo tipo de mapas; los de terrenos tectonoestratigráficos, que intentan avanzar en la problemática de la evolución de la cordillera de Norteamérica⁵ y sus consecuencias en las provincias metalogénicas.⁶

Las implicaciones de esta geología movilizadas en la distribución de los depósitos minerales son directas y estrechas.

Los análisis preliminares de la producción histórica de plata en México (procedente de cerca de cuatrocientos distritos mineros) indican que los yacimientos de este mineral se relacionan directamente con la distribución espacial y temporal del proceso de deformación compresional laramídico (ubicado entre los ochenta y cuarenta millones de años) que afectó el occidente del subcontinente norteamericano. Al mismo tiempo, la distribución de los depósitos minerales del conjunto Ag, Pb, Zn (Au, Cu), de los cuales se ha extraído históricamente la famosa plata de México, guarda relación con el "collage" o mosaico acrecionado de filiación oceánica en la región occidental peripacífica de nuestro territorio (véase la figura 3).

¿Existen correlaciones similares con otros tipos de depósitos minerales, y qué nexos guardan con la evolución tectónica del área, específicamente con el proceso de acreción de nuestro territorio?

Los patrones de distribución espacial y temporal de los recursos minerales sugieren una estrecha relación con los antiguos fragmentos del rompecabezas del subsuelo mexicano. Lo mismo indican los depósitos más jóvenes del Plio-

Cuaternario asociados al proceso de ruptura de desplazamiento lateral del golfo de California-San Andrés y Polochic-Motagua, así como la compresión de la fosa de Acapulco-Centroamérica y el punto triple continental situado en la región occidental de Jalisco, que conforma la unión del Rift o grieta del Pacífico, contra el Sistema del golfo de California y la fosa Centroamericana.

Las conclusiones preliminares que pueden sacarse a manera de problemas por investigar, indican que los diversos conjuntos minerales están asociados a la distribución de terreno tectonoestratigráficos y su evolución histórica.⁷

El tiempo geológico que mide sucesos de millones de años con imprecisiones de sólo miles de años —exactitud lograda con la ayuda de nuestros aparatos geocronológicos modernos y con el viejo recurso relativo de los fósiles—, únicamente nos dice hoy en día que una de las tareas más importantes de la geología actual es la observación global del territorio terrestre, desconocido en porciones tan importantes como Asia, África, América Latina y el mundo desconocido de los fondos oceánicos. Sólo así podremos intentar reconstruir la evolución de la corteza terrestre, sus deformaciones y sus riquezas producidas y destruidas a través de millones de años, hasta llegar al modelo actual.

Queda claro entonces que la tarea no es nacional. Las fronteras son arbitrarias y sólo estorban al conocimiento global. Hoy la geología más avanzada es víctima de la organización social vigente, y tiene que esperar, una vez más, a que se levante la exploración en esos territorios del tercer mundo con sus científicos oficiales, que suspiran por los conocimientos estadounidenses y europeos; empeñada, al mismo tiempo, en el pragmatismo más tradicional de su utilización aplicada al saqueo irracional de sus ricos recursos minerales, que son transferidos al bienestar y riqueza del primer mundo. La separación arbitraria de la ciencia y sus aplicaciones ha causado más estragos a la geología que a las demás ciencias.

El geólogo concebido y obligado a la búsqueda de minerales económicamente rentables, es un explorador que pocos recursos tiene para meditar en las nuevas interrogantes que le ha planteado la teoría de la tectónica de placas. Debe aplicarla. Y sus bondades ya están a la vista: nuevas guías de exploración y descubrimientos de mayores reservas minerales para explotarlas.

La geología está encadenada inexorablemente a la ingeniería. ¡Pero aquélla no es ingeniería! Sus aportes fundamentales provienen del método de pensamiento filosófico, histórico, crítico, capaz de lograr la difícil síntesis de múltiples cono-

MAPA TECTONICO DE MEXICO

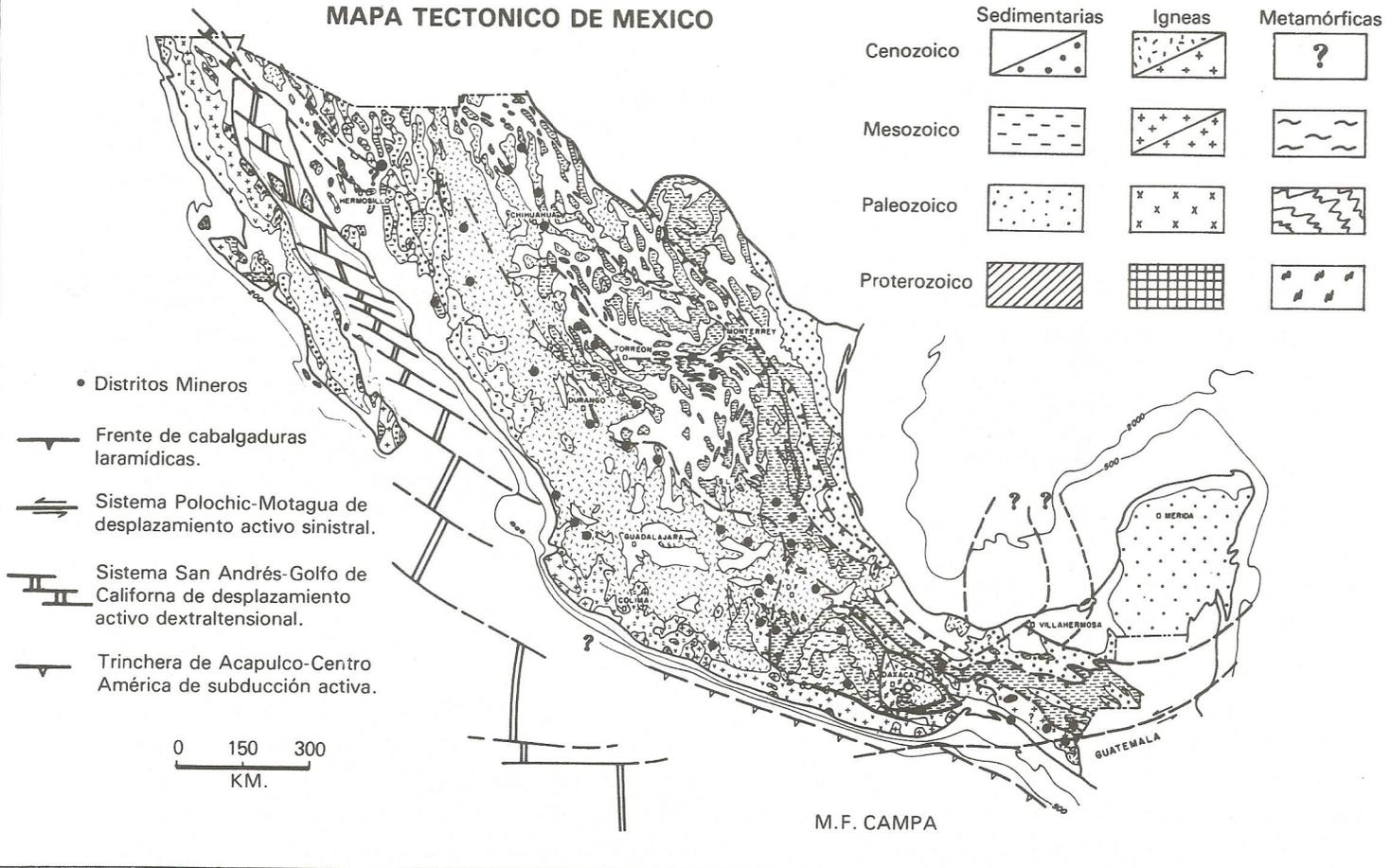


Figura 3

cimientos directos del terreno, mediciones de propiedades diversas de las rocas en el área, análisis en el laboratorio de las muestras recolectadas y de los datos indirectos detectados con los aparatos diseñados para su explotación y utilización, mismas que aportan conocimientos. Un geólogo es un especialista en las más diversas ramas del conocimiento humano y en el manejo de las herramientas tecnológicas más variadas. Pero es, ante todo, un filósofo e historiador de la Tierra, difícil oficio en el que jamás debe olvidar las transformaciones de las masas rocosas en el espacio y en el tiempo. Tiene que reconstruir los hechos históricos para buscar y encontrar los materiales que necesita hoy y los que vaya descubriendo y explotando en el futuro la sociedad de este planeta.

La astronomía abandonó existencialmente al hombre en el espacio; la biología, en el tiempo; la geología, bien puestos los pies sobre la Tierra, lo obliga a reconocer que ni las rocas están quietas, sólidas y fijas en su planeta mismo. Todo se ha movido, se mueve y se moverá inexorablemente. Los modelos de ayer se transforman en el dogma de hoy. Nos invade la moda. Los modelos de la tectónica de placas, reconocidos por la ciencia oficial que ayer los rechazaba, muestran

múltiples incógnitas que nos lanzan a nuevas investigaciones. Los geólogos de hoy deben criticar los modelos de la tectónica de placas con la esencia metodológica propia de esta teoría, que permanecerá en la historia de la ciencia como uno de sus logros fundamentales.

La geología en México tiene la palabra. Nuestro territorio pertenece a una porción de la corteza aún no explicada satisfactoriamente. ¿Cómo se originó ese pedazo de continente que no existía en el modelo de la Pangea? Es necesario pensar en otro modelo más complejo de formación y destrucción de continentes, a partir de áreas de transición entre dos bloques continentales como México, Centroamérica y el Caribe.

A pesar de las dificultades que entraña la comprensión y el uso racional de las nuevas teorías en un medio irracional, donde prevalece el pragmatismo de los negocios ligados a las compañías transnacionales y de una comercialización en crisis por las finanzas dependientes del país, los geólogos mineros mexicanos tienen una práctica profesional fecunda dentro de una de las más antiguas tradiciones del país, en la que se han producido avances científicos y tecnológicos que nos enorgullecen: la minería mexicana, que algún día será realmente de nuestro pueblo. □

REFERENCIAS

1. G.P. Salas, *Carta y Provincias Metalogénicas de la República Mexicana*. Consejo de Recursos Minerales, Publicaciones ZIE, 242 pp. y 1 mapa, 1975.
2. P.E. Damon, M. Shafiqullah, K.F. Clark, "Age Trends of Igneous Activity in Relation to Metallogenesis in the Southern Cordillera", en W.R. Dickinson y W.D. Payne, "Relations of Tectonics to ore Deposits in the Southern Cordillera", *Arizona Geological Society Digest* vol. XIV, Tucson, pp. 137-154, 1981.
3. J. Ramírez, *Los terrenos tectonoestratigráficos del Sur de México*, Sociedad Geológica Mexicana, VI Convención Nacional, Resúmenes, p. 26, 1982.
4. M.F. Campa, P.J. Coney, "Tectono-Stratigraphic Terranes and Mineral Resource Distributions in Mexico", *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 20, pp. 1040-1051, 1983.
5. N.J. Silbering y Jones D.L., ed., "Lithotectonic Terrane Maps of the North American Cordillera", *US. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map*, en prensa, 1984.
6. J.P. Albers, "A Lithologic-Tectonic Framework for the Metallogenic Provinces of California", *Bulletin of the Society of Economic Geologists*, EE.UU., vol. 76, núm 4, pp. 765-790, 1981.
7. G. Urban, "Metallogenesis en el Estado de Guerrero", Sociedad Geológica Mexicana, VII Convención Nacional, *Resúmenes*, p. 81, 1984.

para la exploración petrolera —continuó Garza Blanc—, y puede ser también muy útil en la exploración minera, aunque nunca antes se haya empleado con tal fin. Generalmente al ver una roca se piensa sólo en minerales metálicos y no metálicos; brilla y es metálico, no brilla, no es metálico. Esta visión va de acuerdo con la formación del geólogo.

“Un tipo muy importante de rocas sedimentarias contiene materia orgánica desde su formación. Es decir, se formaron en un medio donde abundan organismos que se preservaron y aparecen como microfósiles. Esos residuos de materia orgánica existen en las rocas en forma dispersa. Esta materia, que sufre diversas transformaciones desde que se origina hasta que aparece en la muestra, indica la historia geológica de la roca. Esto es posible gracias a que la materia orgánica dispersa (MOD) es más susceptible de los cambios; quiero decir que si tomamos un mineral y lo sometemos a procesos químicos y físicos, sufrirá ciertas alteraciones, no tan aparentes, como si realizáramos los mismos procedimientos en un elemento orgánico. Al analizar la materia orgánica, ésta se muestra como una radiografía de la historia de la roca. Si bien una cantidad importante de rocas contiene MOD, no aparece en todos los tipos de rocas.”

Este estudio nos recordó un trabajo que se efectúa en el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California. En él se pretende conocer la edad y los cambios físico-químicos de los océanos por medio del análisis de diatomeas (microfósiles de organismos marinos) que se sedimentan en las cuencas. El ingeniero Garza consideró que efectivamente existe mucha similitud entre uno y otro trabajos, pues los geólogos marinos aprovechan la sedimentación de la materia orgánica que se va acumulando cronológicamente junto con otros elementos (limos, arcillas, arena y materia orgánica proveniente de otras aguas) para descubrir los acontecimientos más importantes de los mares, como cambios fuertes de temperatura, presión, pH, ausencia o abundancia de organismos vivos, etcétera. Asimismo, la materia orgánica dispersa en los yacimientos minerales está presente desde las primeras etapas (procesos diagenéticos) de la materia inorgánica al formarse la roca. Ambos tipos de materia sufren los mismos cambios, aunque los efectos son más evidentes en la materia orgánica.

Finalmente el investigador agregó: “La principal determinación que se hace es la reflectometría en la MOD, porque ésta tiene cierto poder para reflejar el haz de luz. Según el ángulo de reflexión, es la madurez térmica de la materia. La tem-

peratura es un factor revelador, sobre todo en los minerales, de metamorfismo ígneo; hay cierta distribución de la temperatura dentro y alrededor del mineral. Hemos comprobado con base en ello que es posible emplear la reflectometría para medir temperaturas en rocas sedimentarias”.

Para concluir, el director del área de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la UASLP destacó que la investigación eleva el nivel académico de las licenciaturas; a pesar de que los programas de enseñanza no incluyen prácticas de investigación, sí es posible realizarlas. “Además —dijo el ingeniero David Atisha— a los que somos profesores de tiempo completo aquí nos nace el gusto por la investigación. Aunque no la practicamos permanentemente porque

hay periodos en los cuales no hay profesores que se dediquen a ello, los resultados han sido alentadores, pues se pretende en gran medida hacer un servicio social.”

La carta metalogenética viene a beneficiar a pequeños, medianos y grandes mineros, asentó Atisha. “Incluso podemos hablar ya de un pequeño triunfo. Uno de los lugares recomendados por la carta al parecer ha resultado con éxito; se trata de un ejido ubicado sobre la franja que nosotros habíamos marcado como zona mineralizada. El localizar ese yacimiento significa beneficiar a una gran cantidad de gente de escasos recursos. Por otro lado, la carta metalogenética del estado de San Luis Potosí ha sido financiada completamente por la Universidad y su costo se ha reducido un cien por ciento.” □

El material extraído de las minas pasa por una planta de beneficio para elaborar concentrados minerales útiles en la fabricación de, por ejemplo, alguna parte de la silla donde está usted sentado; probablemente el piso de su casa tenga origen en un mineral no metálico; ¿lo había pensado?

LA RIQUEZA SUBTERRÁNEA DE MÉXICO

Factor de desarrollo

ULISES LADISLAO

En México se realizan explotaciones minerales tan importantes como las mejores en el mundo. Determinar los tratamientos y procesos más convenientes para aprovechar óptimamente los yacimientos, es el desafío que deben enfrentar los profesionales y técnicos mexicanos dedicados a la industria, con el fin de obtener el mayor rendimiento, pero cuidando estos recursos no renovables.

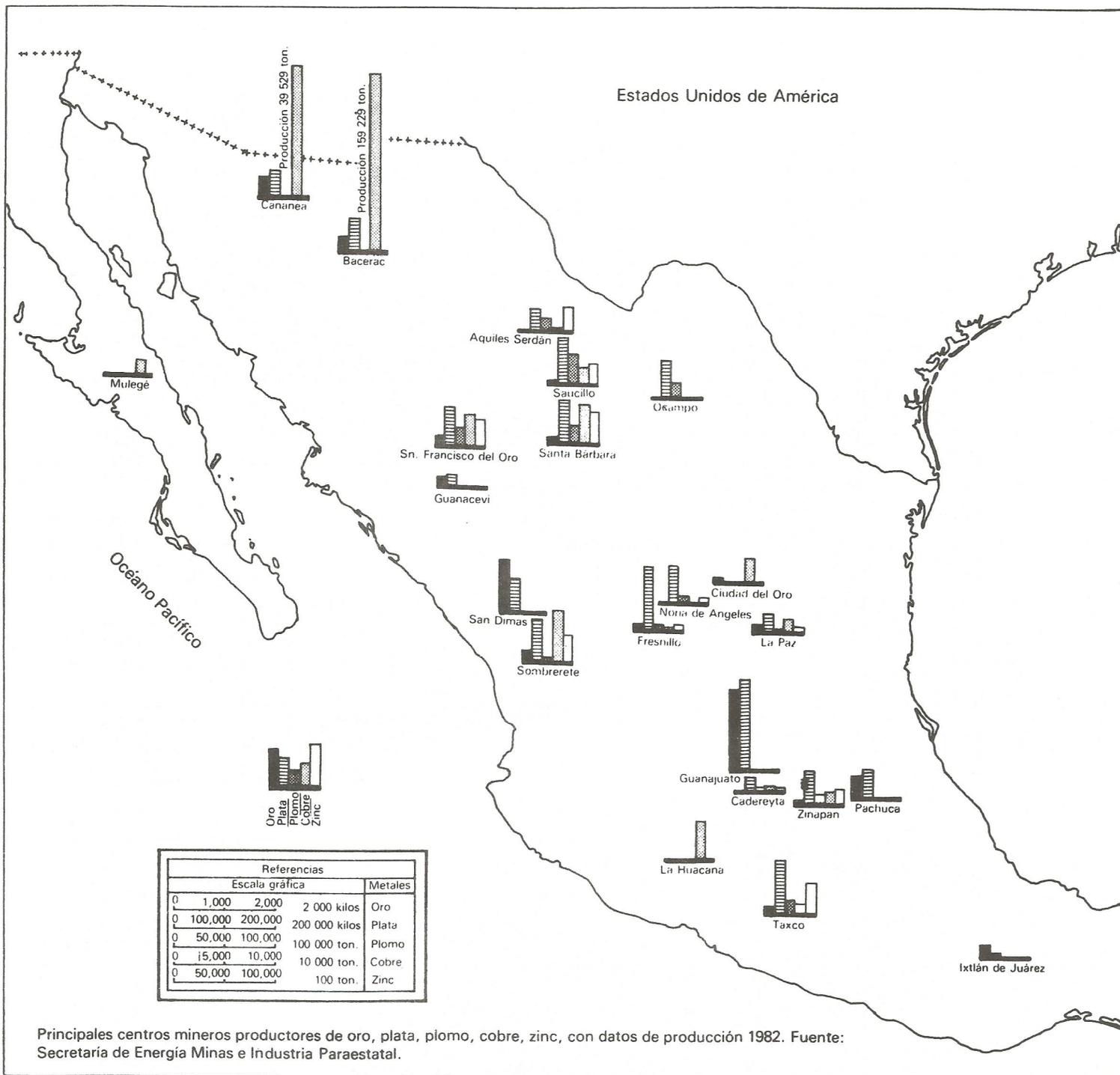
La formación de esos profesionales se lleva a cabo en un número limitado de universidades del país. Entre ellas, la Facultad de Ingeniería de la UNAM realiza investigaciones que sirven de apoyo a las empresas mineras en el aprovechamiento de estos bienes, además de crear cuadros de ingenieros de minas y metalurgistas capacitados para resolver los problemas inherentes a este campo.

Los estudios de los alumnos de los últimos semestres de la carrera están encaminados a solucionar cualquier dificultad

relacionada con la explotación y el procesamiento de los minerales (metalurgia), o la combinación de ambas ramas. Cuentan con el patrocinio de las empresas interesadas a través de un fideicomiso fundado para tales fines.

En una entrevista con *ICYT*, el coordinador de la carrera de minas y metalurgista, ingeniero Juan José Obregón, y su colega Arnulfo Bernal, profesor de la mencionada Facultad, señalaron que se trabaja tanto con compañías de capital estatal, como con las de carácter privado, pues “a fin de cuentas estamos inmersos en el ámbito de la minería nacional, así que de cualquier manera se beneficia al país”, señala el ingeniero Bernal.

“A partir de 1976 hemos participado en diversos estudios con varias empresas nacionales de uno y otro tipo. En 1961 se promulgó una ley que iniciaba la *mexicanización* de la industria minera; dicho en otros términos, demandaba que la mayor parte del capital debía proceder de inversionistas mexicanos. Hoy en día el cien por ciento de las compañías cumplen este



Principales centros mineros productores de oro, plata, plomo, cobre, zinc, con datos de producción 1982. Fuente: Secretaría de Energía Minas e Industria Paraestatal.

requisito legal”, sostiene Bernal. Sin embargo acepta que “esto no quiere decir que están exclusivamente en manos de mexicanos, ya que existen empresas con participación de capital extranjero”. Eso es lo que define el término *mexicanización*.

Juan José Obregón, por su parte, destaca que “si nos referimos al personal que labora en las empresas, desde el director hacia abajo son mexicanos”; es uno más de los alcances de la ley.

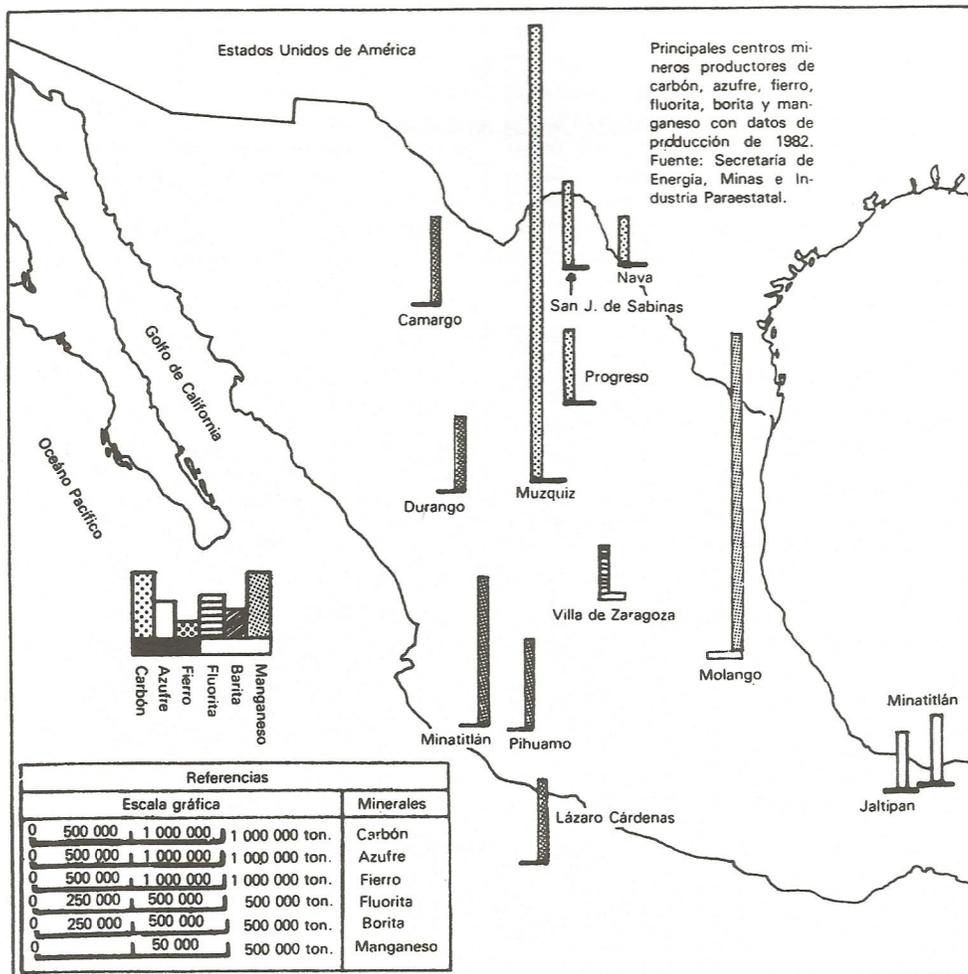
Los nuevos profesionales de la minería se encuentran ante el hecho de que México ha sido un país tradicionalmente minero. Desde la época prehispánica se extrajeron metales preciosos de sus entra-

ñas. Su riqueza en oro, plata y otros metales despertaron el deseo de conquista en los españoles. Durante la etapa colonial empieza el auge de la industria y surgen ciudades como Chihuahua, Durango, Guanajuato, San Luis Potosí y Zacatecas, entre otras, gracias al descubrimiento de ricas minas. Más tarde, en los tiempos modernos, comienza la explotación de otro grupo de minerales: los *no metálicos*, que junto con los minerales metálicos no ferrosos y siderúrgicos conforman actualmente las materias primas para la industria de la transformación.

“Quisiera agregar —interviene el ingeniero Bernal— que las técnicas mexica-

nas de obtención y procesamiento de minerales se significaron por adaptar la tecnología extranjera y por desarrollar la propia.” En la actualidad los avances de la tecnología minera provienen de unos pocos países desarrollados. Pero, según los entrevistados, lo realmente importante es la aplicación de aquella en las condiciones particulares de los yacimientos, pues éstos varían de un lugar a otro. “Un yacimiento es una unidad y debe tratarse como tal. Cualquier tipo de tecnología que quiera aplicarse tiene que crearse o adaptarse en cada caso específico”, advierte Arnulfo Bernal.

En este último aspecto existe un



ejemplo de la trascendencia de la ingeniería minera nacional: el proceso del hierro en la producción del hierro esponja; método que se utiliza comercialmente a escala mundial. Asimismo, en México se explotan minas pequeñas con tecnología nacional. “En los yacimientos minerales no hay nada escrito —previene Bernal—; lo único que vale es analizar y explotarlos adecuadamente siempre y cuando sea económicamente factible.”

Para la industria minera es imprescindible que la explotación deje dinero, de lo contrario no se invierte. Al averiguar sobre las características técnicas que debe reunir una mina para trabajar en ella, el coordinador de la carrera prefiere abordar el asunto en otros términos: “Si la inversión se puede recuperar con utilidades, la mina se explota.” Arnulfo Bernal abunda en más detalles: “La calidad del material que se produzca debe rendir lo suficiente para sufragar todos los gastos que origine la prospección de diez yacimientos, de los cuales generalmente sólo uno resulta útil; los demás representan una inversión que se pierde.”

Uno de los obstáculos que enfrenta la industria son las cotizaciones que rigen el mercado de los metales, que no siempre favorecen a los países productores. Estas, de acuerdo con lo que afirma Obregón, no las determina país ni organismo al-

guno, sino que se establecen por la ley de la oferta y la demanda en los dos únicos mercados de cotizaciones que existen: Nueva York y Londres.

Debido a este mecanismo, desde 1980 se perjudicó a la industria minera nacional al caer estrepitosamente el precio de los metales. Disminuyeron sensiblemente las exportaciones del país. La plata, por ejemplo, de la que somos el primer productor mundial, cayó de cuarenta dólares a sólo seis por onza troy. Para dar una idea de lo que sucede en el universo de los metales, el ingeniero Bernal ejemplifica: “Es muy similar a lo que pasa con el petróleo: los países consumidores siempre buscan medidas para defenderse de las alzas, tales como acumular grandes existencias del energético; de este modo presionan a los productores a que vendan barato, por lo que a la larga éstos tienen que doblar las manos para no cerrar sus operaciones.”

“En el caso que nos ocupa, la alternativa es hacerse más competentes y más productivos”, señala Obregón. Y agrega Bernal: La opción es seleccionar zonas en las minas que cubran fácilmente los costos; es decir, explotar las partes más ricas de ellas. La calidad del material no está distribuida uniformemente, por lo que se deben buscar las mejores vetas con el fin de adaptarse a las nuevas condiciones del

mercado.

“Lo ideal sería cerrar la mina temporalmente —continúa el ingeniero Bernal—, ya que tratamos con un recurso no renovable. No obstante, la legislación laboral y algunos impedimentos técnicos niegan la posibilidad; no se pueden dejar de trabajar. Las minas se abren en lugares casi siempre lejanos a los centros de población; si se cerraran estas fuentes de empleo —se pregunta—, ¿qué haría la gente que trabaja en ellas? Existen pueblos e incluso ciudades que dependen exclusivamente de esta actividad; entonces —piensa Bernal—, adiós mina, adiós pueblo. El aspecto social impide conservar los recursos no renovables mientras aumentan los precios, como sucede en otras partes del mundo.”

La minería constituye uno de los cinco sectores más importantes, excluyendo al petróleo, generadores del Producto Interno Bruto (PIB) del país. Aunque representa el 1.4 ó 1.6% del PIB, se considera como uno de los abastecedores primordiales de materias primas. Muchos de los productos que usamos cotidianamente tienen origen en las minas.

Al ingeniero Juan José Obregón no le parece justo que a la minería se le considere simplemente como abastecedora de minerales. “Como generadora de empleos es sumamente importante. Llega a lugares muy lejanos donde las condiciones son inhóspitas. Además, ha sido factor de desarrollo de la industria siderúrgica, la construcción y demás sectores. La minería actúa como fuente de divisas y ayuda a equilibrar la balanza comercial de México: exporta siempre más de lo que importa. Entre los minerales más destacados que se envían al extranjero se encuentran: el plomo, la fluorita, el azufre, el zinc y la plata. Veintiocho de los treinta y dos estados que componen la República producen minerales. Hay estados como Chihuahua, Sonora, Durango y Zacatecas que se distinguen por explotar minerales en gran escala. Otros, como Veracruz y Baja California, destacan en los no metálicos.”

Para concluir, los entrevistados se refirieron a las perspectivas de la industria minera mexicana: “Están íntimamente relacionadas con el futuro del país como nación industrializada. En la medida que desarrollemos más nuestra industria, necesitaremos más materias primas de origen mineral: en la agricultura, para la elaboración de fertilizantes; en la construcción, para levantar la infraestructura, y en la industria de bienes de capital para la fabricación de equipo y maquinaria. La minería es un promotor del desarrollo regional, por lo cual no es raro ver junto a la explotación minera un crecimiento agrícola y el desenvolvimiento urbano”, finalizó el ingeniero Juan José Obregón. □

*La minería nacional en los años recientes no ha estado al margen de la más profunda recesión económica mundial registrada desde los años treinta, y de la crisis que atravesó el país en los últimos tres. En consecuencia, ha sufrido la severa contracción en la demanda mundial de minerales y metales, por lo que ha experimentado bajas significativas en las cotizaciones internacionales de sus productos, a la vez que enfrenta el alza en las tasas de interés internacionales y la alta inflación nacional.**

ALTAS Y BAJAS DE LA MINERÍA MEXICANA

La Cámara Minera de México

JAVIER CORRO LEÓN

La minería es una de las actividades más dinámicas de la economía nacional. En 1983 su producción creció en 1.3 por ciento (en comparación con 1982). Su importancia radica no sólo en su aportación cuantitativa a la economía nacional en relación con otros sectores, sino también en su capacidad para producir materias primas estratégicas en el desarrollo nacional, en ramas como la alimentaria y la energética.

La industria minera es una de las que más ha contribuido a generar divisas y a diversificar nuestras exportaciones (en 1983 aportó 843 millones de dólares para equilibrar la balanza de pagos). Apoya un desarrollo regional más equilibrado al ocupar 211 mil trabajadores, principalmente fuera de los centros de concentración económica, distribuidos en 28 de las 32 entidades federativas. De esta forma, la actividad minera se encuentra diseminada en más de 301 municipios, de los cuales sólo diez corresponden a capitales de estado, con la circunstancia de que siete de estas últimas surgieron por obra de la minería (Pachuca, Guanajuato, Zacatecas, San Luis Potosí, Durango, Chihuahua y Aguascalientes).

La organización de esta industria depende de la Cámara Minera de México, la cual se constituyó con la autoriza-

* La información contenida en este artículo se basa en material proporcionado por la Cámara Minera de México.

ción de la Secretaría de la Economía Nacional, el 31 de marzo de 1937 y hoy cuenta con 251 empresas afiliadas. Las compañías que tienen por objeto negocios mineros y metalúrgicos sujetos a concesión en los términos de la Ley Minera, pueden inscribirse a ella ya sea como socios activos o como afiliados.

La Cámara Minera de México tiene como atribuciones y objetivos fundamentales la representación de los intereses generales de la industria minera y metalúrgica del país, así como la promoción del desarrollo de esta actividad económica. Al mismo tiempo, constituye un organismo de consulta del Estado para satisfacer las necesidades relacionadas con la industria minerometalúrgica nacional, tiene jurisdicción sobre toda la República Mexicana y está facultada para fundar delegaciones en los lugares que estime convenientes.

La historia de la explotación del subsuelo mexicano va de la mano con la de la Cámara Minera; así lo demuestran los hechos, ya que en 1961, cuando se promulgó el anteproyecto de ley minera conocido como *mexicanización de la minería*, esta organización gestionó que el gobierno diera estímulos fiscales a los nuevos inversionistas, pero también impidió la nacionalización de la industria.

La Ley de Mexicanización de la Minería estipuló que el capital de las empresas mineras, hasta ese momento en manos extranjeras, debería estar integrada en su mayoría por accionistas mexicanos en un plazo de 25 años, so pena de caducidad de las concesiones. Para

lograrlo, se ofreció a los empresarios un estímulo que consistía en la reducción del 50 por ciento en la percepción neta federal en los impuestos de producción y exportación, para así compensar en parte los riesgos propios de esta actividad.

De esta manera, se evitó el riesgo de que al excluir el capital extranjero, no se consiguiera la aportación del capital nacional, con la consiguiente destrucción de la industria.

A finales del decenio de los sesenta (época que coincidió con la culminación del proceso de mexicanización) se detectó la escasez de ingenieros de minas, los que demandaba una industria con planes ambiciosos de inversión, por lo que la Cámara promovió una campaña entre sus socios para reunir un fondo dedicado a la formación de más y mejores ingenieros de minas, hecho que permitió formar un fideicomiso que de inmediato logró sus objetivos. El número de alumnos inscritos en la carrera de ingeniería de minas en toda la República aumentó de 286 en el ciclo de 1968-1969, a 486 en el ciclo siguiente (70 por ciento más).

Para el logro de la mejor formación de estos profesionistas, se aumentaron los sueldos de los maestros de tiempo completo; se dotó de mejores laboratorios y bibliotecas a las escuelas de minas, y se patrocinaron cursos intensivos y seminarios destinados a incrementar y actualizar la preparación de los maestros.

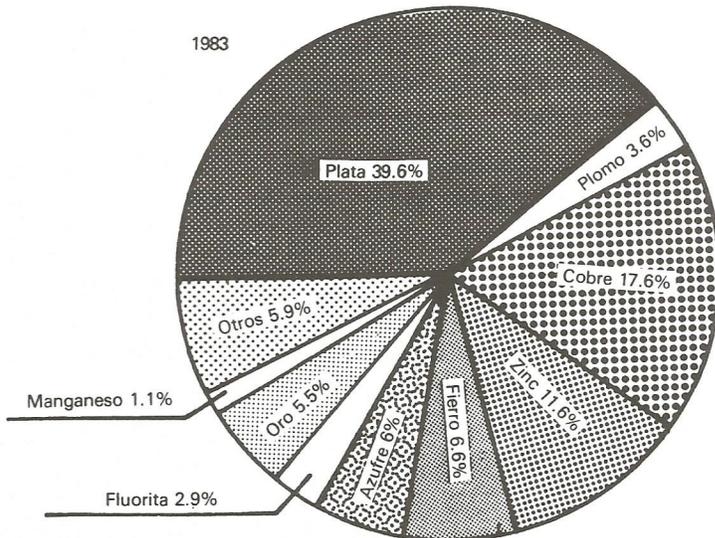
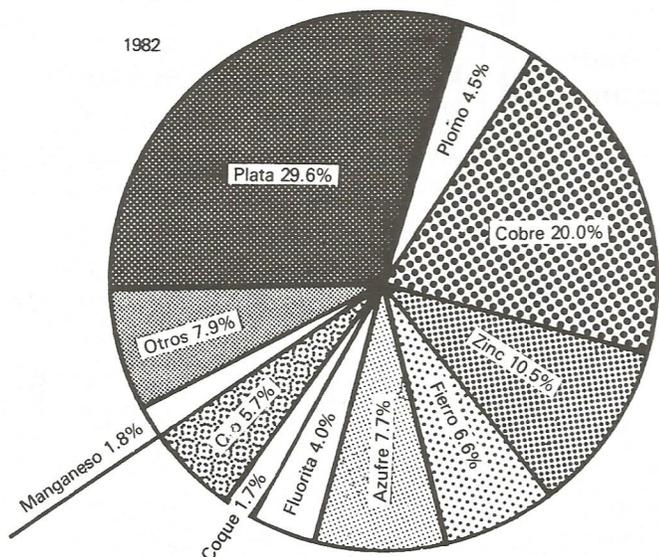
De esta manera, se evitó que al terminar la mexicanización de la minería, se presentara un grave déficit en la formación de técnicos, lo que hubiera constituido un serio obstáculo, insuperable a corto plazo.

En la actualidad, hay una larga tradición y una sólida experiencia minera en México. Existen abundantes yacimientos minerales ya identificados y una planta productiva de relieve internacional. Cerca de dos terceras partes del territorio nacional muestran condiciones geológicas favorables para ampliar el acervo de recursos naturales. Los proyectos actualmente en curso permitirán elevar la producción para el consumo interno y la exportación.

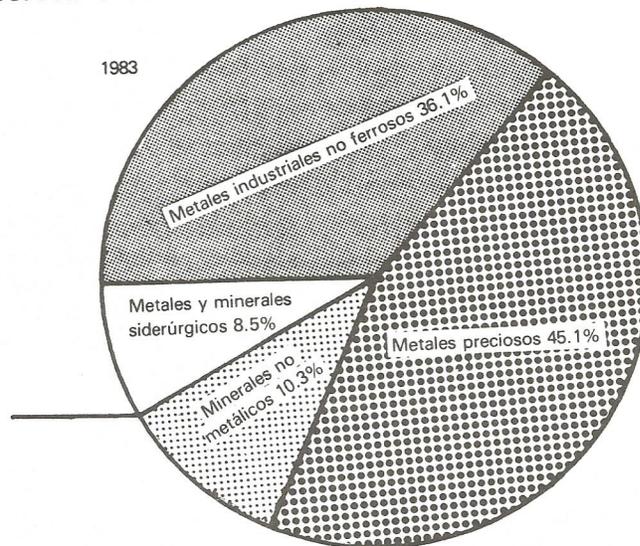
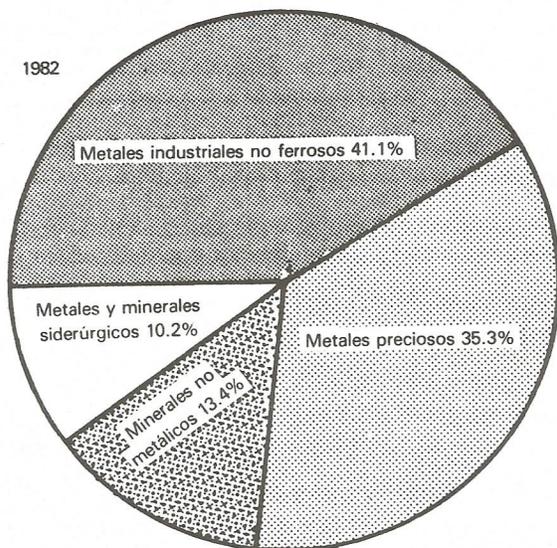
Se dispone de un marco legal preciso y adecuado, y se cuenta con una infraestructura de apoyo, extendida y diversificada, formada por el Consejo de Recursos Minerales, la Comisión de Fomento Minero y el Fideicomiso de Minerales no Metálicos.

Hoy por hoy, en la minería nacional intervienen empresas de participación estatal mayoritaria, grandes empresas privadas, pequeños y medianos mineros. La minería paraestatal, concentrada en la producción de minerales industriales de importancia estratégica, aportó en 1983

VALOR DE LA PRODUCCION MINERO-METALURGICA NACIONAL



VALOR DE LA PRODUCCION MINERO-METALURGICA NACIONAL



el 39 por ciento de la producción total del sector. Las grandes empresas privadas, algunas de ellas con participación estatal minoritaria, arrojaron el 49 por ciento. Los pequeños y medianos mineros generaron el 12 por ciento restante.

A pesar de haberse incrementado ligeramente en 1983, los precios promedio de algunos metales como el cobre y el plomo, fueron en 1983 los más bajos en 33 años, y el del zinc el más bajo desde hace 23 años. Respecto a la plata, con excepción de 1979 y 1980 en que el precio promedio fue muy elevado por presiones especulativas a nivel mundial, durante los

últimos 23 años ha mostrado una tendencia creciente de 6.9 por ciento anual en términos reales, lo cual ha permitido que la mayoría de las empresas productoras de minerales mixtos de México hayan podido mantener sus operaciones productivas.

A nivel mundial, México es el primer productor de plata, fluorita y arsénico. Ocupa el segundo en celestita y sulfato de sodio; el tercero en bismuto y antimonio; el cuarto en grafito, mercurio y diatomita, y el quinto en plomo, zinc, azufre y feldespato. Nuestro país ocupa el cuarto lugar en las reservas mundiales de plata,

fluorita, mercurio y antimonio; el quinto en azufre, barita, cadmio y plomo; el sexto en selenio y zinc, y el séptimo en bismuto y cobre.

A partir de 1961, con la promulgación de la Ley Minera, que inició la mecanización de la industria minerometalúrgica que culminó diez años después con la Compañía Minera de Cananea, el dominio de la nación sobre los recursos del subsuelo, la rectoría del Estado y la participación equilibrada dentro del modelo de economía mixta, son los principios fundamentales que orientan el desarrollo de la minería mexicana. □

El geógrafo Alejandro de Humboldt (1769-1859) decía que México es una placa de plata, mineral que abunda en todo su suelo y del que por mucho tiempo ha sido primer productor mundial.

ERIKA GONZÁLEZ EHRlich

Como en muchos órdenes de la naturaleza, la geografía mexicana fue dotada de enormes recursos mineros. Algunos de ellos son de los más antiguos, incluso de los más ricos en el mundo. Su exploración y explotación se encuentran protegidas por leyes de nacionalización que aseguran para nuestro país más del 50 por ciento de las acciones de las empresas.

Existen ciertos metales como el hierro, el cobre, el aluminio, el plomo y el zinc, que han sido destacados por su importancia estratégica, esto es por ser fundamentales para la industria y, por lo tanto, para el crecimiento económico del país.

No obstante, en México no se ha creado todavía la carrera de geología. Para cursarla nuestros investigadores necesitan estudiar en el extranjero. Este es el caso del doctor Fernando Ortega Gutiérrez, quien nos dice: "Inicié mi profesión como geógrafo, aunque mi verdadera vocación desde pequeño era ser geólogo. Pero me encontré con la sorpresa de que en México no se imparte la geología como ciencia básica sino como una disciplina de la ingeniería. Ingresé entonces en la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM para estudiar la carrera de geografía. El campo profesional era muy reducido, por lo que me dediqué a dar clases. Sin embargo, me seguía gustando la geología, decidí estudiar la carrera de ingeniero geólogo; al terminarla tuve la oportunidad de ir al extranjero a estudiar geología científica en la universidad de Leeds, Inglaterra, donde obtuve mi doctorado.

"Al regreso, una de mis metas ha sido pugnar por que se cree la carrera de geólogo en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Sin embargo existen una serie de

intereses que han impedido que esto se logre.

"Actualmente ocupo un puesto administrativo como jefe del Departamento de Geología de la UNAM, además de realizar trabajos de investigación y docencia." Los yacimientos mineros, su búsqueda, los diferentes métodos para detectarlos y los diversos sistemas de explotación, resultan temas que el doctor Ortega aborda de manera clara y precisa. Conversar con él resulta una verdadera clase de geología.



Elaborar un mapa geológico es la base fundamental para la localización de un yacimiento mineral, en él se registran las rocas que constituyen la corteza terrestre en la región donde se está haciendo el estudio.

CÓMO FUNCIONA...

Cómo se define un yacimiento mineral

Es una concentración anómala de un metal —dice—, un lugar donde ocurre una abundancia superior por muchos órdenes de magnitud a la que normalmente existe de este metal en las rocas de la corteza terrestre. También se define un yacimiento mineral en función de su poten-

cial económico, ya que puede suceder que exista una concentración anómala muy importante, pero que no sea costea-ble su explotación.

Desde el punto de vista químico, cualquier elemento puede constituir un yacimiento mineral, siempre y cuando cumpla con las condiciones de concentración superior mencionadas anteriormente.

Cómo se localiza un yacimiento mineral

En la localización de un yacimiento mineral intervienen varias disciplinas, como son la geofísica y la geoquímica; la pri-

El lenguaje de las rocas



La explotación de los yacimientos minerales puede ser subterránea o a cielo abierto, dependiendo del grado de diseminación del elemento en las rocas. (Fotos. The Cambridge Encyclopedia of Earth Sciences. Crown Cambridge)

mera se basa en medir las propiedades físicas de las rocas, tales como densidad, transmisión de calor, electricidad y magnetismo. Este tipo de pruebas físicas de las rocas permite, por ejemplo, localizar un yacimiento de hierro; éste forma un mineral llamado magnetita, que tiene propiedades magnéticas, por lo que estudiar las propiedades magnéticas de la región será de gran utilidad para encontrar esta magnetita en concentraciones anómalas, que por definición constituirán un yacimiento mineral.

Existen también otros métodos geofísicos: como los geoelectrónicos y los gravimétricos, que se valen de las propiedades físicas de la materia que medidas por instrumentos diseñados específicamente para reponder a estas anomalías de las rocas, son auxiliares en la localización de yacimientos.

La segunda disciplina, la geoquímica, permite encontrar las zonas potencialmente ricas de los yacimientos y muchas veces conduce al geólogo al lugar donde se encuentra la concentración del elemento, pues todo lo que el investigador tiene que hacer es atenerse a las leyes que gobiernan la distribución y migración de los elementos en la corteza terrestre. Así, el geólogo puede seguir la

pista de yacimientos minerales y encontrar los lugares en donde haya podido concentrarse en función de un cierto ambiente químico característico de los diferentes metales que se estén buscando. Hay ambientes que están controlados por las propiedades físicas y químicas, así como por las condiciones geológicas. Todos estos elementos contribuyen a localizar un determinado tipo de mineral.

Otros indicios para localizar yacimientos

Existen también indicios geológicos que pueden darnos los tipos de rocas que hay en una cierta región.

Muchas veces es unívoca la asociación de ciertos metales con algunas rocas. Entonces, con sólo identificar una roca, en principio se sabe qué tipo de minerales puede contener.

Pongamos un ejemplo: las rocas *ultrabásicas*, que son abundantes en magnesio y pobres en sílice, son en cambio muy ricas en metales como el cromo y el níquel; entonces, en los recorridos de campo, al identificar rocas ultrabásicas, automáticamente se piensa en la posibilidad de encontrar yacimientos de níquel y cromo.

La coloración del suelo sería un indicio importante para descubrir yacimientos minerales, ya que los colores rojizos son producto de la oxidación de metales ricos en hierro. Por ejemplo; una coloración de tipo rojizo puede sugerir la presencia de metales oxidados y, por lo tanto, la existencia de un yacimiento mineral en esas condiciones.

Los estudios geológicos

Antes que nada y como base fundamental para la localización de un yacimiento mineral, está el estudio geológico: la elaboración de un mapa geológico en el que se registran las rocas que constituyen la corteza terrestre en la región donde se practica la investigación. Se clasifican las rocas en tres grupos fundamentales: ígneas, sedimentáreas y metamórficas. Cada uno de estos grupos tiene una serie de variedades que puede representarse en un mapa, dependiendo de su extensión, su geometría o su estratificación.

Los estratos son capas. Las rocas se depositan en cuerpos acuosos, en superficies más o menos planas que van acumulándose en forma de capas. Otras no lo hacen así, sino que se consolidan en forma de cuerpos masivos, como las rocas ígneas, que provienen de grandes profundidades; muchas de ellas surgen a la superficie y se derraman como capas de lava, pero si no llegan a la superficie se forman masas sin estratificación dentro de la corteza terrestre. A estas se les llama rocas intrusivas.

Volviendo a los mapas geológicos - comenta el doctor Fernando Ortega--

toda la información se registra en ellos: no solamente el tipo de roca, sino su aspecto y forma geométrica. También se trata de reconocer su contenido fósil, ya que en función de éste se podrá determinar la edad de la roca. Actualmente existen métodos más directos, basados en la desintegración radiactiva de muchos elementos que contiene la roca misma. Gracias a los avances de la ciencia y la tecnología, se puede hoy en día conocer la edad de todo tipo de rocas.

En resumen, para hacer un mapa geológico primero hay que estudiar y clasificar los tipos de roca; segundo, estudiar y representar su forma geométrica, y tercero, determinar su edad. Estos tres elementos constituyen el mapa geológico que permitirá descubrir un yacimiento mineral.

Tipos de explotación

Acerca de los tipos de explotación minera, se practican la subterránea y la que se hace a cielo abierto: esto quiere decir que ciertos materiales se encuentran diseminados cerca de la superficie, al grado que en ocasiones es necesario explotar toda la roca, mientras que hay otro tipo de yacimientos que se concentran en vetas, en cuerpos tubulares que llevan direcciones específicas, por lo que no es necesario explotar toda la roca, sino que se sigue solamente la veta para extraer el material económicamente explotable. Para seguir la veta es necesario hacer laboreos subterráneos.

Los metales que ahora se encuentran en estado sólido fueron transportados en fluidos acuosos; el agua caliente disuelve los metales y los hace circular a través de las rocas; entonces, si esta circulación se da por una fractura ancha, se consolida allí la veta, pero si esta circulación se hace a través de múltiples fracturas muy pequeñas, el metal se dispersa en un volumen importante de roca de manera homogénea.

Para la exploración y explotación de los recursos del subsuelo, el gobierno mantiene una serie de instituciones dedicadas a la búsqueda de yacimientos minerales. Entre las más importantes se encuentran el Consejo de Recursos Minerales y la Comisión de Fomento Minero; y, desde luego, Petróleos Mexicanos.

Estas instituciones se dedican a la búsqueda y explotación de yacimientos, aunque también el Estado faculta a los particulares para hacerlo, como se especifica en el Artículo 27 de la Constitución.

Finalmente, teniendo en cuenta las enormes riquezas minerales con que cuenta México, resulta increíble pensar que hasta la fecha no se dé a la geología la importancia y difusión que requiere, comentó el doctor Fernando Ortega Gutiérrez. □