

LOS RECURSOS MINERALES

*«El cerro es rico todavía - me decía sin asombro
un desocupado que arañaba la tierra con las manos -.
Dios ha de ser, figúrese: el mineral crece como si
fuera planta, igual.» Frente al cerro rico de Potosí,
se alza el testigo de la devastación.
Es un monte llamado Huakajchi,
que en quechua significa «cerro que ha llorado».
Desde sus laderas brotan manantiales de agua pura,
«los ojos del agua» que dan de beber a los mineros...
Convertidas en piñas y lingotes,
las vísceras del cerro rico alimentaron sustancialmente
el desarrollo de Europa.*

Eduardo Galeano

Uno de los elementos centrales en el debate sobre los límites al crecimiento cero es el argumento de que los recursos naturales no renovables pueden agotarse en un periodo relativamente cercano. Dentro de esos recursos cabe hacer una distinción entre los minerales y los combustibles fósiles. Este capítulo concierne a los minerales.

La civilización moderna, sus patrones de desarrollo y estilos de vida, se sustentan en el uso de una gama sumamente amplia de recursos minerales existentes en la corteza terrestre y en los fondos marinos, que son transformados, gracias a la tecnología, en materiales susceptibles de ser usados por la sociedad.

Durante la década de los setenta, en pleno auge del neomalthusianismo, espoleado por las crisis petroleras de 1973 y 1978, y cuando el debate sobre los límites al crecimiento y el crecimiento cero, se señalaba que el consumo anual mundial *per cápita* de productos minerales era de 3.37 toneladas métricas, con una tasa de crecimiento de 7% promedio anual. El promedio ocultaba grandes disparidades: así, en Estados Unidos era de 15 toneladas métricas anuales *per capita*. El argumento era que el desarrollo requiere cada vez mayores cantidades de minerales, no sólo para mantener la tasa de expansión de las economías centrales, que absorben 80% de la producción mundial, sino también para acelerar el desarrollo en los países del tercer mundo. Si la expansión del consumo de minerales se proyectaba al nivel de su ritmo histórico, 7%, se afirmaba que antes del 2020 se requerirían 32 veces más minerales de los usados en la década de los setenta; pero si la tasa debe incrementarse a fin de reducir la brecha de consumo entre países industrializados y en desarrollo y además acelerar el desarrollo de estos últimos, la presión sobre los recursos «no renovables» se multiplicaba varias veces. La pregunta de moda era: ¿hasta qué punto la corteza terrestre puede suministrar esos minerales, habida cuenta que se trata de recursos no renovables?

Lo anterior lleva al examen de dos aspectos relacionados: qué se entiende por recursos y cómo se miden sus disponibilidades; y qué se entiende por no renovabilidad. La literatura

existente provee diversas interpretaciones, por lo general reflejando los puntos de vista particulares de cada disciplina. Los geólogos y los ingenieros tienden, por lo general, a referirse a medidas puramente físicas, tales como las partes por millón de un mineral específico existente en la corteza terrestre, o lo que ha sido definido por Harris y Skinner como la dotación de minerales de la tierra. Sin embargo, este tipo de medida es de escasa utilidad para fines de política económica, o para analizar la eventual escasez de un mineral sobre los patrones de desarrollo o el ritmo de crecimiento económico de un país. La medición de las disponibilidades de minerales deben incluir aspectos concernientes a los costos de producción, a los precios, a los requerimientos de inversiones y a las características físicas y químicas de los minerales.

El distinguir entre recursos renovables y no renovables ha demostrado tener poca relevancia. En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, en Estocolmo, se enfatizó el problema del agotamiento de los recursos «no renovables», se mostraron proyecciones de diferente tipo: unas pronosticando el colapso definitivo de la especie humana por el agotamiento del petróleo y otros recursos minerales; otras contrarrestando tales proyecciones. Curiosamente más tarde en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, en Río de Janeiro, la preocupación dominante era: la escasez de agua, la pérdida de diversidad biológica, la desaparición de los bosques, el agotamiento de los recursos del mar, la degradación de las tierras agrícolas; todos éstos considerados recursos renovables. El problema es, en definitiva, de cómo se utilizan los recursos; es un problema de gestión de recursos naturales, gestión que puede ser sustentable o no sustentable. Lo que implica inmediatamente una dimensión fundamental: la temporal. La diferencia entre los recursos está determinada por la escala temporal de renovabilidad de los mismos y su sustentabilidad determinada por la relación entre la tasa de crecimiento de la reserva de los mismos y su tasa de extracción o cosecha. Si las tasas de extracción superan las de crecimiento de la reserva el recurso corre el riesgo de agotarse, y se dirá que su explotación es insostenible.

Permanentemente se forman cuerpos mineralizados: es sabido que el cobre y el oro se forman debajo de ciertos volcanes, y el cobre y el zinc en algunas zonas de los fondos marinos; el petróleo se forma en diversos lugares del mundo, de la misma manera que la tierra fértil en tiempos que van de 10 a 50 y 100 años, o que determinados bosques se renuevan en periodos que van desde unas cuantas décadas hasta 100 años. Fundamentalmente es un tema de horizontes temporales determinados por la vida humana y los tiempos del mundo natural, y asociado con ello el ritmo al cual se realiza la extracción.

Al parecer, la cantidad existente de minerales es enorme. Sin embargo, para satisfacer las necesidades industriales del mundo moderno, su abastecimiento queda circunscrito a un tipo especial de rocas con concentraciones elevadas de ciertos elementos y que representan una fracción pequeña de la corteza terrestre. Lo importante es entonces el grado de concentración de un elemento específico en una determinada localización, elemento que, dada una cierta tecnología, es susceptible de ser extraído a costos convenientes desde el punto de vista social.

En función de lo anterior los recursos minerales se podrían definir como las concentraciones naturales de elementos existentes en la corteza terrestre en forma tal que puedan ser potencialmente extraídos y procesados, dados los conocimientos científico-tecnológicos

existentes.

Según Amílcar Herrera,^{¶ "84"} la capa sólida de la corteza terrestre en que están contenidos los recursos mineros, es de un espesor que fluctúa entre 32 y 40 km. En las actuales explotaciones mineras, la profundidad media alcanza 300 m raramente supera 2 000 hasta alcanzar, en casos muy excepcionales, 3 000 m. En esta corteza terrestre los elementos requeridos por el sistema social se encuentran entonces en diversos grados de concentración. A medida que esta concentración disminuye, se llega a un punto en el que las partículas de los elementos no son susceptibles de ser separadas, y están integradas en la estructura cristalífera de las rocas y otros minerales de la corteza terrestre. En este nivel se dice que los elementos se presentan en la abundancia característica de la corteza terrestre. Los elementos de la corteza terrestre susceptibles de ser utilizados deben de presentarse en concentraciones mínimas, generalmente con combinaciones específicas: óxidos, sulfuros, sulfatos, carbonatos, y en algunos casos aparecen en estado nativo. En este nivel se puede hablar ya de recursos propiamente dichos. Es decir, hay un límite que separa aquellos elementos de un cierto grado de concentración de los mismos elementos, dispersos, integrados en la estructura de la corteza terrestre en concentraciones infinitamente pequeñas. Tal límite es un límite mineralógico determinado por características químicas y geológicas, y obviamente varía según los diferentes productos.

Schurr y Netschert^{¶ "85"} elaboraron un sistema de clasificación que distingue entre reservas, recursos y recursos base. El concepto de recurso base se refiere a la suma total de elementos, minerales o fuentes energéticas, existentes en la corteza terrestre. Es una medida de disponibilidad de minerales puramente física, enormemente amplia. Para dar un ejemplo, el U.S. Geological Survey ha estimado los recursos base de cobre en 1.5×10^{15} toneladas.^{¶ "86"} Un volumen que, a los ritmos actuales de explotación, garantizaría el abastecimiento por lo menos por otros 200 millones de años. Obviamente la cifra carece de valor práctico, la mayor parte de esos recursos cupríferos o están en lugares inaccesibles o sus procesos de extracción y concentración son demasiado complejos y por consiguiente caros.

Para fines prácticos y como primera aproximación, interesan aquellos elementos que están por encima del límite mineralógico y que, de acuerdo con la clasificación de Schurr y Netschert se califican como recursos. Se tiene así una masa de recursos minerales. De éstos, algunos se conocen con cierto detalle, mientras que otros se calculan por métodos científicos o se supone su existencia gracias a los conocimientos geológicos disponibles en ciertas zonas.

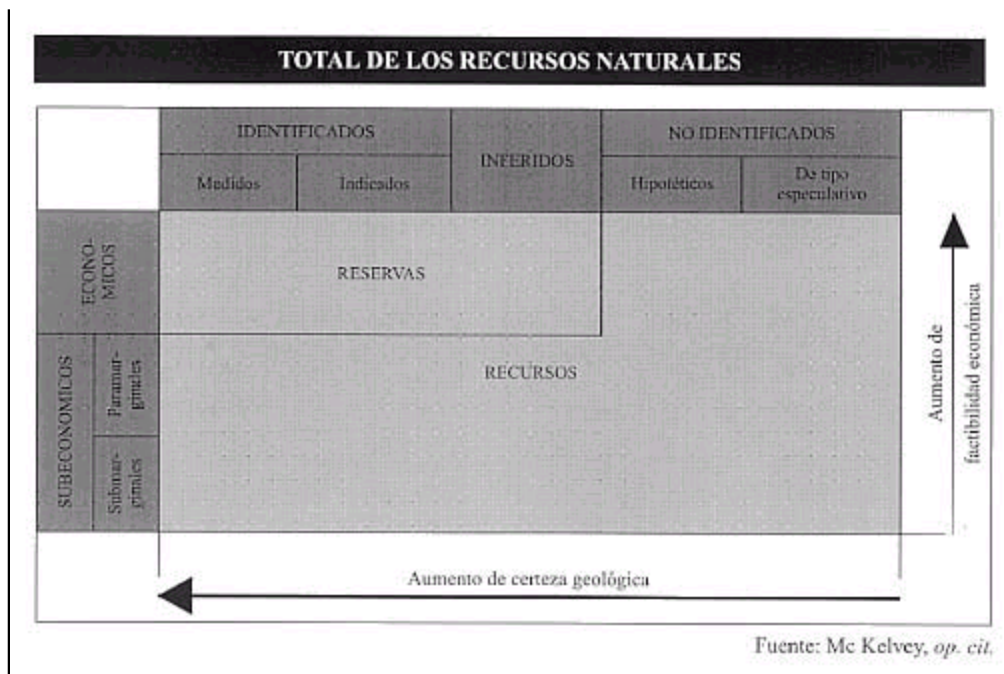
La segunda aproximación consiste, entonces, en separar los recursos entre aquellos que han sido positivamente identificados y los no identificados o aún no descubiertos. Esta distinción se muestra gráficamente con un rectángulo que representaría la totalidad de recursos identificados y no identificados, conocido como clasificación de McKelvey.^{¶ "87"} Esta clasificación es un avance de la clasificación de Schurr y Netschert, y distingue entre reservas probadas, probables y posibles, y entre recursos recuperables, paramarginales y submarginales.

La clasificación de McKelvey deja fuera todos aquellos recursos que no son reservas y recursos, en aras de la mayor precisión de lo que realmente es conocido y asequible. Por otro lado, llega a precisiones más convenientes para el uso práctico al englobar bajo el

concepto de factibilidad o viabilidad los efectos tecnológicos, de precio y costos, por desgracia sin desarrollar ampliamente las implicaciones de cada uno de estos factores, o la forma como ellos se interrelacionan.

Los recursos identificados, suelen a su vez dividirse según la exactitud del conocimiento sobre sus características y volúmenes. En 1933 Leith^[1 "88"] había hecho ya una clasificación en términos de recursos probables y posibles. Esta clasificación fue reemplazada por los conceptos de «medidas, indicadas e inferidos», propuestos por Blondell y Lasky en 1956^[1 "89"] y adoptados posteriormente por la U.S. Bureau of Mines y el U.S. Geological Survey. Estos conceptos se fundamentan en el conocimiento de las dimensiones del cuerpo mineralizado. En el caso de los recursos medidos e indicados su existencia ha sido demostrada por estudios geológicos, que han permitido medir sus dimensiones principales y las características, y leyes del mineral o de los cuerpos mineralizados. Los recursos inferidos son aquellos cuya existencia ha sido comprobada, pero cuyas magnitudes, en términos de volumen, y sus características mineralógicas no se conocen con exactitud y se infieren de algunas de sus dimensiones o características geológicas conocidas.

Hasta aquí el único elemento considerado en la identificación de los recursos minerales es el de la existencia de ciertos elementos, en concentraciones diversas y en ciertos volúmenes. Este conocimiento de su existencia, su distribución en la corteza terrestre, la forma como se presentan, sus características mineralógicas, etc., nos proporcionan una dimensión física y básicamente geológica de los recursos. Es este mínimo conocimiento el que nos señala la potencialidad de recursos aún no descubiertos. El conocimiento de los fenómenos geológicos y las características de los elementos conocidos, sus procesos de génesis, permiten una



extrapolación geológica que, de acuerdo con el grado de precisión, puede tener un carácter hipotético o especulativo. En el primer caso, la extrapolación se lleva a cabo en áreas mineras relativamente conocidas y, por lo tanto, concretas que permiten suponer la presencia de ciertos elementos. La extrapolación de carácter especulativo se lleva a cabo en áreas aún no suficientemente conocidas o, a veces, del todo desconocidas, y de las cuales se tienen

conocimientos geológicos muy generales. Con base en lo anterior, la sección del gráfico de recursos no identificados o por descubrir se puede dividir en dos grandes secciones, según las potencialidades más o menos ciertas de ocurrencia de minerales.

Pero este conocimiento geológico, físico, de la disponibilidad de recursos es insuficiente desde el punto de vista socioeconómico. No basta con conocer la existencia de elementos que pueden satisfacer necesidades; es preciso que esas existencias físicas puedan ser extraídas, transformadas y procesadas para posibilitar su uso, es decir, se requieren conocimientos científicos y técnicos que posibiliten que la existencia física se transforme en una disponibilidad real. Dicho conocimiento científico-tecnológico tiene a su vez que cotejarse con su costo económico, es decir, la extracción, la transformación y la utilización de los recursos minerales tienen que efectuarse en condiciones económicas aceptables por la sociedad. El concepto de recursos debe ser entonces calificado mediante un conjunto de parámetros tecnológicos y económicos. La disponibilidad real o efectiva de recursos minerales viene entonces definida por la existencia física de recursos comprobados por técnicas de prospección geológica y consideraciones tecnológicas y económicas en relación con la factibilidad de su extracción, transformación, procesamiento y consumo. Mas aún, se podría restringir todavía más el concepto incluyendo la idea de rentabilidad o beneficio económico de la explotación, así se trataría de un concepto de recursos limitado a aquellos elementos de la corteza terrestre que pueden ser explotados con ganancias pecuniarias. Se incluirían aquí estimaciones relacionadas con diferentes niveles de rentabilidad en diferentes niveles de precios, costos y concentraciones del mineral. Se podrían incluir otros parámetros restrictivos, por ejemplo, normas ambientales que establezcan prohibiciones o umbrales mínimos de calidad ambiental. Respecto a lo primero podrían considerarse límites a explotaciones mineras en ciertas áreas (por ejemplo, en terrenos agrícolas) o, en relación con lo segundo, normas de emisiones de contaminantes, con lo cual el volumen de recursos se restringe nuevamente.

Esta variable técnico-económica se indica en el cuadro en forma de dimensión horizontal que permite distinguir dos áreas: la superior, que se define como de recursos económicos, y la inferior, como subeconómica. Podrá apreciarse que la sección izquierda superior del cuadro ha quedado perfectamente delimitada por una línea que separa los recursos identificados de aquellos no identificados, y por un límite inferior que separa aquellos recursos identificados, susceptibles de ser extraídos --y utilizados con la tecnología disponible en condiciones económicamente aceptables-- de otros recursos cuya explotación no es factible por razones de índole técnica o económica.

Estos recursos identificados y susceptibles de ser extraídos, procesados y utilizados en condiciones económicas convenientes con la tecnología disponible, reciben el nombre de reservas. Por debajo de la línea de factibilidad técnico-económica tenemos los recursos subeconómicos. Siempre siguiendo el esquema propuesto por McKelvey, estos últimos pueden, a su vez, clasificarse en recursos paramarginales y submarginales; los paramarginales son aquellos identificados y susceptibles de ser explotados con la tecnología existente, pero a costos 1.5 veces superiores a los actuales; a su vez, los recursos submarginales son los que pueden ser explotados, pero a costos 2 o 3 veces superiores a los vigentes.

Las cifras de reservas de minerales son las que habitualmente se emplean en las discusiones sobre la disponibilidad de recursos, los debates sobre la escasez y las proyecciones catastróficas de algunos informes. Pero las reservas son sólo una parte pequeña de los elementos existentes en la corteza terrestre; son parte de un sistema dinámico y no pueden inventariarse como si fueran existencias finitas y definitivas.

Así como el concepto de recurso base es demasiado amplio, el de reserva es extremadamente restrictivo, ellas incluyen solamente las partes más ricas de los depósitos conocidos, y cuya explotación es rentable en las actuales condiciones tecnológicas y económicas. Son una pequeñísima parte de los recursos base, volviendo al ejemplo del cobre las reservas actuales (1987) serían del orden de los 5.1×10^8 toneladas, es decir se tendría una cifra de reservas equivalente a menos de $3.4 \times 10^{-5} \%$ de la cifra de recurso base, y dados los ritmos actuales de explotación garantizaría su suministro por unos 63 años. ¹"90"

La información de que se dispone corresponde, en gran medida, a las minas actualmente en operación, y por lo general, las empresas no proporcionan información respecto a las variaciones de disponibilidades de recursos al variar la ley de corte del mineral. La evaluación de reservas cambia de año en año, tanto por reducciones causadas por las extracciones como por adiciones que resultan del mayor conocimiento de las minas en explotación, cuyas prospecciones se hacen más fáciles y económicas, *pari passu* con la explotación o por innovaciones tecnológicas. En general, la empresa minera desarrolla los trabajos geológicos de prospección, necesarios para evaluar una magnitud mínima del yacimiento, que permita su explotación y una recuperación de la inversión, dada una cierta tecnología y una situación de precios imperante en los mercados mundiales. Para la empresa minera las reservas son un capital, resultado de esfuerzos económicos y tecnológicos en exploración, prospección y preparación de la mina, etapas que, por lo común, se extienden por varios años durante los cuales la empresa no recibe ingreso alguno. Por lo tanto, ella no está motivada para invertir en la detección de nuevas reservas más allá de un límite tal, que le permita una programación adecuada en un cierto plazo, de tiempo que varía según los productos y las características de explotación. Una vez determinada la factibilidad, se inicia la explotación del yacimiento. Por tanto, el inicio de explotación de un yacimiento no tiene que coincidir con una evaluación definitiva de sus reservas, y de hecho las informaciones estadísticas son por lo común inferiores a las reales. A medida que la explotación avanza, se van haciendo nuevas prospecciones, facilitadas en gran medida por la explotación misma. Es así como las compañías revisan constantemente sus cálculos de reservas.

En 1912, cuando se inició en Chile la explotación del Mineral del Teniente, se le predijo una vida de 25 años. Hoy, después de 85 años, el Teniente sigue siendo la mina de cobre subterránea más grande del mundo. Al cumplirse los diez años de explotación del mineral de hierro de Marcona, en Perú, parecía que su proceso de agotamiento se estaba completando. Exploraciones realizadas en la base del yacimiento revelaron un nuevo cuerpo mineralizado de 400 millones de toneladas de minerales de hierro. Al iniciarse la explotación del mineral de hierro del Romeral en Chile, las reservas se calculaban en 30 millones de toneladas. Después de 20 años de explotación a una tasa de dos a tres millones de toneladas anuales, las reservas del yacimiento se calculaban, a mediados de los setenta, en 180 millones de toneladas métricas.

En otros casos, la explotación de un yacimiento permite el descubrimiento de otros minerales. Por ejemplo, la mina de Mount Ise, en Kingsland (Australia), explotada durante muchos años por su zinc y su plomo, reveló en su fondo un enorme yacimiento de cobre. El concepto de reserva no proporciona una medida adecuada respecto de las disponibilidades a largo plazo de recursos minerales. En realidad, el concepto, aun cuando pueda ser muy preciso técnicamente, es estático: mide una cantidad de minerales en un momento dado, es decir, una existencia de recursos, definida por el conocimiento habido, la tecnología disponible y las condiciones económicas nacionales e internacionales que determinan una situación de costos y precios. Si se aceptase un concepto de escasez como característica de una situación dinámica de desequilibrio entre oferta y demanda, el concepto de reservas también resultaría inadecuado como indicador de la escasez, pues una situación dinámica como la indicada no puede evaluarse con un concepto estático, sino utilizando otro, también dinámico, determinado por las posibilidades de innovación tecnológica, los nuevos descubrimientos, la posible reducción de los costos de extracción o la aparición de recursos complementarios.

Lo anterior refleja que los conceptos de reservas y recursos deben ser considerados con cierta flexibilidad. Proyectar el agotamiento total de un recurso sobre las bases de las cantidades de reservas publicadas en determinada fecha no tiene mucho sentido. Tal concepto refleja sólo la cantidad de minerales conocida dentro de ciertos márgenes y susceptible de extraerse con tecnologías existentes a un costo compatible con las condiciones de los mercados internacionales, en una fecha precisa. Sobre este aspecto conviene, además, recordar que las cifras de reservas, publicadas por las grandes compañías mineras y por los gobiernos, son inferiores a las conocidas, pues, en general, las compañías prefieren mantener estas informaciones en secreto. Las nuevas expansiones realizadas en la minería del cobre chileno en los últimos 15 años revelaron muy poca información respecto de los volúmenes de las reservas en explotación, pero ciertamente significa un aumento importante de las reservas mundiales de cobre.

El grado de concentración o ley del mineral es un factor fundamental en la determinación de los volúmenes de recursos y reservas disponibles. La ley del mineral indica la cantidad de metal por unidad de material estéril. Los minerales económicamente utilizables son concentraciones de ciertos elementos que, asociados con otros en cantidades variables, constituyen lo que se llama un yacimiento. Históricamente, el desarrollo tecnológico, combinado con la disponibilidad de energía barata, ha hecho posible usar cuerpos mineralizados de concentraciones cada vez menores, es decir, de leyes cada vez más bajas, o que se presentan en compuestos diversos. El problema adquiere así otra connotación. No se plantea ya cuánto mineral existe en la corteza terrestre, sino hasta qué niveles de concentraciones puede llegar la explotación, dada una cierta tecnología, el costo por emplear dicha tecnología, así como el costo y la disponibilidad de recursos energéticos necesarios para su extracción y transformación.

Según algunos expertos, la experiencia en explotaciones mineras sugiere que hay una relación negativa entre la ley del mineral y el volumen del cuerpo mineralizado:^{11 "91"} a medida que la ley del mineral disminuye, parece que el metal disponible aumenta en progresión geométrica hasta llegar a un punto máximo, a partir del cual tiende a presentarse una situación en la que

tanto la ley del mineral como los volúmenes del mismo disminuyen ^{11 "92"}, ^{11 "93"} Skinner sugiere que la situación podría ilustrarse con la gráfica siguiente, que indicaría que el agotamiento de minerales de alta ley viene más que compensado por el incremento de volúmenes susceptibles de ser explotados a leyes de corte inferiores. Sin embargo, el mismo Skinner advierte que esta teoría no está probada y que no debería alimentar euforias expansionistas (véase gráfico de Skinner).

Otra interpretación esquemática es el triángulo de Govett, reproducido en el gráfico siguiente, donde la base del triángulo representa el total de recursos conocidos y no conocidos dada la ley del mineral más baja posible en un periodo de tiempo determinado.

A medida se sube hacia el vértice superior, aumenta la ley pero disminuye el volumen. La parte achurada del gráfico corresponde a los recursos conocidos, clasificados en los términos tradicionales de reservas medidas, indicadas e inferidas, y recursos conocidos pero no explotables por razones técnicas o económicas.

El desarrollo tecnológico mueve el límite «L» hacia abajo, y las exploraciones geológicas exitosas la línea «R» hacia la izquierda, aumentando el área achurada.

Las posibilidades de explotar minerales de menor ley son en función de la tecnología disponible, de la energía y de su costo y el costo total de la operación. Históricamente, estos factores se han combinado de modo favorable para posibilitar la explotación de recursos minerales de leyes cada vez menores. El caso del cobre es el que más frecuentemente se cita. Al iniciarse este siglo, la ley de corte en los minerales de cobre era en algunos casos de hasta 6%; en 1980 era de 0.4%. Lasky, ^{11 "94"} ha demostrado cómo aumentan rápidamente las reservas a medida que la ley media baja. Tal demostración es la que utiliza la President's Material Policy Commission de Estados Unidos para la estimación de las disponibilidades de materias primas.

A su vez, Landsberg ^{11 "95"} hacía, hace 20 años, los siguientes cálculos: la disponibilidad de cobre, considerando leyes que fluctúan entre 2 y 6%, es de 200 millones de toneladas. Si se incluyen minerales de cobre con leyes hasta de 1% la cifra anterior llega a 500 millones de toneladas. Y si la ley se baja 0.5% las reservas de los yacimientos conocidos alcanzarían 1 000 millones de toneladas. A este respecto hacía notar que las tecnologías disponibles permitían la explotación de minerales de hasta 0.4% de ley, y que el promedio de los minerales de cobre en explotación en Estados Unidos tenía leyes de 0.6%.

Con base en las consideraciones anteriores, lo lógico es suponer que la magnitud de reservas disponibles de minerales tiende a aumentar rápidamente a medida que declinan sus leyes, y que este aumento es mayor en leyes menores. En otras palabras, parece lógico suponer que una reducción de la ley de corte en los minerales de cobre de 0.6% a 0.5%, que es la que se produjo en la década de 1960, se tradujo en un aumento de reservas de minerales significativamente superior al incremento de reservas resultante de una reducción de la ley de corte de 3 a 2.5% como la que se había producido en las décadas anteriores.

Históricamente, los descubrimientos han ido creando nuevas reservas que han más que

compensado aquellas que se han agotado. Para el caso del cobre, se ha señalado que en 1940 las reservas mundiales se calculaban en 100 millones de toneladas métricas de metal; a fines de 1974 las reservas se calculaban en 382.3 millones de toneladas métricas de metal, pero hay que considerar que la producción de cobre acumulada entre 1950 y 1973 fue de 107.8 millones de toneladas métricas. Por lo tanto, el aumento neto de reservas de cobre fue de 390.1 millones de toneladas métricas de metal, cifra que *no* incluye el cobre contenido en los nódulos de los fondos marinos. Finalmente, los recursos potenciales se calculaban en 2 120 millones de toneladas métricas, y los recursos en 1 770 millones, incluyendo 690 millones de toneladas de nódulos de los fondos marinos.

El informe del gobierno norteamericano Global 2000, ¹"96" resume la situación de disponibilidades de los principales minerales, agrupándolos en reservas y recursos, englobando aquí los recursos que de acuerdo con la descripción anterior se han calificado como subeconómicos (paramarginales y submarginales) y los recursos potenciales que indicarán los volúmenes de recursos no identificados aún. Las cifras se resumen en el cuadro siguiente:

**Reservas mundiales, recursos y recursos potenciales
(millones de toneladas métricas)**

	Reservas	Recursos	Recursos potenciales
Aluminio	5.200 (a)	2.800 (a)	3.519.000
Hierro	93.100 (b)	143.000 (c)	2.035.000
Potasio	9.960	103.000	--
Manganeso	2.200 (d)	1.100 (e)	42.000
Fósforo	2.400 (f)	12.000	51.000
Fluorita	72 (g)	270	20.000
Azufre	1.700	3.800 (h)	--
Cromo	780 (i)	6.800	3.260
Zinc	159	4.000	3.400
Níquel	54	103	2.590
Cobre	456	1.770 (j)	2.120
Plomo	123	1.250	550
Estaño	10	27	68
Tungsteno	1.8	3.4	51

Mercurio	0.2	0.4	3.4
Plata	0.2	0.5	2.8

Fuentes: Global 2000, informe técnico cuadro 12.7.

Nota:

- (a) En bauxita base seca promedio 21% Al recuperable.
- (b) En minerales y concentrados promedio 50% Fe recuperable.
- (c) En minerales y concentrados promedio 26% Fe recuperable.
- (d) En minerales y concentrados promedio 40% 100. Mn.
- (e) No incluye nódulos de manganeso de los fondos marinos.
- (f) En roca fosfórica y concentrados 13% P.
- (g) En «fluospar», roca fosfórica y concentrados promedio 44% fluorita.
- (h) No incluye recursos no identificados de azufre, en enormes cantidades de azufre en anhidritas y calizas, en petróleo y aproximadamente 600 000 millones de azufre contenido en carbones, esquistos, etcétera.
- (i) En minerales y concentrados promedio 32% cromo.
- (j) Incluye 690 millones de nódulos de fondos marinos.

Las proyecciones de agotamiento de minerales, sobre todo cuando son de largo plazo, tienen que manejarse con mucho cuidado. Si bien es cierto que también se pueden producir alteraciones de los cálculos en el lapso de pocos años. En efecto, los cambios en las magnitudes conocidas de reservas varían en el plazo de pocos años. Por ejemplo, si se toman solo tres importantes recursos mineros; cobre, hierro y aluminio, resulta que, según el United States Bureau of Mines,^{1"97"} entre 1974 y 1976 sus reservas aumentaron en porcentajes realmente importantes: 12% para el cobre, 2.8% para el hierro y 41% para la bauxita.

Esto lleva a examinar el argumento de Brobst,^{1"98"} en el sentido de que el esquema de McKelvey tiene que ser ampliado por la consideración de la posibilidad de descubrir recursos cuya existencia hoy no se concibe y de incorporar el proceso económico a aquellos recursos que se podrían calificar como no económicos y que caen fuera de los subeconómicos (submarginales y paramarginales). Se tendrá así un cuadro como el siguiente:

El argumento esgrimido por Brobst sostiene que lo que consideramos como recurso, son los elementos cuyas características y capacidad de satisfacer necesidades conocemos. Pero en la corteza terrestre existen muchos elementos cuya utilidad se desconoce aún y para los cuales, lógicamente, no existe demanda económica alguna y, probablemente, ni siquiera una tecnología adecuada para su extracción y su procesamiento. Estos elementos se incluyen en el esquema de McKelvey. Sin embargo, es válido suponer que en cuanto se descubran sus posibilidades de uso y se desarrollen las tecnologías adecuadas, serán considerados como recursos. El mismo Brobst señala que, hasta la fecha, materiales que contienen 80 de los 90 elementos naturales identificados en la corteza terrestre han sido incorporados al proceso económico, y menciona además el caso de la esfalerita, un sulfuro de zinc descubierto en la cuenca del Illinois, compuesto mineral que no sólo no había sido descubierto, sino que además ni siquiera se concebía su existencia.

Por otro lado, el límite inferior del esquema de McKelvey señala un límite técnico-económico potencial definido por las características de la tecnología disponible y una relación de costos. Pero Brobst señala que esto no significa necesariamente que no existan minerales que puedan, desde un punto de vista geológico y mineralógico, ser explotados; en otras palabras,

ese límite inferior sólo indica el grado de concentración, o ley mínima de valor económico potencial de un material demandado por el sistema socioeconómico. Pero desde un punto de vista estrictamente mineralógico, las posibilidades de recuperar metal de minerales se extiende hasta el punto en que es posible la formación separada de partículas de ciertos elementos, que podrían ser explotadas con fines económicos si existieran en cierta abundancia.

Más abajo del grado de concentración que permite la formación de partículas separadas, los elementos se encuentran dispersos en la estructura de las rocas o de otros elementos, incluyendo las rocas comunes de la corteza terrestre. Se tiene así un nuevo límite definido exclusivamente por dimensiones geomineralógicas. En función de esto, conviene revisar los planteamientos sobre el agotamiento de los recursos minerales.

En general, todos los sistemas de clasificación de recursos adolecen de un defecto, son estáticos: indican la reserva de un determinado mineral, bajo ciertas condiciones preestablecidas, en un cierto momento. Los recursos minerales no constituyen una reserva definida. Este es un concepto estático que desconoce tanto las potencialidades del sistema natural como del sistema social para generar nuevos conocimientos y técnicas. Tanto el concepto de reservas como el de recursos deben ser examinados en una perspectiva esencialmente dinámica. Sus magnitudes y características cambian constantemente como resultado de los cambios en los patrones de consumo, en el desarrollo de mayores conocimientos, el desarrollo de nuevas técnicas, un mayor y más detallado conocimiento de la tierra y, finalmente, por los cambios en las condiciones económicas. Esta dinámica se puede ilustrar con el mismo esquema de McKelvey y en la versión ampliada de Brobst. En el esquema cabe apreciar que el desplazamiento desde la base hacia arriba indicaría una creciente viabilidad técnico-económica, mientras que el desplazamiento desde la derecha hacia la izquierda del cuadro va señalando mayor certeza y conocimiento geológico.

Las reservas pueden variar, por lo tanto, dependiendo de fluctuaciones en las estructuras de costos y precios que pueden hacer viable la explotación de recursos paramarginales, o hacer inviable la de otros que estaban siendo explotados. Por ejemplo, alzas sustanciales y sostenidas en los precios de un determinado mineral motivarán la incorporación de recursos paramarginales a las reservas económicamente explotables. Esto hace que se incrementen también los volúmenes de recursos paramarginales, por el paso de recursos submarginales, a la categoría de paramarginales. Un efecto similar se produce por una baja en los costos de extracción y transformación. En este caso, la causa puede estar asociada a un desarrollo tecnológico.

En ambos casos, el aumento de las disponibilidades se reflejaría, en el esquema, por un desplazamiento hacia abajo, de las líneas que separan las reservas de los recursos paramarginales y éstos de los submarginales, eventualmente por un desplazamiento, siempre hacia abajo, de la línea del límite económico-potencial.

Algunas consideraciones adicionales parecen convenientes. El límite económico que separa las reservas de los recursos, está definido por las características del recurso propiamente tal y las características técnicas y económicas del proceso productivo. Es decir, por la forma de combinarse los factores de producción para la obtención del producto final. La combinación más adecuada dependerá de los lugares y el momento histórico. Así, la combinación de una tecnología de alta productividad junto con otros factores de producción subvaluados --por

ejemplo, energía y mano de obra-- puede traducirse en cuantos recursos geológicamente similares sean en algunos casos considerados marginales mientras en otros como reservas. La subvaluación histórica de la mano de obra en los países en desarrollo ha ido asociada con desarrollos tecnológicos que han facilitado los procesos extractivos y de transformación. Ambos fenómenos se vinculan, además, con un periodo caracterizado por la subvaluación de los recursos energéticos, en especial los combustibles fósiles. Estos factores económico-tecnológicos se combinaron con un mayor conocimiento geológico en los países en desarrollo, que daban la impresión de existencias de recursos mineros en calidades y cantidades muchas veces superiores a las reales de los países desarrollados.

La importancia del desarrollo tecnológico en el proceso extractivo explica la incorporación de minerales de menores leyes al concepto de reserva. Entre 1850 y 1880 el costo de extracción de cobre bajó considerablemente a pesar de la disminución de las leyes promedio desde 6% hasta 4% a finales de siglo, lo cual fue posible por las mejoras en la forma de explotación introducidas por los métodos *square-set-mining* y *block-caving*, que redujeron los criterios de selectividad.^{1 "99"}, ^{1 "100"}

Posteriormente, el rápido desarrollo de los métodos de explotación a cielo abierto permitieron la incorporación de grandes cantidades de minerales relativamente superficiales y de leyes menores, proceso éste asociado al desarrollo de los equipos mecánicos para remoción de tierras y manejo de grandes cantidades de materiales, y facilitado por la disponibilidad de energía barata.

Los procesos de flotación fueron un avance tecnológico que permitió una reducción adicional en las leyes de corte hasta menos del 20%, a consecuencia de lo cual la escala de operación pudo aumentar con bajas considerables en los costos.

La cantidad de recursos identificados --y entre ellos las reservas-- puede incrementarse gracias a mayores y más detalladas prospecciones geológicas en áreas conocidas o por conocer que permitan confirmar recursos hipotéticos, y/o por las exploraciones de regiones geográficas desconocidas que hagan posible confirmar estimaciones de carácter especulativo sobre la existencia de determinados recursos. En este caso, las líneas que separan los recursos identificados de aquellos no identificados tienden a desplazarse hacia la derecha del cuadro, aumentando por lo tanto, el área correspondiente a los recursos indicados.

Si el agotamiento de los minerales se determina fundamentalmente por razones económicas, entonces es importante examinar qué factores son los que definen las variaciones de costos. La primera se refiere a las características del recurso natural, más específicamente concierne a aspectos tales como distribución, naturaleza de los minerales, calidad. Estas características determinan la curva de oferta del mineral, *ceteris paribus* el resto de los factores. Pero esta curva de oferta será diferente de la habitual en otras actividades productivas: en agricultura se produce un flujo de bienes año tras año y, si la gestión es adecuada, ese flujo se puede mantener indefinidamente. Con mayor razón el argumento es válido para la industria, pero en el caso de la minería el flujo carece de importancia, lo que cuenta es la producción acumulada en los periodos anteriores y su relación con la reserva conocida. Esta relación explica las tendencias a largo plazo de los costos y por consiguiente de los precios, habiendo supuesto constante el desarrollo tecnológico y de nuevos descubrimientos. La explotación incurre en costos crecientes, ya que comienza a explotar depósitos de menor calidad.

Un segundo conjunto de factores, supuesto constante en el ejemplo anterior, es el mayor conocimiento, las mayores exploraciones, los avances tecnológicos, el precio de la energía. En una perspectiva de largo plazo el cambio tecnológico es el más importante, y de acuerdo con la experiencia histórica su efecto ha sido el de contrarrestar las alzas de costos, asociadas a la disminución de la reserva y a la explotación de minerales de menor calidad. Finalmente, hay que considerar los factores determinantes de la demanda, entre éstos no sólo las preferencias de los consumidores, el ingreso, los gustos, etc., sino también aspectos particulares de este sector, como el reciclaje y la sustitución, los cuales han sido importantes por el ahorro de material virgen que implican. Está también la mayor eficiencia en las actividades productivas industriales que tienden a utilizar menos materias primas por unidad de producto final, fenómeno que se conoce como desmaterialización del proceso productivo. Se calcula que en lo que va del siglo la desmaterialización es del orden de 3%.

Durante la década de los sesenta y comienzos de los setenta se constató un rápido crecimiento de la demanda de minerales, lo que junto con el alza de los precios del petróleo alimentó los temores de agotamiento de recursos. Pero justamente en esos mismos años se desaceleró el crecimiento de la demanda, lo cual por un lado alejó los temores de agotamiento y por otro explica una relativa sobrecapacidad en el sector minero, debida a las inversiones que las expectativas de los años anteriores crearon y no se cumplieron.

Existe una correlación importante entre el contenido metálico y los requerimientos de energía necesarios para recuperar el metal: los minerales de alta ley y relativamente simples, asociados a procesos tecnológicos también simples, tienden a minimizar la utilización de energía. El consumo energético en la actividad minera es función de la ley del mineral, los métodos de extracción y los procesos de transformación a los que hay que someter el mineral para obtener el producto final. En la fase de explotación minera propiamente dicha, el tipo de mineral tiende a tener poca influencia en la cantidad de energía requerida, considerando otros factores constantes --dureza y calidad de la roca, profundidad, etc.--, la energía para extraer una tonelada de material es similar sin importar cuál sea la ley del mineral.

Las explotaciones subterráneas son considerablemente más consumidoras de energía que aquéllas a tajo abierto. Sin embargo, si la sobrecarga por remover en una explotación a tajo abierto es muy grande, dicha ventaja se pierde, como es el caso de muchas explotaciones cupríferas de Estados Unidos que tenían en los ochenta una relación mineral/estéril de 2.5.

La energía necesaria en los procesos de concentración con base en métodos de separación física de los minerales depende fundamentalmente de las características físicas y químicas del mineral. De nuevo los consumos varían notablemente cuando se trata de rocas duras o de minerales aluviales. En este último caso, los procesos de perforación, tronadura, chancado y molienda se evitan o minimizan, con el consecuente menor consumo energético. ¹⁰¹

Cuando las leyes del mineral son muy bajas no es posible la concentración física. En este caso, se emplean métodos químicos o térmicos, y los requerimientos energéticos variarán según los procesos empleados.

Tanto la explotación minera propiamente tal, como la concentración, se han visto afectadas por la tendencia histórica a la reducción de las leyes de los minerales económicamente

explotables. Es tradicional que los recursos de mejor calidad tienden a ser explotados primero. Con el aumento de la demanda y la disminución de la reserva de recursos de alta calidad, recursos de inferior calidad se incorporan a la explotación, por lo general resultando en un mayor costo por unidad de metal obtenido, con mayores requerimientos energéticos y mayores volúmenes de material estéril. En el caso de Estados Unidos, los promedios de las leyes de minerales de fierro y cobre fueron de 55% y 1.1%. En los ochenta eran de 34% y 0.6% respectivamente. Las proyecciones indican que el promedio de las leyes de cobre será -siempre en Estados Unidos-- de 0.3% en el año 2000. Esto quiere decir que los requerimientos energéticos para recuperar una tonelada de cobre se habrán prácticamente, duplicado. Además, será necesario ubicar 2 000 millones de toneladas de rocas estériles y colas de concentración anuales, el doble de lo que se descargaba en 1977. [v "102"](#)

La relación inversa entre los requerimientos energéticos y la ley del mineral ha sido constatada históricamente. Los minerales de más baja ley requieren una mayor remoción de material, mayores esfuerzos de molienda y concentración, todos altamente intensivos en uso de energía. Dado que gran parte de los recursos necesarios para el hombre existen en concentraciones bajas en la corteza terrestre, se ha llegado a afirmar que con energía abundante y barata, no habría límites para la explotación de ciertos minerales.

Por ejemplo, los requerimientos de energía en el caso del cobre se mueven en relación inversa con la ley del mineral y directa con la profundidad del yacimiento, como ha sido demostrado por Cook en las minas peruanas de Cuajone y Toquepala. [v "103"](#) El mismo autor señala que a comienzos de siglo sólo eran económicamente aprovechables aquellos recursos de más de 3% y que la ley de corte a mediados de los setenta había caído a 0.35%. A ese nivel, la producción de una tonelada de cobre lleva asociada la remoción, el chancado, el transporte de 300 toneladas de roca y una cantidad similar de material estéril removido, proceso que requiere una cantidad equivalente a 26 000 kilovatios por hora.

A medida que las leyes bajan, la cantidad de material por remover y la cantidad de energía necesaria tanto para el proceso de extracción como por el de molienda aumentan por unidad de cobre recuperado. Cook muestra cómo aumentan estos requerimientos energéticos, comparando los datos de la mina de Cuajone, en Perú, para diferentes leyes, y también comparando distintas minas. Con ello se revela que los requerimientos son más bajos en El Teniente, para subir lentamente en Chuquicamata y Exótica (todas minas de Chile), alcanzando niveles más elevados en Toquepala (Perú). Los requerimientos de energía por tonelada métrica de cobre son más elevados en Estados Unidos, con el caso extremo de Sierrita (Arizona), que casi duplica los requerimientos de El Teniente. Las leyes promedio son de 0.4% en Sierrita y de 1.8% en la mina chilena.

En la explotación cuprífera a cielo abierto de Estados Unidos, la ley del mineral disminuyó 27% entre 1963 y 1973, equivalente a una tasa anual compuesta de 2.4%. Esta disminución en la ley media de los minerales de cobre estuvo asociada con un aumento de 22% en los requerimientos de energía por libra de cobre, o una tasa anual compuesta de 22%, y para el proceso completo, que va desde la extracción al refinado, pasando por los procesos de concentración y fundición, los requerimientos energéticos por libra de cobre aumentaron 16% en el mismo periodo.

Con base en estas consideraciones, algunos autores opinan que la energía requerida para

producir una unidad de metal es la que en realidad determina el límite para definir la potencialidad de los recursos en cuanto a su utilización por la sociedad. El límite extremo se da por debajo del que Brobst denomina límite mineralógico, ya que por debajo de ese límite la cantidad de roca por remover para extraer una tonelada de mineral es extraordinariamente elevada. El mismo Brobst lo ilustra para el caso del cobre: si la concentración de cobre en la corteza terrestre es de 50 gr por tonelada métrica, la obtención de una tonelada de metal a partir de los silicatos en que se encuentra, obliga a una remoción de 20 000 t de roca. Pero si la ley del mineral es de 0.1% (cifra señalada como el límite mineralógico para el cobre) entonces la cantidad de roca por remover es de 1 000 para obtener una tonelada de metal (a partir de sulfuros). Si se calcula un tipo de cobre de 0.5% típico de la explotación norteamericana, la obtención de una tonelada de metal requiere la remoción de 200 toneladas.

Los yacimientos no son cuerpos mineralizados homogéneos, no sólo las leyes del mineral pueden variar apreciablemente en diferentes partes del mismo, sino que además los minerales, por lo habitual, vienen en compuestos, óxidos, sulfuros, etc., lo que ofrece la posibilidad, dependiendo de la disponibilidad de tecnología y de los costos que ello signifique, de recuperar otros elementos de valor comercial. Así, por ejemplo, de la explotación de cobre se obtiene además molibdeno, azufre, arsénico, oro, plata, platino, etcétera.

En estos casos el costo energético para su extracción está ya imputado al del mineral principal, y su proceso de transformación tiene un costo energético imputable, sólo a partir del momento que su proceso se separa del mineral principal. Por ejemplo, en el caso del molibdeno, cuando se encuentra asociado con minerales de cobre, como en el caso chileno, su ley es de aproximadamente 0.02% de molibdeno, lo que equivale e menos de la décima parte de los minerales de molibdeno típicos. Esas pequeñas concentraciones de molibdeno se recuperan conjuntamente con el cobre en el proceso de concentración. El costo energético de recuperación del molibdeno puede, en esta fase, considerarse cero, ya que ha sido imputado al consumo energético del metal principal. El costo energético imputable a la producción de molibdeno en este caso es aquel en que se incurre por la flotación selectiva de la molibdenita a partir del concentrado de cobre y del procesamiento de los óxidos de molibdeno. El consumo energético de esta fase se estima en 13×10^6 BTU por tonelada.

Lo anterior no puede generalizarse. Según Hayes,¹¹¹⁰⁴ cada material tiene su propio nivel de requerimientos energéticos; por tanto, el balance energético debe ser considerado no sólo en el proceso productivo mismo, sino en función del sistema económico total. Por ejemplo, una tonelada de acero requiere, aproximadamente 25×10^6 BTU, en tanto que una tonelada de aluminio requiere 245×10^6 BTU. Si el análisis se limita a ese nivel de consumo energético, parece obvia la conveniencia de producir acero en vez de aluminio. Pero una tonelada de acero ocupa un tercio de volumen de una tonelada de aluminio. Así, la sustitución del aluminio podría reducir grandemente el ahorro de energía por volumen de material usado. Por otra parte, si los productos tienen que ser movidos mediante distintos sistemas de transporte, el hecho de que el aluminio sea más liviano vuelve a traducirse en nuevos ahorros energéticos.

Si se examina el problema en términos aún más amplios --abarcando el balance energético a nivel sectorial, regional o nacional-- las posibilidades de reciclaje introducen un nuevo elemento por considerar. El reciclaje del aluminio ahorra aproximadamente 97% de energía en relación con las necesidades para obtenerlo a partir de material virgen (bauxita). En el

caso del acero el porcentaje de ahorro de energía fluctúa entre 10% y 47%. Las diferencias en los requerimientos de energía para obtener materiales a partir de chatarras, mediante procesos de reciclaje, o a partir de recursos vírgenes por extracción y procesamiento de minerales, tenderán sin duda a aumentar en la medida que las leyes de corte sean más bajas, los minerales se encuentren geográficamente más dispersos o su localización sea más inaccesible. Esto nos lleva nuevamente al examen de los problemas de los costos.

La discusión en torno a la escasez de recursos naturales, siguiendo la tradición ricardiana, indica que ella se reflejará en incrementos sucesivos y persistentes de los costos de extracción. En el caso de la actividad minera, la ubicación más desfavorable --respecto de los mercados-- de los nuevos yacimientos y las persistentes caídas en las leyes de corte deberían haberse reflejado en costos crecientes. Sin embargo, parecería que estas presiones hacia alzas de costos se han visto neutralizadas por el progreso tecnológico, y que este avance tecnológico seguirá ejerciendo un efecto similar en el futuro. Herfindhal ha hecho notar que la extracción de cobre se ha efectuado a costos decrecientes pese a la caída en las leyes de corte. En general, la tendencia a la baja de los costos en la extracción minera fue estudiada y comprobada por Barnett y Morse¹⁰⁵ para los años 1870-1957. El trabajo posterior de Smith.¹⁰⁶ que abarca hasta 1972, confirma esta tendencia a la caída de los costos.

Una de las contribuciones más interesantes en relación con la economía de los recursos minerales es el de Norgaard,¹⁰⁷ que muestra cómo la economía asociada a la tasa de cambio tecnológico que lleva a costos de extracción menores es mucho mayor que la que inicialmente se había supuesto. En el caso de la industria petrolera, Norgaard hace notar que entre 1939 y 1968, el costo de perforación de pozos petroleros se redujo entre 53% y 87% gracias al desarrollo tecnológico. De no haber existido este desarrollo tecnológico, el efecto combinado de la mayor profundidad de los pozos, las mayores dificultades geológicas, el menor porcentaje de éxito en la exploración petrolera, etc., se habrían traducido en un alza de los costos de perforación de 223% en el mismo periodo.

Evidentemente, los requerimientos de energía no son los únicos que pueden llegar a ser críticos. Otros pueden deberse al agua, factor de producción fundamental en la actividad minera, que generalmente escasea, sobre todo en las regiones donde se lleva a cabo esta actividad económica.

En resumen, examinar el problema de los recursos minerales en función de una concepción estática de recursos o reservas y confrontarla a una presión dinámica: crecimiento poblacional, aumento y diversificación del consumo, lleva inevitablemente a conclusiones catastróficas. Los recursos minerales no son pequeñas reservas finitas, condenadas a su agotamiento, sino que son fracciones constantemente cambiantes de una reserva «astronómicamente amplia»,¹⁰⁸ cuyos cambios responden a avances tecnológicos, a situaciones económicas a veces declinantes, a veces expansivas, pero sin llegar a situaciones en las cuales se puede afirmar taxativamente que el recurso está agotado para siempre; perpetuamente habrá minerales si la sociedad está dispuesta a pagar el precio necesario para su recuperación. Sin ir más lejos, actualmente se recuperan minerales de baja ley desechados a lo largo de 40 años de explotación y acumulados en canchas de estéril, mediante el uso de bacterias en procesos de lixiviación *in situ*.

Los economistas son partidarios de recurrir a las evoluciones de costos como signos de

escasez, y más concretamente al costo marginal de la explotación minera, esto es el costo de producir una unidad adicional, o marginal, de mineral. Este costo ha sufrido dos tendencias opuestas: por un lado las leyes declinantes, el mayor costo de la energía, los mayores requerimientos energéticos por unidad de mineral extraído (al caer la ley aumenta automáticamente el estéril por remover, por unidad de energía empleada). La otra tendencia está determinada por el avance tecnológico que posibilita la extracción de minerales de baja ley a costos menores y con menores intensidades energéticas (por ejemplo, por lixiviación bacteriana in situ); la incorporación de los sistemas de informática y computación a la planificación, a la prospección y a las operaciones mineras.

Por otra parte, el avance tecnológico se manifiesta también por el lado de la demanda, ya sea por procesos de transformación más eficientes, y por consiguiente ahorradores de materias primas o mediante la creación de sustitutos. Respecto de lo primero, es un hecho que la desmaterialización del proceso productivo sigue actuando como factor de control de la demanda de minerales. Los ahorros de material que acompañan a los procesos industriales son motivados por aspectos económicos (reducciones de costos), se deben a la mejor planificación y organización del proceso productivo (introducción de computación, informática, etc.), a tecnologías más eficientes, y a la necesidad de cumplir con normas ambientales que fijan máximos a las descargas de contaminantes y a la generación de residuos y vertidos, dando aquí pleno valor a la famosa aseveración de que *«a pollutant is a resource in a wrong place»*. Otro factor es la sustitución por nuevos materiales, por ejemplo el uso creciente de cerámicas en productos de comunicaciones y de consumo. En la medida que la tecnología de la cerámica mejore, eventualmente reemplazará a los bloques de los motores de combustión, sustituirá así el acero del motor y de paso permitiría descartar al radiador, con lo cual se elimina un mercado importante para el cobre y el aluminio, pero además un motor de cerámica puede operar a temperaturas mucho más elevadas y en forma más eficiente, ya que al mejorar la combustión de los hidrocarburos reduce el consumo de gasolina.