

INT-2374

CURSO SEMINARIO LA DIMENSION AMBIENTAL EN LAS  
POLITICAS Y PLANES DE DESARROLLO

Auxiliar  
CDA-2

Organizado conjuntamente por el Centro Interamericano de Formación en Ciencias Ambientales y el Instituto Latinoamericano de Planificación Económica y Social, con la colaboración de la Comisión Económica para América Latina y de la Oficina Regional del PNUMA para América Latina.

Santiago, 21 de agosto al 29 de septiembre, 1978.

DESCRIPCION, CONCEPCION INTEGRADA Y GESTION  
DE RECURSOS NATURALES \*

Amilcar Herrera

\* El presente texto que se reproduce para uso exclusivo de los participantes de los cursos del Programa de Capacitación, reproduce el documento CIFCA/CB-G/GAD-I/4. Madrid, 1978.

1978-8-1649

• •

• •

El presente trabajo fue preparado por el Profesor Amilcar Herrera como parte de la construcción del Modelo Mundial Latinoamericano, formulado por la Fundación Bariloche (Argentina). Fué publicado en 1974 por Siglo XXI Argentina Editores, S.A. Se reproduce para uso exclusivo de los participantes en el curso sobre La Gestión Ambiental en el Desarrollo.

## INDICE

INTRODUCCION	11
RESERVAS Y RECURSOS MINERALES	17
Reservas de un yacimiento y reservas regionales, 19; clasificación de las reservas, 21; conclusión, 28	
LA HIPOTESIS DE ESCASEZ CRECIENTE DE LOS RECURSOS MINERALES	31
Las hipótesis teóricas de escasez de recursos minerales, 31; evidencias históricas sobre las hipótesis de escasez creciente, 36	
LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS MINERALES EN EL FUTURO PREVISIBLE	41
Los recursos minerales de la corteza terrestre, 42; recursos plutonígenos y subvolcánicos, 51; los recursos de los fondos marinos, 55	
LAS PERSPECTIVAS A MUY LARGO PLAZO	59
Los materiales críticos, 64	
LOS RECURSOS ENERGETICOS	67
El concepto de agotamiento de los recursos minerales, 73	
EL RECICLAJE DE MATERIAS PRIMAS MINERALES Y EL MEDIO AMBIENTE	75
BIBLIOGRAFIA	81

## INTRODUCCION

La idea de que la escasez de recursos naturales pueda poner eventualmente un límite al crecimiento humano no es nueva, y ha sido repetidamente expuesta en los últimos dos siglos. Los economistas clásicos - en particular Malthus, Ricardo y Mill - sostuvieron que la escasez de recursos naturales llevaría eventualmente a un rendimiento social decreciente del esfuerzo económico con el consiguiente retraso y eventual detención del progreso económico.

A partir de finales del siglo pasado estas ideas pierden vigencia - salvo como formulaciones teóricas académicas - debido a que el rápido progreso científico y tecnológico, registrado sobre todo en Occidente, mostró una capacidad casi ilimitada de ampliar la base de recursos naturales sobre la cual se asentaba el crecimiento económico. Se dio por sentado que el "progreso" podía sostenerse indefinidamente, debido a la inagotable capacidad humana de plantearse y resolver nuevos problemas.

En los últimos años, sin embargo, las viejas ideas malthusianas y ricardianas han resucitado con un vigor inesperado. Si bien las ideas centrales son las mismas, aparecen ahora algunos elementos que les agregan dramatismo. En primer lugar el crecimiento exponencial de la población y del consumo; y en segundo término la contaminación ambiental, elemento éste que no aparecía en la preocupación de los viejos economistas.

Aparece así una concepción de los límites del cre-

cimiento que se refleja en la idea de la tierra concebida como una nave espacial: se trata de un cuerpo finito, y por lo tanto son finitos los recursos que alberga. El crecimiento de la población y del consumo, que alcanza niveles sin precedentes en la historia, terminará fatalmente por agotarlos, y posiblemente en un plazo no lejano.

Si bien las soluciones que se postulan para esta problemática son muy variadas, en los círculos dirigentes de los países desarrollados aparecen algunas tendencias muy definidas, y cuyas implicaciones sociopolíticas son también muy claras. Se centran esencialmente en el crecimiento de la población mundial, sobre todo en los países subdesarrollados. El control de ese crecimiento —si es necesario en forma compulsiva, en las posiciones más extremas— es el prerequisite indispensable para evitar la catástrofe. El control de la contaminación, el uso racional de los recursos, etc., son sólo medidas complementarias.

En esas posiciones no se ponen en duda los valores centrales del "modo de vida occidental". Su principal implicación a veces explicitada claramente es que las barreras "naturales" que se oponen al crecimiento económico dejan muy pocas esperanzas a los países atrasados de alcanzar los niveles de bienestar que tienen hoy los países adelantados.

En todo momento histórico, y principalmente en los últimos dos o tres siglos, el destino de la humanidad no estuvo nunca unívocamente determinado. Ante una problemática global, los grados de libertad fueron siempre suficientes para admitir varias soluciones alternativas. La solución por la que se opta, está siempre determinada por la ubicación del propo- nente en una situación social, económica y política concretas.

Cuando Malthus enuncia su teoría de la escasez —con una base científica ni mejor ni peor que la que fundamenta las actuales posiciones catastrofistas— la

"solución" que postula no era la única posible, como lo demuestra la historia posterior, y la refutación de Marx, que se produce no mucho tiempo después de Malthus. Resulta ahora claro, sin embargo, que la posición de Malthus era la que convenía a los intereses de la clase dominante inglesa. La refutación de Marx surge no tanto de una apreciación distinta de la "realidad"—que no pasaba de una teoría con muy poca fundamentación empírica— como de una concepción diferente de las fuerzas que determinan el devenir de la humanidad.

La situación actual es muy similar. Aun suponiendo que el curso actual de la humanidad presente el peligro de provocar el colapso o desequilibrios graves en el ecosistema natural, esto no impugna la existencia de una solución única para evitarlo. La enorme complejidad de la organización social, unida al progreso de la ciencia y la tecnología, hacen que los grados de libertad posibles al "sistema humano" sean ahora mucho mayores que en la época de Malthus.

Las soluciones que se proponen ahora en los países avanzados, lo mismo que en los tiempos de Malthus, están condicionadas por su inserción en un particular contexto socioeconómico y político. Responden a los intereses de los países desarrollados, y sólo en función de ellos pueden aparecer como únicas y predefinidas.

La catástrofe que predicen muchos modelos en boga (matemáticos o no) es una realidad cotidiana para gran parte de la humanidad. Hambre, analfabetismo, muerte prematura, carencia de viviendas adecuadas, etc.—en otras palabras, condiciones miserables de vida— es el destino común compartido por la mayor parte de los habitantes de los países subdesarrollados. Para percibir esta catástrofe no es necesario esperar 80 ó 100 años, hasta que un eventual agotamiento de los recursos naturales, o el crecimiento de

la contaminación, hagan sentir sus efectos en los grandes centros de los países desarrollados.

Los obstáculos que se oponen a un desarrollo armónico de la humanidad no son principalmente materiales por lo menos en el futuro previsible sino sociopolíticos, y dependen de la actual distribución del poder tanto a nivel internacional, como dentro de los países. Esto se manifiesta en la creciente desigualdad internacional y dentro de cada país, en particular de los subdesarrollados.

De continuar estas tendencias se producirá una verdadera catástrofe para la humanidad mucho antes de que pueda percibirse alguna limitación en el ecosistema. La creciente presión de las masas marginadas poroqui muy probablemente la ruptura del sistema internacional, a través de una serie de conflictos a escala continental. La actual situación es inestable, y los acontecimientos de los últimos años, lejanos por las distancias al respecto.

La teoría de Malthus fue aplicada a explotación e instrumentada por las clases dominantes en su tiempo. Respondía a sus intereses y dominó la política salarial y social durante casi todo el siglo XIX. Más aún, para usarla mejor como instrumento de explotación, se dejaron de lado los aspectos positivos de las posiciones de Malthus, que hubieran podido aliviar la situación de las masas oprimidas. En definitiva, el objetivo final era el mantenimiento del *status quo*.

La formulación de "soluciones alternativas", nace de la lucha del proletariado por rechazar un orden social que lo mantenía en niveles de vida infrahumanos. El reconocimiento de que la miseria era una consecuencia de la organización social vigente, y no el producto de una "ley natural inmodificable", formulada en su forma más científica por Marx, sólo se convierte en un elemento dinámico de cambio, por que surge de la situación histórica de los sectores

sociales oprimidos. Son éstos los que, en una larga lucha, consiguen modificar algunos de los caracteres básicos de la sociedad que nace con la Revolución Industrial.

En la coyuntura actual del mundo, el papel de beneficiarios del sistema mundial que detentan los países desarrollados, los impulsa a buscar soluciones que no afecten la organización social y el sistema de valores en que se basa esa situación de privilegio. Los países subdesarrollados, víctimas del sistema, son los únicos cuya situación histórica los impulsa a formular soluciones que tomen realmente en cuenta todos los grados de libertad posibles. Son aquellos cuyos intereses históricos coinciden con la *libertad* de las masas oprimidas, con social e internacional que constituye el fundamento de la situación actual. Por otro lado, los países desarrollados, contribuyen a la totalización de los intereses, tanto por el hecho de que el plan de desarrollo y organización de los países subdesarrollados, sea de sus instituciones, como por sus estilos de vida. El desarrollo de los países subdesarrollados, por lo tanto, en un plazo que de ahora en adelante puede ser el horizonte, depende

## RESERVAS Y RECURSOS MINERALES

El reino mineral del cual el hombre extrae los productos que necesita para su industria, incluye la corteza sólida de la tierra, el mar y la atmósfera. No obstante, la inmensa mayoría de los recursos minerales que la humanidad necesita han sido extraídos hasta ahora de la corteza terrestre. Si bien esta capa sólida externa de la tierra tiene un espesor que oscila aproximadamente entre 32 y 40 km, las operaciones mineras realizadas hasta ahora muy raramente alcanzan los 2.000 ó 3.000 m.

Aun considerando sólo esa delgada película superficial, la corteza terrestre contiene, en términos absolutos, existencias prácticamente inagotables de todos los metales y minerales que la humanidad necesita. No obstante, la mayor parte de ese contenido se halla distribuido uniformemente y en concentraciones muy bajas a través de toda su masa. El costo de su extracción excede a su valor económico o social y, por lo tanto, no puede considerarse como reserva disponible, en las condiciones tecnológicas actuales.

Las reservas o recursos que consideramos explotables en las actuales condiciones, son las que se encuentran en los cuerpos geológicos denominados yacimientos o depósitos minerales. Estos cuerpos se caracterizan por tener concentraciones elevadas de ciertos elementos o minerales que entran en la constitución de la corteza terrestre, y el material mismo que los constituye se denomina mena o mineral. Sin embargo, para definir un yacimiento no basta



establecer que debe tener una concentración "elevada" de algún elemento útil; es preciso, además, establecer por lo menos aproximadamente, cuál ha de ser el valor de esa concentración, ya que existen muchos cuerpos geológicos con porcentajes relativamente elevados de ciertos metales, en comparación con el contenido medio de la corteza, que no pueden considerarse yacimientos. La condición esencial para que uno de esos cuerpos sea clasificado como yacimiento, es que de él puedan extraerse uno o más metales o minerales útiles en forma económica.

Esta definición parece dar un método relativamente sencillo para determinar cuándo una concentración de un metal o mineral constituye realmente un yacimiento, pero esa sencillez es sólo aparente, porque los factores que determinan las posibilidades de explotación económica son múltiples.

Algunos de ellos —como forma y tamaño del depósito y composición y ley de la mena— son de naturaleza geológica y pueden ser determinadas por un estudio adecuado del yacimiento, pero otras —como condiciones del mercado, procedimientos de explotación y beneficio de los minerales, etc.— son independientes de las características del yacimiento y varían considerablemente con el tiempo. Otros factores, como distancia, accesibilidad, clima, disponibilidad de agua en la zona, etc., son también independientes de las condiciones del depósito, pero suelen tener importancia decisiva en la determinación de sus posibilidades de explotación. En yacimientos de materiales de poco valor y gran volumen —como el hierro y el carbón, por ejemplo—, las posibilidades económicas de explotación dependen, en gran medida, de las condiciones de su transporte a los centros de consumo. Si éstas, a causa de la situación geográfica y la topografía, son muy desfavorables, la explotación del depósito puede resultar antieconómica, aunque tenga el mismo volumen y las mismas características geo-

gicas que otros yacimientos productivos. En las zonas áridas o desérticas, donde el agua para las plantas de beneficio debe ser traída desde largas distancias, la explotabilidad de un yacimiento depende de que las reservas sean suficientemente grandes como para justificar la considerable inversión de capital que esas obras requieren. En una zona sin problema de abastecimiento de agua, las reservas mínimas necesarias para que un yacimiento resulte económico serán mucho menores.

#### RESERVAS DE UN YACIMIENTO Y RESERVAS REGIONALES

El estudio de los yacimientos individuales se realiza, en la mayoría de los casos, con miras a su explotación más o menos inmediata. A ese fin, el margen de error y la incertidumbre de los factores geológicos de la evaluación es decir, los que inciden en la determinación de las dimensiones, forma y calidad del depósito son demasiado grandes. Para eliminarlos o reducirlos a un nivel aceptable, la empresa minera realiza una serie de trabajos de exploración que consisten en perforaciones, trincheras, galerías, etc. Como estos trabajos son caros, la empresa los emprende solamente si el estudio geológico previo indica que las condiciones son favorables. Además, ese mismo estudio, que incluye predicciones sobre la posible forma y estructura del yacimiento, le permite planear las labores de manera tal que proporcionen un máximo de información con un mínimo de inversiones. En cuanto a las incógnitas económicas, a la empresa le resulta relativamente fácil despejarlas, porque hace su estimación basándose en las condiciones económicas y tecnológicas del momento, aceptando el riesgo normal de toda inversión comercial. Las labores de exploración permiten determinar las dimensiones y la for-

ma del depósito, pero la mena es raramente homogénea, y sus leyes varían dentro de límites a veces bastante amplios; de manera que, solamente después de despejar las incógnitas económicas, puede saberse realmente qué parte del tonelaje del depósito será aprovechable.

Por otra parte, y éste es un punto muy importante, *la empresa minera efectúa solamente los trabajos de exploración indispensables para asegurarse de que dispondrá de mena para operar durante un período razonable, de modo tal que le permite recu- perar las inversiones efectuadas con un margen previsto de beneficio.* Posteriormente, tratará de llevar sus trabajos de exploración de manera tal que pueda cada año asegurarse de la existencia adicional de una cantidad de mena por lo menos igual a la explotada durante ese año.

Cuando se trata de estimar los recursos mineros de una región, la situación es muy distinta. En primer lugar, las incógnitas geológicas no pueden despejarse realizando labores de exploración, y los cálculos deben entonces basarse en las estimaciones geológicas, admitiendo el grado de incertidumbre que implican. La consideración de las incógnitas económicas agrega un factor de incertidumbre que es, en muchos casos, mayor aún que el geológico. La definición, en términos económicos, de lo que debe considerarse mena, ya no puede basarse en las condiciones técnicas y económicas imperantes en el momento, porque la estimación de la riqueza minera de un país o de una región, se hace sobre la base de previsiones a mayor plazo. El criterio que se adopta casi universalmente para este tipo de evaluación es el de considerar reserva todo lo que resultaría aprovechable en las condiciones económicas y técnicas del futuro previsible. Es obvio que la previsión de esas condiciones implica que el evaluador debe tomar decisiones arbitrarias, en el sentido de que se basan, en gran medida, en sus

opiniones personales. Así se explica que las estimaciones de la riqueza minera de una misma región, realizadas por distintas personas, den muchas veces resultados considerablemente discrepantes entre sí.

Como resumen puede afirmarse que la riqueza de un yacimiento o de una región no es expresable por una cifra de reservas que tenga valor absoluto. Sólo se pueden dar estimaciones válidas dentro de ciertas condiciones económicas y de cierto grado de certeza que es necesario especificar en cada caso. Las clasificaciones de reservas punto que trataremos a continuación se han ideado precisamente con el objeto de cumplir esta última condición.

#### CLASIFICACION DE LAS RESERVAS

Los primeros términos usados en la industria minera para la evaluación de yacimientos, y que todavía gozan de amplia aceptación, fueron los de reservas positivas, probables y posibles. Las reservas positivas son las que han sido verificadas por trabajos de exploración y de cuya existencia y calidad (composición y leyes) existe seguridad suficiente como para justificar las inversiones necesarias para su explotación. Las reservas probables también han sido reconocidas por labores mineros o por los afloramientos, pero la incertidumbre con respecto a la cantidad y calidad es considerablemente mayor que en el caso anterior. Las reservas posibles son una evaluación geológica. En una mina en operación, como es natural, las reservas van cambiando de categoría a medida que las nuevas labores de exploración y desarrollo permiten conocer mejor las características del yacimiento.

Si bien esos términos, como ya se ha señalado, tuvieron amplia difusión, su definición exacta ha sido desde siempre tema de controversia. Las definiciones que seguramente reflejan mejor el sentido en que esos

términos han sido siempre usados, son las siguientes, aportados por Leith en 1939:

*Positivas* (o comprobadas). Mineral delimitado en tres dimensiones por labores mineras o por perforaciones, pero que incluye además, prolongaciones secundarias más allá de las labores y perforaciones, donde los factores geológicos que limitan el cuerpo mineralizado son bien conocidos y donde las posibilidades de que la mena no alcance estos límites es tan remota que no se tienen en cuenta al proyectar los trabajos de explotación.

*Probables* (o semicomprobadas). Comprenden extensiones a corta distancia, donde las condiciones son tales que se encontrará probablemente mineral, pero donde la extensión y las condiciones limitantes no se pueden definir con la misma precisión que en el caso del mineral comprobado. El término también puede significar que se ha comprobado la presencia de mena por medio de perforaciones dispersas, pero demasiado separadas para garantizar la continuidad del cuerpo.

*Posibles*. El mineral se califica como posible cuando las relaciones del terreno con cuerpos mineralizados adyacentes y las estructuras geológicas permiten suponer que se encontrará mineral, pero la falta de datos provenientes de exploración y desarrollo, impiden tener certeza sobre su ubicación exacta o extensión. Frecuentemente no conviene asignar cifras a los tonelajes "posibles", pero se los puede designar con términos tales como "grandes" o "pequeños".

Como ya lo han señalado muchos especialistas, esta clasificación se adapta muy bien a las necesidades de la empresa minera porque le permite calcu-

lar, con pequeño margen de error, las reservas mínimas necesarias para iniciar la explotación y le proporciona un medio para evaluar la incógnita geológica en forma objetiva. Para la estimación de la riqueza de una región, en cambio, establece limitaciones demasiado rígidas, conforme a los distintos tipos de reservas. El geólogo o el economista que trabaja sobre una región debe basarse en estimaciones geológicas y económicas que, como ya se ha dicho, se hallan expuestas a un margen de error más grande. Como resultado, cuando califican una reserva como "posible", por ejemplo, usan en general el término en un sentido que sería inaceptable para una empresa minera porque incluye mineral que no sería explotable en las condiciones del momento o cuya existencia se presume en base a especulaciones puramente geológicas. No obstante, y debido a la falta de terminología más adecuada, durante mucho tiempo se usaron los mismos términos para los dos tipos de evaluación, con el agravante de que, al publicarse las cifras, en muy pocos casos se daban los elementos de juicio necesarios para estimar, aunque fuera aproximadamente, el margen de error aceptado.

Para corregir esta situación, el United States Geological Survey y el United States Bureau of Mines adoptaron en 1944 una clasificación de reservas más flexible para las evaluaciones de recursos minerales en escala nacional o regional. En esta clasificación se tuvo en cuenta que este tipo de evaluación lo hacen, en general, personas —comúnmente economistas o técnicos oficiales— que no tienen acceso a los cálculos detallados de reservas efectuados por empresas mineras particulares, y que para ello no interesa conocer en detalle, en sus distintos tipos, las reservas de cada mina. En tales estudios, lo que interesa es estimar la magnitud de los recursos minerales.

Los términos propuestos, y que se han comenzado a usar en todo el mundo, son los siguientes:

*Medidas* (o cubricadas). "Son aquellas reservas cuyo tonelaje se computa por las dimensiones reveladas en afloramientos, trincheras, labores mineras y perforaciones, y cuya ley se determina por medio de un muestreo detallado. Los sitios en los cuales se han efectuado las observaciones, la toma de muestras y las mediciones están tan próximas, y las características geológicas aparecen tan bien definidas, que queda perfectamente establecido el tamaño, forma y composición de la mena. El tonelaje y la ley computadas se consideran exactas dentro de los límites que se establecen, y se supone que esos límites no difieren del tonelaje o ley calculados en más del 20 por ciento".

*Indicadas*. "Son aquellas cuyo tonelaje y ley se calculan, en parte, mediante mediciones específicas, muestras o datos de producción, y, en parte, sobre la proyección, hasta una distancia razonable, basándose en evidencias geológicas. Los sitios disponibles para las observaciones, mediciones y muestreos se hallan demasiado separados o espaciados inadecuadamente para poder delimitar los cuerpos mineralizados o determinar en detalle sus leyes".

*Inferidas*. "Son aquellas reservas cuya estimación numérica se basa en gran parte en un conocimiento general del carácter geológico del depósito, y de las que no existen, o se tienen muy pocas, mediciones o muestras. Las estimaciones se basan en una supuesta continuidad o repetición apoyada en evidencias geológicas; éstas pueden incluir comparaciones con depósitos de tipo similar. Se pueden agregar cuerpos mineralizados ocultos si hay evidencia geológica específica de su presencia. Las estimaciones de reservas inferidas deben incluir información sobre los límites específicos dentro de los cuales el material puede estar."

Esta nomenclatura, si bien es mucho más apta para evaluaciones regionales que la mencionada antes, presenta todavía dos dificultades. La primera es que el evaluador no tiene, en general, acceso a la información que poseen las empresas privadas, y, por lo tanto, no puede establecer la distinción entre reservas "medidas" e "indicadas". Por lo demás, la categoría de reservas "medidas", que equivale aproximadamente a la de "positivas" de la primera clasificación, sólo representa, como ya se señaló, la cantidad de mineral que las empresas consideran indispensable asegurar antes de comenzar la explotación y, en consecuencia, su diferenciación exacta no es necesaria para evaluar la riqueza de una región. La segunda dificultad estriba en que el término "reserva" se usa prácticamente siempre en el sentido de mineral aprovechable en las condiciones económicas del momento. Al economista en cambio, le interesan igualmente las existencias de mineral que podrían aprovecharse en las condiciones previsibles en el futuro próximo.

Para obviar la primera dificultad, F. Blondel y S. G. Lasky propusieron abandonar los términos "medidas" e "indicadas" y remplazarlos por un único término - "demostradas" que los incluiría a los dos.

En lo que respecta al segundo punto, los mismos autores recomiendan (siguiendo el criterio señalado por Lasky en 1949) restringir el término "reservas" para el mineral que se considera explotable en las condiciones existentes, incluyendo costo, precio, tecnología y circunstancias locales especiales. Al resto, es decir al mineral cuya explotación necesita condiciones más favorables que las actualmente existentes, así como mayor explotación para poner en evidencia depósitos todavía no incluidos en las categorías de "posible" o "inferido", proponen denominarlos mineral (o mena) potencial.

Resumiendo lo que antecede, para la estimación de

La riqueza mineral de un país o región, se usaría la siguiente ecuación:

$$\begin{array}{l} \text{Recursos} + \text{Reservas} + \text{Reservas} = \text{Mineral} \\ \text{minerales} \quad \text{demostradas} \quad \text{inferidas} \quad \text{potencial} \\ \text{Lasky 1956} \end{array}$$

En nuestra opinión, en las circunstancias actuales, ésta es la fórmula que mejor se adapta a la estimación de los recursos mineros en escala nacional o regional.

En los últimos años se ha desarrollado también el concepto de "recurso base". Según Schurrel al. (1960) "El 'recurso base' se concibe para incluir la suma total de materias primas minerales presente en la corteza terrestre dentro de un área geográfica dada. Si denominamos A a las reservas, el recurso base C es igual a A + B, donde B comprende todo el stock no incluido en A, ya sea su existencia conocida o desconocida y sin tener en cuenta si es tecnológica o económicamente explotable. El concepto recurso base es así absoluto, en el sentido que incluye todas las existencias dentro de un área geográfica especificada."

En las condiciones actuales, resulta difícil evaluar la utilidad de este concepto. Si se aplica literalmente, el recurso base incluye toda la corteza terrestre, cuya composición *en detalle* se desconoce en su mayor parte. Si se introduce cualquier restricción económica o tecnológica, el recurso base se convierte en una extensión del concepto de recurso potencial. Sólo con un conocimiento exhaustivo de la composición de la corteza terrestre, podría este concepto ser útil para orientar la investigación tecnológica.

Lo que aparece en las estadísticas como recursos minerales de un país está constituido entonces por las reservas *declaradas* por las empresas (demostradas o

inferidas) y el mineral cuya presencia se deduce de la información de carácter más general existente. Esta información proviene en su casi totalidad de yacimientos o distritos mineros en explotación o exploración; por lo tanto así todos los recursos potenciales resultan de la extrapolación geológica de áreas mineralizadas *ya reconocidas*. En otras palabras, estos recursos son una función de las reservas explotables conocidas, y éstas, a su vez, debido al costo que supone revelarlas, son una *función de la demanda del sistema productivo*.

Este concepto es el que permite entender claramente el significado de las cifras que aparecen en las estadísticas como los recursos minerales de un país, o del mundo. No pretenden expresar de ninguna manera la riqueza minera total de la región considerada, sino los recursos revelados directa o indirectamente por la explotación realizada hasta ese momento, y explotables en las condiciones tecnológicas y económicas actuales o del futuro próximo. Por esta razón, los inventarios mineros están desactualizados en el momento mismo en que se publican.

Por otra parte, los criterios que se utilizan en esos inventarios para incluir mineral potencial son muy heterogéneos. En el aluminio por ejemplo, se incluyen como reservas potenciales las bauxitas de baja ley, pero no los materiales no bauxíticos, como las arcillas de alto contenido de alúmina; en azufre no se incluyen las reservas contenidas en yeso y anhídrita, a pesar de que ya son explotables económica y tecnológicamente; los nódulos de manganeso de los fondos marinos tampoco se estiman en las cifras de reservas, a pesar de que ya se realizan estudios de factibilidad de explotación, etc. Las razones de estas omisiones son variadas: en algunos casos —arcillas ricas en alúmina, yeso, anhídrita— porque las reservas son desconocidas pero prácticamente *inagotables*, de manera que es difícil traducirlas en cifras; en otros —el caso

de los nódulos marinos— porque el recopilador estima que el volumen total de las reservas se conoce todavía de manera bastante imprecisa. Finalmente, debe tenerse en cuenta el objetivo con que se realizan estos inventarios: dar una idea a los interesados —gobiernos, empresas, etc.— del estado actual de las reservas de interés a corto y mediano plazo. No tiene mucho sentido entonces, incluir reservas cuyo aprovechamiento se prevé para el futuro lejano.

#### CONCLUSION

Resulta claro entonces, que la calificación de reserva o recurso mineral se hace en relación con las condiciones económicas y tecnológicas del momento en que se efectúa la evaluación. En otras palabras, es el resultado de realizar un corte transversal en el devenir económico y tecnológico. Distintos cortes transversales en el tiempo darán cuadros muy diferentes de reservas, tanto en el tipo como en la cantidad de material incluido.

Esto se ve muy claramente examinando la historia reciente. En lo que va de este siglo la humanidad ha consumido, en la mayoría de las materias primas minerales más importantes, muchas más reservas que las que eran conocidas en 1900. Sin embargo, esas reservas conocidas no sólo no se han agotado, sino que, en casi todos los minerales importantes, son mucho mayores ahora en términos absolutos que a comienzos del siglo. Pero no es sólo la cantidad, sino también la calidad de las reservas lo que ha cambiado. Hace unas pocas décadas, las únicas reservas de azufre consideradas eran las de los yacimientos tipo Frasch, y las de depósitos volcánicos de superficie de relativamente poco volumen; ahora ese elemento se extrae en gran cantidad de petróleos y gases naturales asociados, y el yeso y la anhídrita se incluyen en las

reservas potenciales. La incorporación en las últimas décadas de las taconitas como reservas de hierro; de las bauxitas de bajo contenido de alúmina y alto contenido de sílice y de las arcillas como materias primas para la producción de aluminio, y la extracción de magnesio de las aguas marinas, son sólo unos pocos ejemplos más de cómo evoluciona el carácter de los recursos minerales.

Concebir los recursos minerales como un stock fijo e inmutable, o que a lo sumo puede variar sólo en cantidad —conceptos éstos que están en la base de todas las predicciones catastróficas— es absolutamente erróneo. El concepto de recursos es esencialmente dinámico: los términos que definen los recursos minerales —cantidad, tipo, ley, etc.— deben verse como variables dependientes del tiempo, que cambian a medida que evolucionan las condiciones económicas, tecnológicas, etcétera.

## LA HIPÓTESIS DE ESCASEZ CRECIENTE DE LOS RECURSOS MINERALES

En todas las hipótesis catastrofistas el agotamiento de los recursos naturales no renovables juega un papel central. Se sostiene que se trata de recursos finitos, y por lo tanto susceptibles de agotarse.

Es obvio que los recursos de la tierra son finitos. El verdadero problema, sin embargo —y dejando de lado por ahora qué significa realmente “agotarse”— es en qué plazo puede preverse ese agotamiento. Si se trata de algunas decenas de años, es evidente que es necesario comenzar a tomar medidas de inmediato, porque dada la enorme inercia de un sistema de las dimensiones y características de la humanidad, cualquier programa de acción global sólo comienza a dar resultados a largo plazo. Si la crisis se prevé de alguna manera dentro de centenares o miles de años, en cambio, realmente carece de sentido comenzar a preocuparse ahora: es imposible predecir ni siquiera aproximadamente la evolución de la humanidad a tan largo plazo, ni el tipo de criterios y la capacidad tecnológica que aplicará a la solución de sus problemas.

### LAS HIPÓTESIS TEÓRICAS DE ESCASEZ DE RECURSOS MINERALES

El único trabajo que, usando datos cuantitativos, ha tratado de responder a esa pregunta, es el Modelo denominado World III, construido en el Instituto

Tecnológico de Massachusetts por el grupo dirigido por Meadows, y cuyos resultados se publicaron con el título de *The Limits to Growth*\* (Meadows et al 1972). Según ese modelo, de continuar las tendencias actuales de crecimiento, la humanidad enfrentará una catástrofe a mediados del próximo siglo. Se ensayan varias hipótesis alternativas, y en casi todas ellas el elemento que directa o indirectamente desencadena la catástrofe es el agotamiento de los recursos minerales. La conclusión de los autores del trabajo es que sólo reduciendo el consumo de recursos naturales no renovables en un 75% con respecto al consumo actual, y reduciendo el crecimiento de la población a cero, puede evitarse el colapso que predice el modelo.

Teniendo en cuenta la repercusión mundial de este trabajo, y el hecho de que sus hipótesis son las que están siempre subyacentes en la literatura sobre el tema que hemos mencionado, conviene hacer un breve análisis de la validez de esas hipótesis con respecto a los recursos minerales.

Los dos supuestos básicos del modelo en este campo son:

a) La *cantidad total* de recursos minerales que queda todavía en la tierra es suficiente para cubrir las necesidades de la humanidad durante 250 años al nivel de consumo actual. Esta duración la deducen de las cifras de reservas mundiales publicadas por organismos especializados, en particular el Bureau of Mines de los Estados Unidos. Como la duración de estas reservas varía con las distintas materias primas minerales, los 250 años representan un promedio considerado razonable. Para poder usarlo se supone además capacidad completa de sustitución entre los distintos minerales.

\* Este libro ha sido traducido al español: *Los límites del crecimiento*, México, Fondo de Cultura Económica, 1972.

b) A medida que el stock de recursos naturales no renovables disminuye, el costo de obtención de cada unidad adicional crece, debido a que las reservas mejores y más accesibles han sido ubicadas y explotadas primero, y se necesita más esfuerzo (capital) para explotar las menos accesibles y de menor "calidad". El costo se mide en términos de la fracción del capital total del mundo que debe asignarse a la explotación de los recursos minerales. El aumento de costo es una función de la fracción remanente del stock original de recursos minerales disponibles. A medida que la fracción remanente de recursos minerales tiende a cero, la fracción de capital necesario para la obtención de recursos naturales tiende a uno, es decir, a todo el capital disponible, en detrimento del resto de las actividades de la sociedad. Por este simple mecanismo, el progresivo agotamiento de los recursos minerales provoca rápidamente el colapso del sistema.

Como puede verse fácilmente, toda la estructura, y por lo tanto la validez de esta parte del modelo, depende de que sea posible determinar la *cantidad total* de recursos minerales a disposición de la humanidad.

Las hipótesis de escasez del modelo MFR son de vieja data en la economía, y fueron desarrolladas en sus formas generales más conocidas por Malthus y Ricardo.

Malthus, que se ocupó en especial del problema de alimentación, parte de la existencia de una cantidad finita y conocida del recurso, en este caso el suelo. En un comienzo se supone que la producción aumenta a medida que se va expandiendo la ocupación del suelo. En esta fase, es decir, mientras queda suelo remanente no utilizado, el costo de producción permanece constante. Sólo cuando se ha ocupado todo el suelo existente, se llega a un límite a partir del



cual la producción de cada unidad adicional sólo se puede obtener a mayor costo. Llega un momento en que el aumento de los insumos ya no se traduce en un mayor rendimiento, y se habría alcanzado el límite de producción posible.

La hipótesis de Ricardo —aparentemente más aplicable a los recursos no renovables— no implica necesariamente una cantidad finita de recursos, pero supone que primero se utilizan los recursos de mayor rendimiento económico, y se van incorporando otros menos adecuados a medida que los anteriores se agotan. El resultado es que el costo de producción comienza a aumentar desde que se inicia la explotación, hasta llegar a límites que la hacen socialmente inaceptable.

El modelo MITR combina las dos hipótesis de escasez. Incorpora el supuesto malthusiano de que el recurso es limitado, y la hipótesis ricardiana del rendimiento decreciente desde el comienzo de la producción. No es extraño que de esta combinación de los elementos más negativos de las dos hipótesis resulta un modelo fácilmente explosivo.

¿En qué medida cualquiera de las dos hipótesis de escasez puede aplicarse a los recursos minerales?

Considerando lo que hemos visto sobre la definición de recurso, es evidente que no puede aplicarse el supuesto malthusiano de una cantidad fija conocida. Sólo tendría sentido *teórico* si suponemos tecnología y condiciones económicas constantes. En este caso, los recursos totales serían los explotables en las condiciones actuales, y una exploración suficientemente detallada de la parte accesible de la tierra, permitiría conocer su volumen con exactitud. Lo que carece totalmente de sentido es utilizar las cifras registradas en los inventarios que se publican periódicamente, como si expresaran el total de recursos explotables en las condiciones actuales existentes en el planeta. Como veremos más adelante, solo representan una

fracción, posiblemente muy pequeña, de los recursos totales de ese tipo.

La dificultad de fondo, sin embargo, para conocer las reservas totales de la tierra, es que, como ya se ha visto, el que un material determinado sea o no considerado recurso depende de condiciones tecnológicas y económicas que varían con el tiempo. Dado que estas condiciones no pueden preverse, salvo para el futuro muy próximo, la cantidad total de recursos eventualmente disponibles para la humanidad es un dato *intrínsecamente incognoscible*.

La hipótesis ricardiana, aunque a primera vista parece más adecuada para los recursos minerales, es también imposible de aplicar. Aun suponiendo tecnología y condiciones económicas constantes, el supuesto de que se comienza por explotar los recursos económicamente más convenientes, requiere la existencia previa de un conocimiento completo de la ubicación y características de todos los recursos explotables existentes en la parte accesible de la tierra.

Esta condición no se ha cumplido nunca, y las reservas explotadas primero fueron las más fáciles de ubicar, y las que estaban en ese momento más cerca de los centros de producción, sin que esto tenga nada que ver con la "calidad" económica de los yacimientos. Los yacimientos de hierro de ley relativamente baja de Europa por ejemplo, se comenzaron a explotar antes que los de alta ley del Lago Superior, simplemente porque la Revolución Industrial comienza en Europa y se extiende luego al continente americano.

Pero es al introducir el cambio tecnológico cuando se percibe claramente que el principio ricardiano no se puede siquiera formular en forma inteligible. En efecto, *cada avance tecnológico modifica los criterios a utilizar para saber qué recursos son los más favorables económicamente*. Hace unas pocas decenas de

años la manera más conveniente de obtener compuestos nitrogenados para fertilizantes era sacarlos de los depósitos de nitratos naturales; ahora se producen a partir del nitrógeno del aire. ¿Tiene algún sentido afirmar que se ha pasado de un recurso más conveniente a otro menos conveniente desde el punto de vista económico? Lo mismo puede decirse de los cambios en el tipo de recursos utilizado para producir otras materias primas de origen mineral, debido a los avances tecnológicos producidos desde el comienzo de la Revolución Industrial.

#### EVIDENCIAS HISTORICAS SOBRE LAS HIPOTESIS DE ESCASEZ CRECIENTE

Lo anterior muestra que las hipótesis teóricas de escasez usadas tradicionalmente por la economía no pueden aplicarse a los recursos minerales. En otras palabras, que no puede suponerse *a priori* que esa creciente escasez se haya manifestado en el pasado, o vaya a producirse en el futuro previsible. El problema de si existen signos de escasez en la obtención de recursos minerales, es decir, de si su costo social de obtención ha aumentado con el tiempo, sólo puede resolverse a través del examen de la evidencia histórica disponible.

Un primer indicio histórico lo dan los precios de los productos minerales. En la Figura 1 puede verse que los precios de las materias primas de origen mineral, han permanecido esencialmente constantes durante los últimos casi cien años, entre 1870 y 1960.

Un dato más significativo que los precios, sin embargo, es el de los costos de producción. Estos han sido investigados por Barnett y Morse (1963), en un trabajo dedicado precisamente a analizar la validez de las hipótesis referidas a la supuesta creciente escasez de los recursos naturales. Sus datos se refieren a los

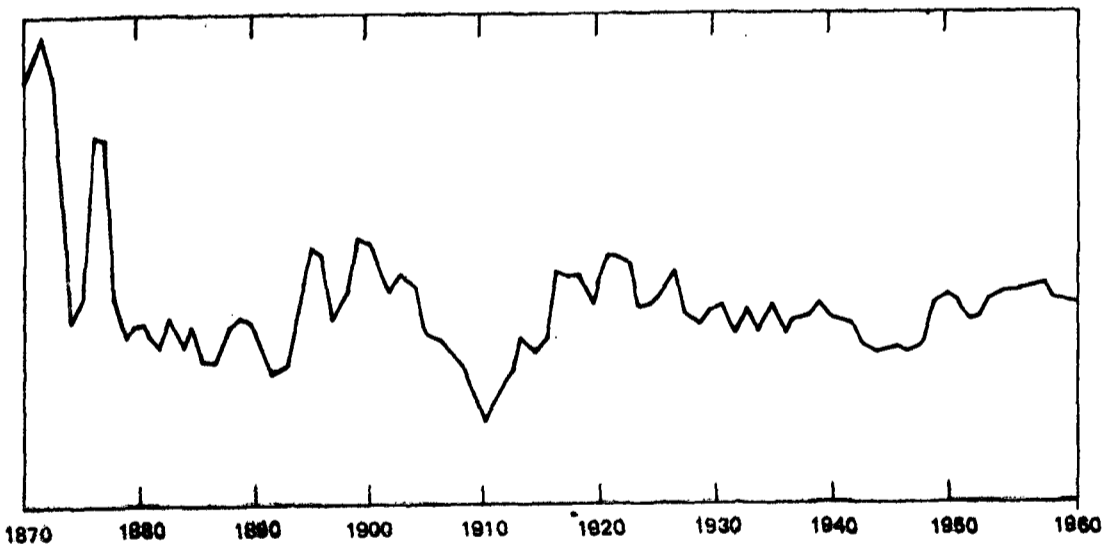
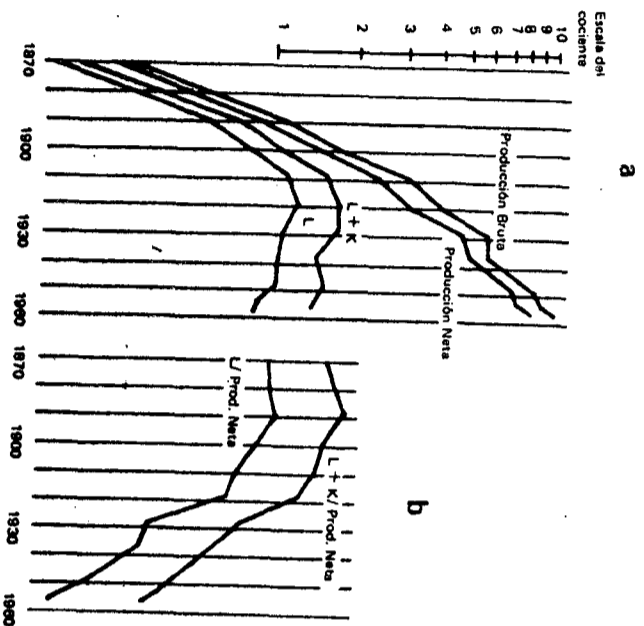


Figura 1: Evolución de los precios deflacionados de las materias primas minerales, en Estados Unidos, en el período 1870-1960. (Porter y Christy, 1968)

Figura 2 (a): Evolución de la producción minera de los Estados Unidos en el período 1870-1960. y la evolución de los insumos de capital y trabajo

(Barnett y Morse, 1963)



Estados Unidos, pero sus conclusiones son de validez general, porque la industria minera utiliza prácticamente la misma tecnología en todo el mundo.

La Figura 2 (a) tomada de los autores citados (p. 169), muestra la evolución de la producción minera de los Estados Unidos en el período 1870-1960, y la evolución de los insumos de capital y trabajo. La Figura 2 (b) muestra la evolución, en el mismo período, del costo de producción en términos de insumos de capital y trabajo.

Sobre el significado de estos datos dicen Barnett y Morse: "El resultado factual es... exactamente el opuesto a las predicciones teóricas, excepto en el período 1870-1889 (donde, coincidentemente, la información es más débil). Desde 1890 los costos por unidad de producción neta, medidos ya sea en trabajo o trabajo y capital, han declinado rápida y persistentemente. Hacia el final del período el costo de trabajo y capital por unidad de producción, era solamente de un quinto del registrado en 1889. La declinación es aún mayor para el costo de trabajo tomado aisladamente. Nuevamente, el incremento en productividad fue más rápido en la segunda parte del período que en la primera. De 1889 a 1919, se estima que el costo unitario en capital y trabajo de los minerales declinó a una tasa de 1,2% por año; de 1919 a 1957 la tasa de declinación fue de 3,2% por año".

Cabe agregar que la mayor tasa de declinación de costos se produce precisamente en el período en que se alcanza el mayor crecimiento en la demanda de minerales que registra la historia.

En conclusión, el análisis de la información histórica disponible indica que no solamente no se han registrado señales de creciente escasez en la disponibilidad de materias primas minerales, sino que éstas se han obtenido hasta ahora a un costo social continuamente decreciente.

## LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS MINERALES EN EL FUTURO PREVISIBLE

¿Cuál es la probabilidad de que esos indicios de escasez que no aparecen en el pasado se manifiesten en el futuro? Para responder a esta pregunta, sería necesario determinar, aunque sea muy aproximadamente, la cantidad total de recursos minerales accesibles existentes en el planeta.

Teniendo en cuenta que la definición de recurso sólo tiene sentido en función de una economía y una tecnología dadas, es evidente que es imposible determinar la cantidad total de recursos no renovables existentes en el planeta, porque para ello serían necesarias, como mínimo, dos condiciones, ambas imposibles de satisfacer con nuestros conocimientos actuales: a) conocer en detalle las características físicas y químicas de toda la corteza terrestre eventualmente accesible al hombre, y b) conocer qué progresos científicos y tecnológicos va a experimentar la humanidad en el horizonte de tiempo investigado.

El verdadero problema, sin embargo, no es conocer los recursos totales eventualmente disponibles para la humanidad en un horizonte de tiempo ilimitado, sino tener una idea de cuáles son las reservas potenciales de recursos explotables en las condiciones tecnológicas y económicas actuales, o del futuro próximo. Esto permitirá estimar si el tiempo disponible para desarrollar tecnologías que permitan aprovechar eventualmente materiales geológicos hasta ahora no considerados utilizables, es suficiente para evitar posibles cuellos de botella o estrangulamientos en la produc-

ción. Permitiría también determinar si pueden razonablemente esperarse cambios importantes en los costos de las materias primas provenientes de los recursos naturales no renovables, en el horizonte temporal que nos interesa.

#### LOS RECURSOS MINERALES DE LA CORTEZA TERRESTRE

Cálculos de esta clase han sido realizados para las reservas de petróleo. Entre las primeras efectuadas para el mundo se pueden citar Weeks (1958), Porque (1946), y Levorsen (1950). Más recientemente, algunos autores han calculado las reservas totales para USA, Hubert (1962), Zapp (1962).

Calcular las reservas de otros productos minerales presenta problemas muy diferentes que el caso del petróleo. Este es un producto único, cuya definición no varía con el tiempo, y cuya forma de presentación es bastante bien conocida. En los productos minerales restantes -en particular los metales- como hemos visto, la definición de recurso varía con el tiempo; además, y aun en un tipo de recurso determinado, existe en general un conocimiento mucho menor que en el petróleo en cuanto a localización geológica, formas de presentación, etc.

Un cálculo de este tipo, por lo tanto, sólo puede dar una idea del orden de magnitud probable de los recursos contenidos en la porción de la corteza considerada. Para los fines de este trabajo, esto es suficiente.

Consideramos para el cálculo sólo el caso de algunos de los metales más importantes, porque son, junto con los combustibles, los que más frecuentemente se mencionan como críticos en cuanto a sus posibilidades de agotamiento. Para una primera estimación de las reservas probables en materiales explotables en

las condiciones actuales partiremos de las premisas siguientes:

a) Los metales se extraen de yacimientos cuya profundidad media de explotación, considerado todo el mundo, es de unos 300 m\*. En algunos casos las profundidades máximas alcanzadas exceden los 3.000 metros.

b) Se supone que el total de reservas reveladas hasta ahora (las explotadas más las existentes) constituyen la mitad de las reservas contenidas en la corteza emergente (la de los continentes) hasta una profundidad media de 300 m.

Esta hipótesis es muy conservadora por las siguientes razones:

1) La inmensa mayoría de los yacimientos conocidos ha sido descubierta debido a sus afloramientos; existen muy pocos ejemplos de descubrimientos de depósitos cubiertos por unas pocas decenas de metros de rocas. Como no existe ninguna razón para suponer que todos, o la mayoría, de los yacimientos contenidos en los primeros 300 metros de la corteza lleguen a la superficie, es muy probable que el número de yacimientos todavía no descubiertos exceda grandemente el de los conocidos.

Por otra parte, sólo áreas relativamente reducidas de los países desarrollados no han sido suficientemente exploradas como para asegurar que han sido encontrados todos los yacimientos de cuya presencia existen indicios en la superficie. En Estados Unidos se siguen descubriendo nuevos yacimientos, y existen

\* Esta cifra se calcula sobre la base de una muestra tomada al azar de unos 40 yacimientos metalíferos de diversos tipos de todo el mundo.

vastas áreas en la Unión Soviética, Australia y Canadá que apenas han sido reconocidas superficialmente. En los países subdesarrollados (alrededor del 60% de la superficie terrestre) la exploración detallada de la superficie recién está comenzando. Basta señalar que en América Latina, por ejemplo, el mapeo geológico en escala 1:250.000 o menor, el instrumento básico para guiar la búsqueda sistemática de recursos minerales, apenas cubriría en 1964 alrededor del 5% de la superficie. Además, sobre más del 70% de los productos minerales que el Mineral Facts and Problems (1960) del U.S. Bureau of Mines registra como importantes para la industria moderna, la información existente para la región es nula o demasiado general para ser de alguna utilidad práctica (Herrera, 1965).

Refiriéndose a los recursos de hierro, y después de calcular que la demanda máxima total de ese metal en el mundo en el período 1962-2000 podría ser de 25.000 millones de toneladas, dice Landsberg et al (1963): "En vista de que el hierro contenido en los minerales de fundición directa (*direct shipping ore*) más que duplica ese nivel de demanda, y considerando la tasa a la que se han ido abriendo nuevos depósitos en la última década, lejos de puertos marítimos y en áreas consideradas previamente inaccesibles, sería posible extraer recursos de esa magnitud sin siquiera especular en las reservas que requieren tratamiento previo, y cuyo monto identificado asciende a una vez y media las de fundición directa. . . Para el largo plazo se debe señalar que el mapeo aéreo y el reconocimiento terrestre sistemático apenas han comenzado a aplicarse en Asia, África y América Latina; y aún en Canadá. . . producirá sin duda sorpresas del orden de los miles de millones de toneladas".

Conviene destacar también, que los yacimientos de hierro figuraran entre los más fáciles de detectar debido a su gran tamaño y a sus cualidades magnéticas, que permite descubrirlos con relativa facilidad. Aun así, en

los años 50 se descubrieron en Estados Unidos más yacimientos de hierro que en los 25 años anteriores. En la mayoría de los otros metales —que se presentan en yacimientos de dimensiones muchos menores— el grado de conocimientos que se posee sobre sus reservas totales en los primeros 300 metros de la corteza es seguramente mucho menor. Sobre el mismo tema dice un reciente estudio de Fischman y Landsberg (1972): "... existe una cierta cantidad de 'reservas' no descubiertas —minerales que podrían satisfacer las demandas del futuro a los precios y tecnología actuales— que no están incluidas en las reservas estimadas. Su cantidad no es determinable, pero en vista a la pobreza de la exploración en muchas partes del mundo, debe presumirse que son grandes. Esta presunción se ve reforzada por el conocimiento —determinado a veces erróneamente 'paradoja'— que a pesar de la creciente producción, la reserva total estimada para minerales particulares tienden, década tras década, a mantenerse o aun a expandirse. . ."

2) La hipótesis que estamos usando supone que las reservas conocidas de los yacimientos en explotación o descubiertas, son sus *reservas totales*. Si se toma la evolución de las reservas conocidas en las últimas décadas, sin embargo, se comprueba que el incremento constante de las mismas proviene en gran parte del aumento de las reservas de yacimientos ya conocidos, y no de nuevos descubrimientos (Guillemin, 1972, p. 21). La explicación de este hecho se ha dado al referirnos al concepto de reserva.

b) Suponemos que la densidad de yacimientos que encontramos en la superficie o muy cerca de ella, se mantiene más o menos constante hasta una profundidad de unos 3.000 metros. No existe ninguna razón geológica especial para establecer este límite, ya que, además de conocerse yacimientos que se extienden

por debajo de esa profundidad, todo hace suponer que es posible la presencia de depósitos minerales a profundidades mucho mayores. Utilizamos esa cota máxima, en primer lugar, porque es perfectamente accesible con las actuales técnicas de explotación. Además, porque teniendo en cuenta que la profundidad media de la capa sedimentaria que cubre el 75% de la corteza emergente es de ese orden (unos 2.800 metros), es razonable suponer que las características geológicas generales de esa porción de la corteza es muy semejante a la que presenta en los primeros 300' m que tomamos como referencia.

El suponer que por lo menos en los primeros tres o cuatro mil metros de la corteza de la tierra, la frecuencia y distribución de yacimientos no puede ser muy diferente de la que se observa en los primeros centenares de metros, tiene muy sólida fundamentación geológica. En la actual superficie de los continentes afloran rocas de todos los períodos geológicos; en este sentido esa superficie representa un buen corte transversal de todas las rocas formadas en el pasado de la tierra.

Los yacimientos minerales se forman en su inmensa mayoría asociados con dos tipos de procesos: sedimentarios y magnéticos. (Los dos procesos de metamorfismo regional, salvo pocas excepciones, transforman pero no generan yacimientos)\*.

Los yacimientos de origen sedimentario se han formado en todos los períodos geológicos, aunque ciertos tipos parecerían haber sido más frecuentes en

\* Los estudios de las últimas décadas parecen indicar que muchos yacimientos tradicionalmente incluidos dentro de los generados por procesos magnéticos —en particular los generalmente denominados hidrotermales— se formaron realmente por procesos muy complejos, de los cuales los elementos magnéticos son sólo una parte. Esta distinción, sin embargo, no afecta los supuestos en que se basan nuestros cálculos.

algunos de ellos. Los que se explotan ahora se formaron en períodos que van desde el Precámbrico hasta la actualidad. El hecho de que depósitos sedimentarios muy antiguos hayan alcanzado la superficie actual de la tierra, se debe a los complejos procesos tectónicos posteriores a su formación, que afectaron a los estratos sedimentarios a través de la historia de la tierra, y no tiene ninguna relación con la existencia misma de los yacimientos. En consecuencia, es muy lógico suponer que los sedimentos yacientes ahora a grandes profundidades contienen los mismos tipos de yacimientos, y con la misma frecuencia, que sus porciones aflorantes. La única excepción son posiblemente los yacimientos residuales, que debido a su ubicación y características físicas, son fácilmente destruidos por la erosión.

Es cierto que las rocas de los distintos períodos geológicos no afloran en forma proporcional a su volumen total, y esto seguramente afecta a la estimación. Como este error en algunos casos será negativo y en otros positivo, en esta primera aproximación suponemos que no afecta el orden de magnitud de los resultados.

Para los yacimientos cuyo origen está asociado a procesos magnéticos, es posible que la hipótesis de una distribución uniforme en profundidad no se aplique totalmente. En efecto, muchos especialistas suponen que ciertos tipos de depósitos comúnmente incluidos en esta clase están asociados con fenómenos que ocurren relativamente cercanos a la superficie, en especial la zona de circulación de aguas de origen meteórico, y que por lo tanto estos depósitos deben ser más frecuentes a relativamente poca profundidad. Existen en cambio otros tipos de yacimientos —los de segregación magnética, los hidrotermales de alta presión y temperatura— cuya frecuencia muy probablemente aumenta con la profundidad. En suma, y teniendo en cuenta que la profundidad considerada

está completamente dentro del rango de los yacimientos hidrotermales (los cuales, debido a su zonación vertical, son los que pueden variar más en relación con la profundidad) existen todas las razones para suponer que, salvo algunas posibles excepciones, la distribución y frecuencia de estos depósitos no varía sensiblemente dentro de los primeros 3.000 metros de la corteza.

Lo anterior se refiere a los yacimientos de afiliación magmática formados en tiempos geológicos relativamente recientes, cuando la superficie topográfica a la cual estaban asociados coincidía aproximadamente con la actual. A esta clase pertenece gran parte de los yacimientos vetiformes de metales no ferrosos explotados en la actualidad, y que se formaron a partir de fines del Mesozoico.

Es muy posible que una parte considerable de los yacimientos de origen magmático de poca profundidad originados en períodos geológicos más antiguos haya sido destruida por la erosión. Este hecho no afecta para nada nuestro cálculo, ya que éste se basa en la frecuencia observada de yacimientos en la parte superficial de la corteza, y que se supone representativa de sus primeros 3.000 metros. Es posible sin embargo, que parte de esos yacimientos de poca profundidad, asociados con antiguos relieves cubiertos luego rápidamente por sedimentos o por efusiones volcánicas, y que nunca fueron expuestos a la erosión, se hayan preservado. Esto podría hacer aumentar la frecuencia de estos yacimientos en profundidad, aunque no es presumible tampoco que este posible incremento afecte sensiblemente nuestra estimación.

Para el cálculo usaremos los siguientes elementos\*:

**Recursos Actuales (RA):** Son los recursos conoci-

\* Este cálculo fue hecho con la colaboración del Dr. Alberto Lapidus.

dos que pueden ser explotados en las condiciones tecnológicas y económicas actuales.

**Recursos Explotados (RE):** Es la cantidad de cada mineral extraída desde que se inició su explotación hasta 1968 inclusive. Las cifras que se dan son indudablemente menores que las reales, debido a la falta de información estadística sobre el pasado.

**Recursos Totales Actuales (RTA):** Es el resultado de la suma de los Recursos Actuales y los Recursos Explotados (RA + RE).

**Recursos Totales Estimados (RTE):** Son los recursos minerales totales explotables en las condiciones económicas y tecnológicas actuales existentes en la corteza emergente hasta una profundidad de 3.000 metros.

La fórmula para calcular los recursos totales estimados serán entonces:

$$RTE = RTA \times 2 \times 10$$

Donde:

2 = Razón entre los recursos totales conocidos y los recursos totales estimados hasta 300 m de profundidad.

10 = Razón entre la profundidad máxima considerada (3.000 m) y la profundidad media de las explotaciones actuales.

Las cantidades estimadas de recursos explotados para alguno de los metales más importantes, en los primeros 3.000 metros de la corteza terrestre, y su duración al ritmo de consumo actual (1968), sería:



**HIERRO\***

RA = 79.000 millones de toneladas  
 RE = 11.000 millones de toneladas (800 - 1968)  
 RTA = 90.000 millones de toneladas  
 RTE = 90.000 MM x 2 x 10 = 1.800.000.000.000  
 Consumo (1968): 573.000.000 t  
 Duración de las reservas al consumo actual: 3.140 años.

**COBRE**

RA = 298.000.000 t  
 RE = 154.000.000 t (1801 - 1968)  
 RTA = 452.000.000 t  
 RTE = 9.040.000.000 t  
 Consumo 1968: 5.700.000 t  
 Duración al consumo actual: 1.580 años

**PLOMO**

RA = 108.000.000 t  
 RE = 110.000.000 t  
 RTA = 218.000.000 t  
 RTE = 4.360.000.000 t  
 Consumo (1968) 3.600.000 t  
 Duración al consumo actual: 1.210 años.

**CINCO**

RA = 152.500.000 t  
 RE = 127.500.000 t,  
 RTA = 280.000.000 t  
 RTE = 5.600.000.000 t  
 Consumo (1968): 4.800.000 t  
 Duración al consumo actual: 1.166 años

\* Los datos de reservas para los metales han sido compilados de diversas fuentes, especialmente Mineral Yearbook, Metal Statistics y Engineering and Mining Journal.

Esta estimación puede hacerse también para otros recursos minerales, pero los que anteceden son suficientes para dar una idea del orden de magnitud de las reservas probablemente contenidas en la parte superior de la corteza. Si se tomara una profundidad mayor, las reservas calculadas serían obviamente mucho más grandes.

**RECURSOS PARAMARGINALES Y SUBMARGINALES**

Las reservas minerales pueden, además, aumentar e históricamente es la regla y no la excepción, aun sin el descubrimiento de nuevos depósitos. En el caso de los "recursos paramarginales". Según la definición de McKelvey son las reservas que podrían ser explotadas a un costo 1,5 veces más alto que el prevaleciente en las *condiciones tecnológicas actuales*. Esta brecha de costo puede ser salvada fácilmente por la tecnología - como se ha demostrado una y otra vez en los últimos decenios - y permitiría un gran aumento de las reservas al incorporar minerales de baja ley, que no se incluyen todavía como reservas.

McKelvey considera también los recursos que denomina submarginales, y que son los que se podrían explotar en las condiciones tecnológicas vigentes a costos dos o tres veces superiores a los actuales, y que el avance de la tecnología permite prever que serán aprovechables en los próximos 30 ó 50 años.

Para la mayoría de los minerales, la incorporación de los actuales recursos paramarginales y submarginales permitiría incrementar varias veces las reservas conocidas.

El caso del cobre puede ser un buen ejemplo de lo anterior. Basándose en la historia conocida de los yacimientos, S.G. Lasky (1950) estableció una relación general entre la cantidad de reservas y el conte-

nido medio de cobre de las mismas. Esta relación (usada frecuentemente en el conocido informe de la President's Material Policy Commission (1952)) postula un rápido aumento de las reservas a medida que desciende el contenido medio del cobre. Teniendo en cuenta esta relación, Landsberg y al. (1963) suponen que las reservas totales de cobre fuera de Estados Unidos y excluidos los países del área socialista (unos 200.000.000 de toneladas según esa estimación, contenidos en minerales con leyes de cobre que varían entre 6% en el Congo, y 1 - 2% en Chile) podrían llegar a 400 ó 500 millones de toneladas si se llega ya a explotar el mineral de hasta 1% de cobre, y hasta 800 ó 1.000 millones si la ley de explotación bajara hasta 0,5%. Como es bien sabido, es posible ahora explotar depósitos con 0,4% de cobre, esencialmente a los mismos costos que los de 1 ó 2%.

El mismo aumento exponencial de las reservas con la disminución de la ley que se encuentra en el cobre, ha sido determinado para el manganeso, aluminio, titanio, níquel, plomo, cinc y colúmbio; lo que muestra que esta relación no es excepcional, sino probablemente una ley general de distribución de los elementos en la naturaleza. (Brooks, 1973).

Las reservas de bauxita apta para la producción de aluminio, aumentaron también enormemente en los últimos treinta años, debido a que el adelanto tecnológico permitió aprovechar materiales de "menor" calidad. En 1930 la bauxita para ser económicamente explotable, debía tener un contenido medio de 60% de alúmina ( $Al_2O_3$ ) y un máximo de 8% de sílice. Veinte años después el contenido medio de alúmina aceptado había bajado a 50% y el máximo de sílice subido a 15% (en la Unión Soviética se explotan bauxitas con contenidos de sílice considerablemente mayores).

Hasta la década del 50 la fuente principal de azufre la constituían los depósitos de tipo Frasch de

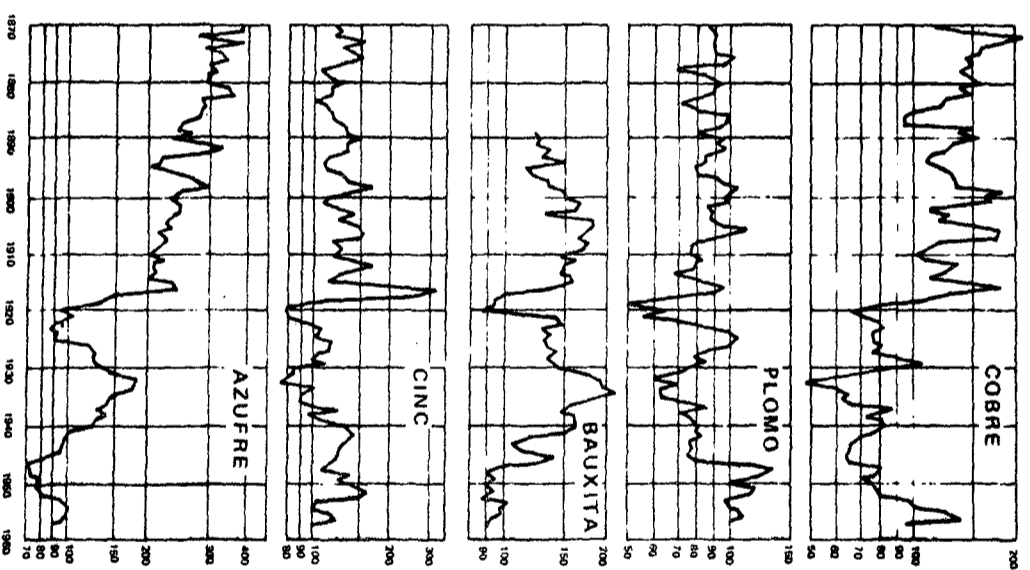


Figura 3: Evolución de los precios deflacionados del cobre, plomo, bauxita, cinc y azufre, en Estados Unidos en el período 1870-1960. (Porter y Christy, 1968)

azufre nativo subterráneo. Debido al alza de precio registrada a principios de esa década se comienzan a buscar fuentes alternativas de azufre. Los principales recursos "no convencionales" fueron los petróleos y gases naturales con alto contenido de azufre, que actualmente proveen una parte considerable de la demanda de ese elemento, a pesar que las reservas tipo Frash aumentaron también considerablemente en las últimas dos décadas. Otras fuentes alternativas, y en uso en algunas partes del mundo son pirita, yeso y anhidrita, cuyas reservas son prácticamente inagotables. Finalmente, si las medidas de control de la contaminación obligaran a recuperar el azufre que se emite a la atmósfera en humos de origen industrial, el mercado podría verse tan inundado de ese elemento, que la producción primaria tendría prácticamente que paralizarse (Fischman y Landsberg, 1972).

Los siguientes son otros ejemplos de disminución de leyes explotables (Guillermín, 1972):

Plomo de 2,1% en 1925 a 0,6% en 1971  
 Cinc de 2,75% en 1925 a 0,6% en 1971  
 Estaño de 1,2% en 1905 a 0,015% en 1971

Como puede verse en la Figura 3, pese a estos cambios en el tipo y leyes del material explotado, los precios de los elementos que hemos mencionado se han mantenido esencialmente constantes en los últimos casi cien años.

Se podrían dar otros ejemplos, pero los examinados son suficientes para mostrar que los recursos minerales disponibles aumentan continuamente, sin necesidad de nuevos descubrimientos, a medida que avanza la tecnología, aun sin producirse cambios revolucionarios en ésta.

## LOS RECURSOS DE LOS FONDOS MARINOS

En los últimos años se ha revelado la existencia de vastos depósitos de nódulos y costras de manganeso en el fondo de los océanos, con contenidos elevados de algunos de los metales industriales más importantes.

Los muestreos realizados hasta ahora cubren sólo una pequeña parte de la superficie total de los océanos, pero la frecuencia con que esos muestreos encuentran el material manganesífero, muestra que esos depósitos cubren sin duda la mayor parte de los fondos oceánicos.

La densidad de los depósitos varía considerablemente en distintas regiones. La concentración promedio en el Pacífico oriental, de acuerdo con la información disponible, es de 0,78 gr/cm<sup>2</sup>, mientras que en la parte central es de 1,45 gr/cm<sup>2</sup> (Mero, 1960).

El contenido metalífero también es variable. Según Mero, esos contenidos serían aproximadamente los siguientes:

	Pacífico Promedio %	Atlántico Promedio %
Manganeso	24,2	16,3
Cobalto	0,35	0,31
Níquel	0,99	0,42
Cobre	0,53	0,20

Suponiendo una densidad media de 1 gr/cm<sup>2</sup>, las reservas totales del Océano Pacífico solamente podrían ser del orden de 1,8 x 10<sup>12</sup> toneladas de material nodular, con alrededor de 4 x 10<sup>11</sup> toneladas de manganeso, 10<sup>10</sup> toneladas de cobre, 2 x 10<sup>10</sup> toneladas de níquel y 1,3 x 10<sup>10</sup> toneladas de cobalto. Estas reservas serían suficientes para satisfacer la demanda mundial, al consumo actual, por varios miles

de años. Aunque las cifras no pretenden ser exactas, son suficientes para dar una clara idea de la magnitud de estos recursos.

Es interesante ver también cuáles son las posibilidades de explotación con los conocimientos tecnológicos actuales. Existen ya varias empresas interesadas en la explotación de esos recursos, que han solicitado concesiones de exploración y han realizado cálculos de costo de producción.

Las posibilidades de explotación económica de los nodulos marinos son difíciles de estimar con exactitud en base a los cálculos efectuados hasta ahora. Sorensen y Mead (1968) basándose en los contenidos medios de los nodulos dados por Mero, y suponiendo que la explotación se realiza en el Pacífico a unos 6.500 km de la planta de procesamiento (cerca de Los Angeles) llegan a la conclusión de que, en las condiciones actuales, la explotación daría una pérdida económica considerable. Otro cálculo realizado por el *Bureau of Mines Marine Mineral Technology Centre* (Christy, 1970), usando algunos datos técnicos distintos de los usados por Sorensen y Mead llega a la conclusión de que es posible la explotación económica de esos recursos, siempre que el costo de desarrollo no sea afrontado por la empresa explotadora.

Los cálculos mencionados se efectuaron teniendo en cuenta los precios corrientes de los metales beneficiados. Una dificultad adicional, sin embargo, es el hecho de que por razones de economía de escala los volúmenes iniciales de extracción deben ser muy grandes, por lo que es de esperar que afecte negativamente los precios de los metales extraídos. Esta variación en los precios ha sido estimada también en valores distintos por diferentes autores. Según Brooks (Christy, 1970) los precios bajarían en las siguientes proporciones: manganeso 45%, níquel 7%, cobalto 33%. Para Sorensen y Mead, en cambio, estas bajas serían de 3.13%, 3.67% y 27.43%, respectivamente.

En definitiva, el momento y la forma en que los recursos metalíferos de los fondos marinos puedan ser explotados dependerá del abaratamiento de costos producidos en los métodos de extracción y tratamiento, usando procedimientos que ya están al alcance de la tecnología actual. Refiriéndose a las perspectivas de este proceso dice Christy (1970): "La mayoría de los comentarios hechos más arriba (se refiere a los cálculos de costos que hemos mencionado) se refieren al empresario pionero —la primera explotación minera—. Pero como dicen Sorensen y Mead "las dragas de segunda generación, diseñadas a la luz de la experiencia ganada por la firma pionera, podría producir porcentajes de recuperación mucho más altos. . . Por lo tanto, va a ser conveniente esperar para ser la segunda o tercera firma en la industria. No obstante, debe señalarse que las ganancias procedentes de reducciones en costo en el segundo y tercer esfuerzo pueden ser anuladas por pérdidas originadas por una baja en los precios, debido a un exceso de producción lanzada al mercado. . ."

"Otros factores pueden tender a agravar el efecto. Con alto capital y bajo costo de operación, los productores son tentados a producir todo lo que pueden lo más rápido posible, de manera de recuperar las inversiones. Exigencias de rendimiento que podrían ser impuestas por un régimen internacional para impedir la especulación en la tenencia de los derechos de explotación, podrían también estimular artificialmente la producción. Otros factores conducentes al mismo resultado podrían incluir competencia por prestigio entre naciones, y el deseo de las compañías de ganar experiencia y ventajas competitivas sobre otras compañías. Como dice Brooks: "mientras no es difícil crear instituciones para impedir una carrera para obtener concesiones en los fondos oceánicos, esto ayuda poco a contrarlar la sobrecapitalización y sobreproducción debido a la naturaleza misma del recurso."

“Eventualmente el mercado alcanzará un equilibrio. Se encontrarán nuevos usos para los metales explotados, y nuevos productores podrán incorporarse sin afectar significativamente las ganancias. Pero el ajuste se producirá lentamente. El período de ajuste será difícil para los productores, que podrían experimentar pérdidas o aun bancarrotas. Pero con una clase de excepción, eso no será particularmente perjudicial para la sociedad. Los ingresos provenientes de regalías y rentas (suponiendo que se obtengan) podrían ser bajos, pero la sociedad se beneficiará recibiendo mayores cantidades de materias primas a más bajo precio. El período de ajuste, sin embargo, será difícil para aquellos estados que reciben una porción relativamente alta de sus ingresos de exportaciones de los metales explotados.”

En suma, si bien es posible que transcurra todavía un largo tiempo antes de que los recursos minerales de los fondos marinos sean explotados, es evidente que esto depende de problemas técnicos y de mercado cuya solución no depende de cambios revolucionarios en el futuro. En consecuencia, son recursos que aumentan las reservas disponibles para la humanidad en algunos de los minerales más importantes, en cifras del orden de miles de años a los actuales niveles de consumo.

#### LAS PERSPECTIVAS A MUY LARGO PLAZO

El breve análisis anterior indica que las reservas minerales disponibles *explotables en las condiciones tecnológicas actuales o del futuro próximo*, son muy probablemente suficientes para varios miles de años a los actuales niveles de consumo. En vista de esta conclusión, no parece necesario tratar de determinar qué recursos adicionales podría contener el planeta. Dada la confusión que existe con respecto al problema de las reservas últimas de recursos no renovables de la tierra, sin embargo, agregaremos algunas reflexiones.

En primer lugar, para estimar las reservas probables de recursos convencionales que aún contiene el planeta, hemos tomado en cuenta sólo los primeros 3,000 metros de la corteza, y la superficie de los fondos oceánicos. Como ya se ha visto, no existe ninguna razón para suponer que los yacimientos minerales no se extiendan a profundidades mucho mayores, aunque con variaciones en la composición del conjunto de recursos. Algunos tipos de yacimientos serán seguramente menos frecuentes a mayor profundidad, mientras que otros serán más abundantes, pero es indudable que se podrían aumentar posiblemente en varias veces las reservas conocidas de la mayoría de los minerales de interés industrial. A ellos podrían agregarse yacimientos eventualmente explotables en las plataformas continentales, y aun debajo de la capa de sedimentos de los fondos marinos. Pero los recursos que hemos denominado *convencionales* —es decir, los explotables en las condiciones económicas actuales

y del futuro próximo— son sólo una fracción desconocida—pero sin duda pequeña en términos absolutos— de los recursos totales eventualmente disponibles para la humanidad.

El desarrollo histórico del aprovechamiento de materiales geológicos, prueba que es muy difícil predecir qué fuentes se utilizarán en el futuro lejano como proveedoras de materias primas de origen mineral; por lo tanto sólo daremos algunos ejemplos a título ilustrativo.

El hierro es uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre, y todo indica que los yacimientos convencionales continuarán siendo la fuente principal de abastecimiento por mucho tiempo. Existen otras fuentes de hierro, sin embargo, con enormes reservas potenciales: las rocas básicas y ultrabásicas de la corteza tienen contenidos de hierro aproximados de 8,5% y 9,8% respectivamente. Esto significa que un kilómetro cúbico de rocas básicas contiene aproximadamente  $2.6 \times 10^8$  toneladas de hierro y uno de rocas ultrabásicas más  $2.2 \times 10^8$  toneladas. Para dar una idea de lo que esto significa, basta señalar que este tipo de rocas cubre aproximadamente el 5% de la corteza terrestre. Sobre la posibilidad de utilización de este tipo de recursos dice Flawn (1966): "El gran conjunto de rocas ígneas silíceas contiene vastas cantidades de minerales, algunos en concentraciones bastantes altas. La utilización de estas rocas no es todavía práctica, tecnológica y económicamente. No obstante, en el futuro estas reservas serán utilizadas *selectivamente*. La selección se basará en exploración y análisis intensivos, para determinar la máxima concentración de este o aquel grupo de elementos. La llave del éxito consiste en avances en las técnicas de molienda de rocas, separación de minerales, y recuperación económica de varios elementos mas bien que de uno".

Sobre este tema dice también Brooks: "Por lo tan

to, es simplemente falso... que las rocas comunes no serán nunca explotadas. En realidad, ya estamos explotando como subproductos, minerales cuya ley promedio en los yacimientos es menor que en la corteza terrestre (el titanio explotado en las arenas de playas es un ejemplo). Explotando la tecnología como capital más bien que los yacimientos, el hecho mismo de que sean rocas comunes puede hacerlas muy atractivas. Cuanto más común es la roca, más fácil es ajustar el yacimiento a la tecnología, mas bien que a la inversa. En resumen, a través de modestos avances en la tecnología, los depósitos minerales se hacen más abundantes y distribuidos en más regiones".

Refiriéndose al descenso continuo de las leyes de explotación, dice Guillemín (1972): "En el límite, y para los pesimistas, se debe recordar que una fuerte proporción de las rocas de la tierra contienen metales en trazas (Pb, Zn, Cu, etc.) con tenores del orden de 100 a 300 gramos por tonelada para cada metal, por que 100 gr/ton de un metal en un km<sup>3</sup> de granito representa 270.000 toneladas de ese elemento". Agrega después: "Existen numerosas menas potenciales, como los esquistos carbonosos que tienen importantes reservas para numerosos elementos; los macizos graníticos ricos en elementos de trazas; las rocas básicas con alto tenor en níquel, cromo, cobalto y platino; las rocas carbonáticas ricas en plomo y cinc; ciertos sedimentos submarinos y, en fin, las salmueras ricas en metales del tipo descubierto en el Mar Rojo, salmueras que se pueden considerar menas líquidas".

El caso del aluminio es particularmente interesante. Como ya hemos visto, las reservas utilizables de bauxita se han multiplicado en los últimos decenios, a medida que se podían explotar materiales de menor "calidad". El punto más importante, sin embargo, es que en la actualidad son reservas potenciales de aluminio materiales no bauxíticos que han sido ya tratados en plantas con éxito (Brubaker, 1966). Entre

ellas figuran anortosita, nefelina, y arcillas de alto contenido de alúmina. Teniendo en cuenta que las arcillas figuran entre los materiales más abundantes en la corteza terrestre, esto eleva las reservas de aluminio explotables en las condiciones tecnológicas actuales, a límites prácticamente indefinidos.

Se podría indicar muchos otros casos de nuevos recursos potenciales que en algunos casos ya se han comenzado a utilizar, —la recuperación del azufre de petróleo, anhídrido y yeso; el descubrimiento de concentraciones comerciales de berilo, extraído hasta ahora sólo del berilo de las pegmatitas, en berranita, bargilita y phenacita, etc.— pero lo que importa destacar esencialmente es que la distribución de los elementos en la corteza terrestre recién comienza a ser investigada en detalle, por lo que es previsible el descubrimiento continuo de nuevas concentraciones minerales. Esto, combinado con el incesante progreso de la tecnología, continuará seguramente desarrollando más fuentes de recursos minerales en forma mucho más acelerada que en el pasado.

¿En qué secuencia se irán incorporando los nuevos recursos a la economía? Algunas hipótesis en boga parecen suponer que un nuevo recurso se incorpora al sistema productivo cuando se ha agotado o está a punto de agotarse la fuente "originaria" de esa materia prima. Sobre este supuesto tácito se basa el temor muchas veces expresado en la literatura reciente que, aunque la cantidad última de recursos posibles sea prácticamente ilimitada, una eventual "brecha" temporal entre el agotamiento de un tipo de reserva y el desarrollo de la capacidad de utilizar otra nueva, pueda crear "cuellos de botella" en el abastecimiento de materias primas, de carácter transitorio pero catastrófico para la economía.

La historia muestra que esa situación es extremadamente improbable. En realidad sería muy difícil encontrar el caso de un recurso que se haya puesto

en explotación, debido al agotamiento de otro usado anteriormente. Lo que ha sucedido siempre es que comienzan a utilizarse nuevos tipos de recursos, sin que los aprovechados hasta ese momento presenten ningún peligro de agotamiento. Los compuestos nitrogenados para la fabricación de fertilizantes comenzaron a producirse mediante la fijación del nitrógeno del aire cuando todavía quedaban enormes reservas de nitratos naturales; la taconita de los Estados Unidos, que exige un tratamiento previo para ser utilizada como mineral de hierro, se está aprovechando desde hace varios años, pese a la existencia en el mundo de reservas de minerales de alta ley suficientes para muchas décadas; se está ya produciendo aluminio a partir de materiales no bauxíticos mientras se descubren continuamente nuevos yacimientos de bauxita de alta ley que pasan a engrosar las ya grandes reservas de este material; se ha desarrollado ya la tecnología para, explotar yacimientos de cobre con contenidos de 0,4% mientras existen todavía grandes reservas conocidas de minerales de mayor ley; se estudian ya los métodos de explotación de los nódulos de manganeso de los fondos oceánicos, cuando no existe todavía peligro de escasez de los metales a beneficiarse, etc.

Todo indica que lo mismo sucederá en el futuro. No existe ninguna razón para suponer que los yacimientos ubicados a más profundidad en la corteza comenzarán a explotarse cuando se hayan agotado los recursos superficiales (en realidad ya se explotan yacimientos minerales a gran profundidad). Lo más probable es que se sigan incorporando materiales de baja ley, al mismo tiempo que se exploran las partes no conocidas de la corteza, comenzando por aquellas que ofrecen posibilidades inmediatas más favorables. Los depósitos de los fondos marinos se empezarán a explotar cuando las condiciones de la demanda lo permitan, simultáneamente con los depósitos continentales. La secuencia exacta de estos desarrollos depen-

derán de condiciones tecnológicas, económicas y de organización social, que no es posible ni tiene sentido tratar de prever en detalle.

#### LOS MATERIALES CRITICOS

Se puede argumentar, y se ha hecho con frecuencia, que si bien parece difícil que se presenten situaciones críticas con los recursos minerales más importantes, es posible que lleguen a ser escasos, o agotarse totalmente, algunos elementos menores cuantitativamente pero que son muy importantes para la industria moderna. Como se trata de una hipótesis que no puede descartarse por completo, conviene considerarla brevemente.

Sin tratar de hacer una enumeración exhaustiva, que no viene al caso, los usos más importantes de las materias primas minerales, excluidos combustibles, son: estructurales, eléctricos, en ferroaleaciones y químicos.

Los materiales estructurales no metalíferos son prácticamente inagotables. Los principales metales estructurales son hierro y aluminio, que figuran entre los elementos más abundantes de la corteza terrestre (Al: 8,13%; Fe: 5%). Las reservas de recursos de aluminio explotables con los conocimientos tecnológicos actuales son, como ya hemos visto, virtualmente ilimitadas. Las reservas actuales de mineral de hierro alcanzan para el futuro previsible; si consideramos las reservas en rocas ricas en hierro, la situación es similar a la del aluminio.

En lo que se refiere a los usos eléctricos, esencialmente como conductores, los principales elementos son cobre y aluminio. Aun suponiendo que llegara a escasear el cobre, en un futuro muy lejano, el aluminio, virtualmente inagotable, puede remplazarlo en casi todos los usos, especialmente en aquellos que requieren un mayor volumen de metal, como los conductores de alta tensión.

Algunos de los elementos que se usan en ferroaleaciones —en particular tungsteno y molibdeno— tienen reservas conocidas relativamente escasas. Aun suponiendo que las reservas que se vayan descubriendo en el futuro no sean suficientes para cubrir la creciente demanda mundial —lo cual es una hipótesis extrema— no debe olvidarse que esos elementos son sustituibles con muy pocos inconvenientes tecnológicos por otros metales, tales como cromo, níquel y cobalto. Las reservas de cromo conocidas en el mundo son muy grandes; en cuanto al níquel y al cobalto, aun sin considerar los recursos en explotación, las reservas contenidas en los nodulos marinos alcanzan, al nivel actual de uso, para muchas decenas de miles de años.

Los dos productos de uso químico quizá más importantes en el mundo moderno son el azufre y el fósforo, el primero por su importancia en la industria y el segundo por su uso como fertilizante.

Al azufre ya nos hemos referido antes. La preocupación por una posible escasez de fósforo se ha expresado en estos últimos años, en especial en relación con la literatura catastrófica. La situación real, sin embargo, no parece justificar esa alarma. Las reservas actuales de fosforitas en explotación parecen adecuadas para el futuro previsible (Landsberg y al., 1963). Por otra parte, y debido a que los yacimientos sedimentarios de fósforo son difíciles de identificar sin un estudio detallado, es muy probable que un esfuerzo metódico de exploración multiplique las reservas conocidas. Es una situación parecida a la de la bauxita, que por las mismas razones, es un material que pasa desapercibido, salvo cuando se realizan investigaciones detalladas con el objeto específico de identificarla.

Existen también enormes depósitos de fosforitas en los fondos marinos cercanos a los continentes, que podrían ser explotados económicamente en las condiciones actuales, y que extenderían posiblemente las reservas disponibles al futuro lejano. Además, el fós-



foro es uno de los componentes menores de muchas rocas y menas y eventualmente podría recuperarse como un subproducto del tratamiento de las mismas.

Existen muchos otros elementos de uso químico, pero estos son tan variados, y el progreso de la industria química tan acelerado, que las posibilidades de sustitución son prácticamente ilimitadas.

En resumen, nada indica que aun en un horizonte temporario a muy largo plazo, existe peligro de escasez en recursos minerales vitales para el sistema productivo actual. La escasez eventual de algún elemento menor sólo podría originar cambios tecnológicos poco significativos para el sistema productivo global.

## LOS RECURSOS ENERGÉTICOS

Los principales combustibles minerales fósiles son: petróleo, gas y carbón.

Las reservas conocidas de petróleo eran de unos 120.000 millones de toneladas en 1970, y las estimadas oscilaban entre 200 y 300.000 millones de toneladas. En el período 1960 - 1970 las reservas localizadas en el mundo aumentaron en unos 60.000 millones de toneladas, mientras que el consumo, en el mismo período, fue de alrededor de 16.000 millones de toneladas, es decir, el 27% de las nuevas reservas (Angelini 1973). Además, durante los últimos años se han descubierto depósitos petrolíferos en zonas hasta ahora vírgenes tales como Argelia, Libia, Alaska, Mar del Norte y Australia.

Las reservas de gas natural estimadas también en los últimos años oscilan entre  $1,5 \times 10^{14}$  y  $5,82 \times 10^{14}$  metros cúbicos.

Para dar una idea del incremento de reservas que se obtiene cuando se consideran los recursos potenciales y los adelantos tecnológicos, se puede tomar el caso de los Estados Unidos. Es un ejemplo muy ilustrativo, por tratarse de unas de las regiones más exploradas y explotadas de la tierra.

El total de petróleo producido en ese país hasta 1972, es de unas 12.180.000.000 toneladas. Según un reciente cálculo del National Petroleum Council, las reservas probadas y potenciales recuperables en las condiciones tecnológicas actuales --sin considerar todas las áreas favorables del país, tanto en la superficie emer-

gente como en la plataforma submarina— son de unas 24.300.000 toneladas, es decir, de alrededor del doble del total de reservas explotadas hasta ahora, y unas cinco veces mayor que las reservas recuperables conocidas (4.380.000.000 de toneladas) (Brobst y Pratt, 1973).

Es necesario tener en cuenta, sin embargo, que el promedio histórico de recuperación de las reservas totales de petróleo en Estados Unidos ha sido de 22%, y se estima actualmente en alrededor del 30%. Esto significa que en el pasado el 78% de las reservas quedaban en el yacimiento, y que ahora se deja más o menos el 70%. El NPC estima que esta recuperación aumentará gradualmente hasta alcanzar el 42% en el año 2000, y eventualmente el 60%. Esto incrementará el total de reservas potenciales recuperables a 58.000.000.000 de toneladas, o sea a cerca de cinco veces el total de petróleo explotado hasta ahora, y a trece veces las reservas conocidas recuperables en las condiciones tecnológicas actuales. Es una cantidad suficiente para abastecer las necesidades mundiales por casi 30 años al nivel de consumo actual.

En el gas la recuperación es del orden del 80%, y por lo tanto las reservas dejadas en los yacimientos comunes son mucho menos importantes que en el petróleo. Los recursos paramarginales y submarginales de gas pueden ser importantes, sin embargo, en rocas no explotadas hasta ahora, como los estratos impermeables y el carbón. El gas oculto en carbón está ya siendo explotado en algunas minas europeas.

El consumo de petróleo en 1970 fue de unos 2.000 millones de toneladas. La tasa de crecimiento del consumo en los últimos 20 años superó, en ambos combustibles, el 8% anual acumulativo. A este ritmo se estima que las reservas totales de hidrocarburos líquidos y gaseosos durará alrededor de 100 años.

Este combustible puede también extraerse de fuentes "no convencionales". La principal de éstas las cons-

tituyen los esquistos petrolíferos o bituminosos, que son rocas sedimentarias impregnadas de hidrocarburos. Los recursos más grandes conocidos en el mundo de estos materiales están en Estados Unidos. Se trata de sedimentos depositados en antiguos lechos de lagos, y que cubren una superficie de unos 40.000 km<sup>2</sup> en los estados de Utah, Colorado y Wyoming. Las reservas potenciales de petróleo de estos depósitos se estiman en 300.000 millones de toneladas, es decir, una cantidad del orden de magnitud del total de reservas convencionales de petróleo conocidas en el mundo (Guillemin, 1973). Además de las citadas se conocen otras reservas de esquistos petrolíferos en el mundo, muchos de ellos de magnitud desconocida debido a la falta de estudios detallados.

Las reservas conocidas de combustibles sólidos fósiles (carbón y lignito) son mucho mayores que las de petróleo y gas. A la tasa actual de aumento del consumo (2% para el carbón y menos del 4% para el lignito) se estima que esas reservas alcanzarían por lo menos para unos cuatrocientos años.

Los combustibles energéticos más importantes para el futuro sin embargo, son los nucleares.

Las reservas conocidas de uranio en 1970 eran de unas 760.000 toneladas de óxido (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) disponible a un precio inferior a los 10 dólares la libra (OCDE, 1970), mientras que la producción en el mismo año fue de unas 23.000 toneladas.

En este caso, como en los que se han visto antes, las reservas conocidas tienen poco que ver con las reservas potenciales totales. Las razones principales son: a) el uranio recién se comenzó a buscar intensivamente después de la segunda Guerra Mundial. Quedan todavía enormes áreas por explorar en detalle, y los recursos cubiertos por rocas apenas han sido tocados; b) en la actualidad sólo se explotan reservas cuyo valor por libra es mayor de 10 dólares. En el uranio se cumple el principio del aumento exponencial de las reservas en

función de la disminución de la ley (en este caso expresada en valor por libra); en consecuencia, un pequeño aumento del precio, o un progreso en la tecnología extractiva, multiplicaría grandemente las reservas conocidas.

Además, el uranio es uno de los elementos relativamente abundantes en la corteza (es más abundante que el plomo, por ejemplo) pero muy disperso. En las rocas ácidas (granitos y sus derivados) se lo encuentra diseminado (0,03%) pero en abundancia suficiente para constituir una reserva potencial de duración prácticamente indefinida. En el mar aparece con una concentración de 0,3 mg por metro cúbico.

En estudios recientes efectuados en Suecia se ha demostrado que se puede extraer uranio de los granitos a un costo algo inferior al doble del actual precio mundial. En la Comisión de Energía Atómica del Reino Unido se han realizado evaluaciones que indican que el uranio puede ser extraído del mar a un costo similar al proveniente de los granitos (Gabor, 1973).

¿Cuál es la incidencia de este aumento del costo en la generación de energía nuclear? En los reactores actuales —que sólo aprovechan aproximadamente el 0,7% del uranio natural utilizado— la incidencia del costo del uranio sobre el costo de producción de la energía, es aproximadamente de un 5%. En los reactores regeneradores —de los cuales existen ya varios prototipos operando, y se espera que entren en producción comercial alrededor de 1980— la eficiencia en el uso del uranio es aproximadamente 100 veces superior; además, podrán utilizar torio, que es un elemento más abundante que el uranio. Como puede apreciarse, en los reactores convencionales el aumento del costo de la energía producido por la duplicación del costo del combustible no sería significativo; en los regeneradores, sería completamente despreciable.

En resumen, las reservas potenciales de uranio y torio son suficientes para asegurar las necesidades de

energía por un plazo prácticamente indefinido. Si se resuelve el problema de la producción de energía por medio de la fusión nuclear —fusión del deuterio o transformación del helio en litio—, lo que según los distintos especialistas puede hacerse en los próximos 20 a 50 años, las reservas energéticas sobrepasarán posiblemente el período de estabilidad biológica de la especie humana, porque puede computarse en centenares de millones de años (Guillemin, 1972).

La duración de los distintos tipos de combustibles fósiles dependerá en gran medida de las modalidades de uso en la producción de energía. Se estima que para el año 2000 más de la mitad de la generación de energía eléctrica provendrá de generadores nucleares. El uso de petróleo y carbón con ese fin disminuirá en consecuencia; por otra parte, es mucho más racional económicamente destinar los combustibles fósiles a usos petroquímicos que a quemarlos como combustibles, y esa es la tendencia que muy probablemente predominará en el futuro.

La duración real de las reservas de petróleo y gas, en particular, dependerá también de las políticas de sustitución que se sigan en el futuro. Si se explotan los esquistos bituminosos (Estados Unidos comenzará a hacerlo posiblemente en 1985) la duración de esas reservas aumentará considerablemente (se estima que en unos 150 años), lo mismo que si se comienza a producir combustibles líquidos a partir del carbón. De cualquier manera, es previsible que esas reservas se agoten en un plazo del orden de los 200 años.

A medida que vaya predominando el uso de combustibles nucleares, la energía tenderá cada vez más a ser usada bajo la forma de electricidad. Esto traerá sin duda cambios tecnológicos apreciables en la vida humana —el motor a explosión, por ejemplo, se convertirá seguramente en una pieza de museo en unas pocas décadas más— pero esos cambios serán en general favorables, ya que disminuirán la contaminación, ruido,

gases tóxicos incorporados a la atmósfera, etc. En cuanto a la contaminación radioactiva, también tenderá a disminuir, ya que los nuevos reactores son más "limpios" que los convencionales, y la fusión, finalmente, no produce residuos radioactivos.

En algunos usos, es *probable* que los combustibles líquidos sean necesarios todavía por un período más largo, como puede ser el caso de los aviones. Este es un uso relativamente menor cuantitativamente, y aun suponiendo que dentro de dos o tres siglos se sigan usando motores de combustibles líquidos (lo cual es bastante improbable) éste podría ser obtenido por síntesis a partir del hidrógeno del agua y del carbón del CO<sub>2</sub> del aire, o a partir de productos vegetales.

Aunque se trata de un problema lejano, se habla a veces, en el contexto del posible agotamiento de los combustibles fósiles líquidos y gaseosos, del porvenir de la industria petroquímica, y en especial de la de los plásticos, tan importantes en la vida moderna. En este sentido basta recordar que los polímeros utilizados por esta industria pueden también obtenerse a partir del carbón, o de residuos vegetales. Además, existe toda la química de los polímeros del silicio, que recién comienza a ser realmente explorada.

Por ser todavía de poca importancia cuantitativa, no hemos tomado en cuenta otras formas de producción de energía a partir de procesos naturales —mareas, solar, geotérmica, eólica, etc.— pero que pueden llegar a ser importantes, aunque posiblemente siempre complementarias, en el futuro.

Debe recordarse finalmente que la importancia de la disponibilidad indefinida de energía no radica solamente en su utilización estrictamente como tal; casi cualquier material natural que llegara a resultar escaso, puede producirse sintéticamente siempre que se disponga de energía suficiente.

#### EL CONCEPTO DE AGOTAMIENTO DE LOS RECURSOS MINERALES

Conviene finalmente hacer una reflexión sobre el conocido concepto de que siendo la tierra finita, los recursos que contiene también lo son. Esto es obviamente cierto, pero la falacia que se introduce en este razonamiento, que es esgrimido como una prueba irrefutable de la catástrofe final, es equiparar finito con *agotable*, a pesar de que se trata de dos conceptos totalmente distintos. El vasto volumen de recursos minerales de la tierra, con muy pocas excepciones, una vez usado, sigue siendo tan parte de los recursos del planeta como si no hubieran sido nunca extraídos del suelo. Pueden ser distribuidos en la superficie de la tierra o en los mares, pueden ser incorporados temporariamente a bienes de capital o de consumo, pueden ser combinados químicamente, pero son indestructibles. La tecnología que ha mostrado su capacidad de extraer recursos de los cuerpos geológicos más variados, puede también recuperar materiales que hayan sido ya usados una a cien veces por el hombre.

## EL RECICLAJE DE MATERIAS PRIMAS MINERALES Y EL MEDIO AMBIENTE.

El reciclaje o reutilización de materias primas de origen mineral es también un tema de frecuente tratamiento en los últimos tiempos, no solamente en relación con la posible escasez de ciertos materiales, sino también en función de disminuir las actividades que contribuyen a deteriorar el medio ambiente, y de un uso más racional de los recursos.

Bajo el término general de reciclaje se incluyen una serie de actividades que van desde un mejor aprovechamiento de las materias primas durante el proceso de producción -retratamiento de "colas" de plantas de concentración de minerales, aprovechamiento de materiales que escapan en polvos, humos y en residuos sólidos, etc. - hasta la recuperación de materias primas incluidas en bienes finales de consumo.

En lo que sigue nos ocuparemos solamente de las materias primas (principalmente metales) incorporados en bienes de consumo o de capital. En las etapas anteriores el reciclaje representa sólo un mejoramiento en las técnicas de producción.

Existen pocos datos cuantitativos sobre el volumen de reciclaje en el mundo. A título ilustrativo, sin embargo, se pueden ver las cifras correspondientes a los Estados Unidos. Para los principales metales de uso industrial son (en millones de toneladas):

Metal	Producc.	Disp. para reciclar	% reciclado	% reciclado
Productos ferrosos	185	150	104	70
Aluminio	5	2,2	1	48
Cobre	3,2	2,4	1,5	60
Plomo	1,5	1,4	0,6	40
Cinc	1,4	1,2	0,2	12

La cantidad relativa de material que se recicla depende de muchos factores, tales como: tiempo de observación de los bienes a los cuales están incorporados, facilidad de separarlos de los mismos, dispersión debido a diversas formas de desgaste y, sobre todo, conveniencia económica de la operación. En todo caso, si las circunstancias lo hicieran necesario o conveniente, los porcentajes consignados podrían elevarse considerablemente.

Teniendo en cuenta lo que hemos visto sobre reservas, es evidente que el reciclaje de materias primas de origen mineral no está relacionado con ningún peligro de agotamiento a escala mundial. Las únicas materias primas minerales que por su naturaleza constituyen un stock fijo y eventualmente agotable —los combustibles fósiles— no pueden ser reciclados. Las principales razones que pueden inducir a reciclar materias primas minerales, entonces, son las siguientes:

— Comerciales: las materias primas incorporadas a bienes de consumo o de producción fuera de uso, constituyen *yacimientos* que pueden ser explotados. Cuando esto puede hacerse en condiciones económicas competitivas con las fuentes primarias de producción, se origina una industria extractiva paralela a la industria minera. En este sentido el reciclaje de materias primas es simplemente una respuesta a la demanda del mercado.

— Estratégicas: algunas grandes potencias —en particular los Estados Unidos— desean contar en su propio territorio con materias primas minerales importantes desde el punto de vista estratégico militar. El reciclaje permite incrementar la vida de materias primas cuyas reservas *conocidas* en el propio territorio son relativamente escasas.

— Cuidado del medio ambiente: en algunas regiones del mundo, especialmente en las áreas pobladas en los países desarrollados, la actividad minera origina un volumen grande de materia estéril que puede provocar problemas al introducir modificaciones en el medio ambiente físico.

— Contaminación: se sostiene que una de las razones para reciclar materias primas de origen mineral es disminuir la contaminación ambiental, al reducir las actividades extractivas primarias.

Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que el reciclaje de esas materias primas también implica contaminación: contaminación térmica, atmosférica, etc. Sólo un estudio detallado de cada caso —incluyendo ubicación de las actividades de extracción primaria y reciclaje— puede establecer claramente el valor del "balance" de contaminación.

Las razones para reciclar materias primas de origen mineral, varían por lo tanto, según consideraciones de orden local o regional.

Desde el punto de vista de las motivaciones económicas, el reciclaje constituye simplemente la explotación de una fuente alternativa de materias primas. Su utilización o no depende de factores económicos y tecnológicos que se aplican por igual a los países desarrollados o del Tercer Mundo.

En cuanto al problema de la contaminación, o de la preservación del medio ambiente físico, sus caracte-

terísticas varían mucho de acuerdo con las condiciones locales.

Las actividades mineras constituyen entre el 2 y 3% del producto bruto nacional de los países adelantados, que son los que consumen más materias primas, tanto en términos absolutos como por habitante. Su contribución a la contaminación global —del aire, térmica, de los mares— es por lo tanto relativamente modesta (con excepción del petróleo en los mares).

En lo que se refiere a las modificaciones que la actividad minera provoca en el medio ambiente físico —especialmente alteraciones topográficas— se trata de un problema, que sin restarle la importancia que realmente tiene, ha sido grandemente exagerado desde la óptica de algunos países desarrollados.

El total de material removido en la actualidad por la actividad minera mundial (incluidos combustibles fósiles) es de unos 6.000.000.000 de toneladas anuales, es decir, unos 2,3 km<sup>3</sup> de material, lo que equivale a una colina de modestas dimensiones. Gran parte de la actividad minera, sobre todo en los países subdesarrollados, se realiza en regiones áridas o desérticas casi sin población. En estas áreas, las modificaciones topográficas introducidas por la minería son insignificantes en comparación con las producidas por agentes naturales, tales como torrentes, erosión de los ríos, etc.

En regiones densamente pobladas las modificaciones menores del medio físico atribuibles a la industria minera pueden ocasionar perturbaciones a la población. Estas perturbaciones, sin embargo, pueden eliminarse, o reducirse a un mínimo, tomando algunas precauciones o medidas correctivas que son bien conocidas por los técnicos. El hecho de que generalmente no se tomen, se debe al criterio imperante de propiedad privada, que se despreocupa de las consecuencias sociales de su acción. Se consideran sólo las desventajas que esas inversiones representan para la empresa, sin tomar en

cuenta los beneficios que implican para el conjunto de la sociedad.

Desde el punto de vista puramente técnico, los perjuicios ocasionados por la creación de cantidades grandes de residuos sólidos (principalmente roca estéril) también han sido grandemente exagerados. En primer lugar, sus efectos se consideran *acumulativos*: esto quiere decir que se supone que las perturbaciones causadas por la acumulación de material estéril son permanentes. La verdad es muy diferente: el material acumulado como consecuencia de la explotación de grandes yacimientos, si se lo distribuye de manera más o menos uniforme, formando superficies planas, se consolida con el tiempo, es invadido por la vegetación y se convierte simplemente en una pequeña irregularidad más del paisaje.

En segundo término se argumenta que aunque ahora, debido a que se explotan yacimientos de leyes relativamente altas, el movimiento de material no alcanza todavía volúmenes demasiado grandes, cuando se explotan rocas comunes, por ejemplo, con contenido metalífero muy bajo, las cantidades de material movilizadas serán mucho mayores. Esto, unido al aumento de la demanda, obligará a mover cantidades colosales de roca estéril con consecuencias muy graves para el medio ambiente físico de la humanidad.

En realidad, este tipo de argumento tiene poca justificación. Los materiales de muy baja ley, en especial las rocas comunes, se encuentran dispersas sobre áreas muy grandes del planeta, lo que permite una amplia gama de posibilidades para ubicar las explotaciones. Existen millones de kilómetros cuadrados de tierra, desérticos o semidesérticos, con muy poca población, donde se pueden mover volúmenes enormes de roca sin ningún efecto sobre el *habitar* humano. El problema principal es una planificación de la explotación de recursos minerales que tenga en cuenta los intereses de la humanidad, y no los puramente nacionales.

Otro elemento a tener en cuenta, es que es muy probable que por lo menos parte de esas explotaciones se realicen rompiendo la roca "in situ" —por lo tanto no trasladando material y no alterando prácticamente la topografía— y la extracción de elementos útiles se realiza por medios químicos o biológicos —lixiviación, y disolución por bacterias—. Estas técnicas, que ya se encuentran en estudio para algunos tipos de yacimientos, disminuirían también la contaminación, debido a su bajo uso de energía y al hecho de que reducirían al mínimo los procesos pirometalúrgicos.

## BIBLIOGRAFIA

- A. ANGELINI, 1973, "L'avenir est à la energie nucléaire", 2000 *Revue de l'aménagement du territoire*, Paris.
- A. BAKIROV, G. OVANESSOV, "Scientific principles of calculation of potential oil and gas resources in connection with their evaluation in estimating different prospective oil and gas provinces", *Proceedings of the 8th World Petroleum Congress*.
- H. J. BARNETT and C. MORSE (1963), "Scarcity and Growth", *Resources for the Future Inc.*, The Johns Hopkins Press, Baltimore.
- D. A. BROBST and W. P. PRATT, 1973, "Summary of United States Mineral Resources", *Geological Survey Circular 628*, Washington D.C., USA.
- D. B. BROOKS, "World population and mineral resources", *Symposium on Population, Resources and Environment, Ecosoc, United Nations*, Stockholm, 1973.
- S. BRUBAKER, 1966, "Trends in the world aluminum industry", *Resources for the Future, Inc.*, The Johns Hopkins Press, Baltimore.
- E. T. CHRISTY, 1970, "Margenous minerals", *Resources for the Future Inc.*, Washington, D.C.
- L. L. FISCHMAN and H. H. LANDSBERG, 1971, "Adequacy of nonfuel minerals and forest resources", *Population, resources, and the environment, The Commission on Population Growth and the American Future* Ed. by R.G. Ridker, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- P. T. FLAWN, 1966, *Mineral resources*, John Wiley and Sons, Inc.
- D. GABOR, 1973, *Innovaciones científicas, tecnológicas*.



- gicas sociales*, Santiago, Ed. Universitaria, (file).
- C. GUILLEMIN, 1972, "L'avenir de geosciences et le probleme de la croissance", *Geologies* N° 24.
- A. O. HERRERA, 1965. *Los recursos minerales de América Latina*, Buenos Aires, EUDEBA, 1965.
- H. LANDSBERG y otros, *Resources in America's Future, Resources for the Future Inc.*, The Johns Hopkins Press, Baltimore.
- S. G. LASKY, "How tonnage and grade relations help predict ore reserves", *Engineering and Mining Journal*, april, 1950, pp. 81-85.
- A. I. LEVORSEN, "Estimated undiscovered petroleum reserves", *Proceedings of the United Nations Scientific Conference on the Conservation and Utilization of Resources*, Vol. I.
- V. E. MCKELVEY, "Mineral resources estimated and public policy", *Seventh McKinstry Memorial Lecture, Harvard University*, feb. 23, 1971.
- D. MEADOWS y otros, 1971. *The limits to growth*, Universe Books, New York.
- J. L. MERO, "Minerals in the ocean floor", *Scientific American*, december 1960, p. 64.
- J. E. POQUE, "Oil in the world", *Yale Review*, No 35.
- N. POTTER and F. T. CHRISTY, 1968, "Trends in natural resources commodities", *Resources for the Future, Inc.*, The Johns Hopkins Press, Baltimore, USA.
- S. H. SCHURR y otros, 1960, "Energy in the American Economy, 1850-1875", *Resources for the Future, Inc.*, Johns Hopkins Press, Baltimore.
- P. E. SORENSEN and E. J. MEAD, 1968, "A cost-benefit analysis of ocean mineral resources development. The case of manganese nodules", en *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 50, No 9.
- L. G. WEEKS, 1958, "Fuel reserves in the future", *Bulletin American Association of Petroleum Geologists*, Vol. 32, No 6.

