

### Modelo básico de Gestión Económica de recursos no renovables.

*Clasificación de los recursos minerales. Usos y flujos y el problema de la eficiencia intertemporal. La regla de Hotelling. Escasez física y escasez económica. El valor de usuario. El progreso técnico. Ampliaciones del modelo básico de gestión de recursos no renovables. Monopolio, oligopolio y explotación de recursos no renovables. Reformulación de la regla de Hotelling con incertidumbre.*

*“It is to steel, oil and uranium, not to martial ardor, that modern nations must look for victory in war”.*

Bertrand Russell

*“La pugna por las riquezas minerales arrebatadas a la faz de la tierra para vanidad, satisfacción o confort de los hombres, ha sido siempre un poderoso incentivo para los descubrimientos, la exploración y el comercio. En el antiguo país de Saomes, los torrentes invernales traían grava mezclada con oro, que los bárbaros hacían pasar a través de pendientes alineadas con vellones de cordero, que luego secaban al sol para obtener el oro. Las pieles doradas animaron a Jason y los argonautas a bordo de la nave Argos a emprender la búsqueda del vellocino de oro cerca de las costas de Euxina. Esta es la primera mención de la fiebre del oro y la expresión poética de una temprana aventura minera. También fue el estaño lo que llevó a Fenicios y Romanos hasta la Gran Bretaña y el oro y la plata los que atrajeron a los conquistadores españoles al nuevo mundo. La fiebre del oro de 1849 llevó a la fundación de California y a Estados Unidos a arrebatarse el oeste americano a España y México”.*

Mead L. y Alan Bateman

## 6.1 Introducción

Como vimos en el primer capítulo, los recursos no renovables son aquellos para los que no existe un proceso natural y espontáneo de regeneración. La corteza terrestre alberga una cantidad fija de recursos no renovables y cualquier extracción sólo puede disminuir la disponibilidad de los mismos para el futuro. De ahí que estos recursos planteen importantes cuestiones sobre los límites del crecimiento económico. Estas cuestiones van desde la pregunta básica sobre si estamos agotando algunos recursos que, como el hierro y el petróleo, son fundamentales para el funcionamiento actual del sistema económico, hasta la cuestión más amplia de si es posible el crecimiento sostenido en el largo plazo. La respuesta a estas preguntas, como veremos, también exige que reflexionemos sobre el modo en que reacciona la sociedad frente a la escasez de los recursos.

Veamos a grandes rasgos los principales elementos que tomamos de la tierra y al modo en que los utilizamos. Muchos de estos recursos son metales. A menudo, estos se encuentran en estado puro, pero su forma habitual es la de compuestos químicos en los que aparecen combinados con azufre (sulfatos) u oxígeno (óxidos). Tales compuestos, junto con los metales en estado puro, son lo que denominamos minerales. Las rocas, también son mezclas con una composición diversa de minerales.

Algunos metales son relativamente abundantes en términos físicos. En orden decreciente, el aluminio, el hierro, el titanio, el manganeso y el titanio, forman el 16 por ciento de la corteza terrestre. De todos ellos, el hierro es el más utilizado, alcanzando el 95 por ciento de los

metales aprovechados por nuestra civilización, y es el principal elemento constitutivo del acero. En la actualidad, el hierro se utiliza principalmente en aleaciones, con níquel, cromo, tungsteno, cobalto o manganeso, de modo que la industria siderúrgica depende también del abastecimiento de tales metales.

Otros metales son menos abundantes en la corteza terrestre. Entre estos se encuentra el cobre, excelente conductor de la electricidad, fundamental para transportar la energía y la comunicación de señales en la red de cables que forman el nervio de la tecnología de las naciones avanzadas. A la misma categoría pertenece el plomo, utilizado principalmente en baterías de almacenamiento, en la fabricación de proyectiles y soldadores, en compuestos antiexplosivos en las gasolinas y, por sus propiedades anticorrosivas, como protector de los cables eléctricos. Otros ejemplos de metales esenciales para la producción de aleaciones y poco abundantes son el zinc, particularmente resistente a la corrosión, el níquel, fuerte y resistente, el molibdeno y el tungsteno, especialmente dúctiles, y el estaño, cuyos usos se remontan hasta 3700 años antes de nuestra era, etc.

Además de los anteriores, existe varios miles de minerales y rocas industriales dentro de los que se incluyen el amianto, las arcillas, el grafito y el talco. Su valor económico total supera con creces al de los metales, y son materiales esenciales para la producción de concreto, y del ácido sulfúrico, el más importante de los químicos industriales, que combinados con amoníaco y fosfatos, sirve para formar una gama diversa gama de fertilizantes fosfatados. Otros materiales contienen las llamadas tierras raras, con elementos como el europio, el gadolinio, el cerio y el zirconio, necesarios para la producción de catalizadores, superaleaciones, tubos de fósforo para la televisión, intensificadores de pantallas de rayos x e imanes especiales.

Mención especial debe hacerse a los combustibles fósiles, formados en el curso de millones de años a partir de los restos de plantas y animales microscópicos, acumulados lentamente en el fondo marino y atrapados en las capas sedimentarias de la corteza terrestre. En la actualidad, el combustible fósil más importante es el petróleo, el segundo líquido más abundante en la tierra, seguido del gas natural. Conjuntamente, el petróleo y el gas natural aportan dos tercios de la energía mundial y ambos son también la materia prima esencial para la producción de 30.000 diferentes compuestos químicos.

Los recursos no renovables son sin duda esenciales para el funcionamiento del sistema productivo. Por tal razón, el debate sobre su agotamiento y las posibles consecuencias de la menor abundancia futura de los mismos tiene especial trascendencia para las posibilidades futuras de la humanidad. Por ese motivo, en el apartado siguiente trataremos de desarrollar algunos elementos económicos para responder a la pregunta de ¿qué tan dramático es el problema del agotamiento de los recursos no renovables?. Todo esto nos lleva nuevamente al problema de la escasez al que hicimos referencia en el capítulo segundo y que retomamos en esta introducción para centrar la discusión sobre los criterios que deben guiar la gestión de los recursos no renovables.

Tabla 6.1. Índices Estáticos y Dinámicos de Escasez

Recurso	Reservas Globales Conocidas <sup>a</sup>	Índice Estático (años) <sup>b</sup>	Tasa de Crecimiento Promedio (% por año) <sup>a</sup>	Índice Exponencial (años) <sup>c</sup>
Aluminio	1.17 x 10 <sup>9</sup> toneladas	100	6.4	31
Carbón	5 x 10 <sup>12</sup> ton.	2300	4.1	111
Cobalto	4.8 x 10 <sup>9</sup> ton.	110	1.5	60
Cobre	308 x 10 <sup>6</sup> ton.	36	4.6	21
Cromo	7.75 x 10 <sup>8</sup> ton.	420	2.6	95
Estaño	4.3 x 10 <sup>6</sup> lg ton.	17	1.1	15
Gás Natural	1.14 x 10 <sup>15</sup> pies cúbicos	38	4.7	22
Hierro	1 x 10 <sup>11</sup> ton.	240	1.8	93
Manganeso	8 x 10 <sup>8</sup> ton.	97	2.9	46
Mercurio	3.34 x 10 <sup>6</sup> flasks	13	2.6	13
Molibdeno	10.8 x 10 <sup>9</sup> libras	79	4.5	34
Niquel	147 x 10 <sup>9</sup> libras	150	3.4	53
Oro	353 x 10 <sup>6</sup> onzas troy	11	4.1	9
Petróleo	455 x 10 <sup>9</sup> barriles	31	3.9	20
Platino	1.17 x 10 <sup>9</sup> onzas troy	130	3.8	47
Plata	5.5 x 10 <sup>9</sup> onzas troy	16	2.7	13
Plomo	91 x 10 <sup>6</sup> ton.	26	2.0	21
Tungsteno	2.9x 10 <sup>9</sup> ton.	40	2.5	28

(a) U.S. Bureau of Mines (1970) *Mineral Facts and Problems*, Government Printing Office.

(b) Años que tardarían en consumirse las reservas globales conocidas a los niveles actuales de consumo.

(c) Años que tardaría en consumirse las reservas globales conocidas si el consumo continúa creciendo a la tasa promedio.

**Fuente:** Meadows, D. et. al. (1972) *The Limits of Growth: A Report for the Rome's Club on the Predicament of Mankind*. University Books.

Una primera postura, que podemos calificar de pesimista, pone el énfasis en la inminencia del agotamiento físico de las reservas conocidas de recursos. Para ello, la escasez se mide por el tiempo que resta para la extinción de un recurso concreto. Esta es, por otra parte, una medida relativamente fácil de construir si conocemos las reservas del material y la cantidad que se extrae del mismo en un determinado momento. Para ilustrar este razonamiento retomemos brevemente el informe del Club de Roma sobre los límites del crecimiento en el que se plantea de un modo dramático el problema del agotamiento de los recursos no renovables. Los datos básicos en los que se apoya esta visión pesimista del futuro son los que se encuentran en la Tabla 6.1. Así, por ejemplo, según las estadísticas de la oficina de minas de los Estados Unidos, en 1970 las reservas conocidas de cobre rondaban los 310 millones de toneladas, dado que el consumo mundial de cobre alcanzaba ese mismo año la cifra de 8.5 millones de toneladas, podemos concluir que, de mantenerse estable la demanda de cobre, las reservas disponibles en 1970 se agotarían completamente al cabo de 36 años. A pesar de que esta conclusión es de por sí preocupante, algunos autores la consideran demasiado optimista. En efecto, según el Club de Roma, no es probable que la demanda de cobre permanezca estable; todo lo contrario, resulta más razonable pensar que en el futuro dicha demanda continuará creciendo al ritmo observado en los últimos 70 años (es decir a un 4,6 por ciento anual), lo que reduce la vida esperada del cobre de 36 a 21 años (ver Tabla 6.1). De los 19 recursos no renovables incluidos en la Tabla 6.1, con el índice exponencial de escasez, solo podría esperarse que el carbón exista durante más de 100 años de acuerdo. Entre los casos más

dramáticos, se encuentra una larga lista de recursos que, de acuerdo con este tipo de previsiones, estarían agotados antes del año 2000, y que, aparte del cobre, el oro, el plomo, el mercurio, el gas natural, el petróleo, la plata, el estaño y el zinc.

Afortunadamente, ninguna de las previsiones pesimista de los años 70 se han cumplido. No obstante, nuestro interés en esta parte del capítulo, no consiste simplemente en demostrar que el informe del Club de Roma incurre en serios errores de cálculo que pueden ser corregidos a la luz de las nuevas informaciones. Más allá, lo que queremos demostrar es que el razonamiento implícito en las medidas de escasez mencionadas es erróneo. Básicamente, el error en está en concebir la escasez como un fenómeno físico, cuando se trata, como veremos de un fenómeno económico y social. Esta discusión nos servirá para avanzar, en la segunda parte del capítulo, en la discusión de los criterios que deben guiar la gestión de los recursos no renovables.

## 6.2. ¿ Qué es la escasez?

El análisis anterior pone de relieve la posibilidad del agotamiento de los recursos no renovables. Gran parte de las confusiones y los errores de previsión, se pueden evitar si distinguimos cuidadosamente entre dos conceptos interrelacionados: los recursos disponibles y las reservas conocidas. Las reservas se definen como depósitos con cantidades y calidades conocidas, de los que, dada la tecnología disponible y las condiciones políticas y económicas, es rentable extraer minerales. Por su parte, los recursos, son fuentes potenciales de minerales que pueden utilizarse en el futuro si los cambios en la tecnología, y las condiciones económicas, políticas y legales lo permiten. Como la economía, la tecnología y la política son partes esenciales en esta definición, las reservas minerales pueden aumentar o disminuir significativamente sin que cambie la cantidad disponible en la corteza terrestre<sup>1</sup>.

Evidentemente en cuanto mayor sea la extracción de un mineral menor será su disponibilidad futura. Sin embargo, la importancia que esto tiene para nosotros y para las generaciones futuras, no depende solamente de la cantidad de recursos inexplotados, sino también, al menos, de tres factores adicionales cuya naturaleza es eminentemente social e histórica. Estos factores son: en primer lugar, nuestro grado de conocimiento sobre la cantidad y calidad física de los recursos y las reservas disponibles. En segundo lugar, la capacidad tecnológica de que disponemos para utilizar productivamente tales reservas. Finalmente, en tercer lugar, el valor que tales reservas tienen para el sistema económico. Veamos los tres elementos por separado para ilustrar su importancia.

### a. La información disponible

En primer lugar, aunque cada vez conocemos mejor la geología del planeta, nuestra información sobre las reservas disponibles es incompleta. Aun hoy, existe un importante grado

---

<sup>1</sup> Por ejemplo, debido a restricciones legales, mientras esté vigente el tratado que reserva el territorio de la Antártida para fines de investigación, los recursos allí existentes de minerales no podrán ser contabilizados como reservas.

de incertidumbre sobre la cantidad y calidad de recursos remanentes en el planeta. Por ejemplo, no conocemos con certeza la cantidad de petróleo que existe bajo el fondo marino. En otros casos sabemos de la existencia de algunos depósitos de material, por ejemplo en la Antártida, pero, mientras no se proceda a una exploración exhaustiva, desconoceremos la cantidad y calidad de los mismos. En otras zonas, dadas las características geológicas del entorno, podemos deducir la probabilidad de que existan reservas importantes, y tenemos la posibilidad de reducir tal incertidumbre mediante, por ejemplo, del estudio de campos magnéticos o de la perforación de pozos exploratorios.

Por lo anterior, aparte de una medida exclusivamente física, las reservas deben medirse en

#### **Recuadro 6.1: Los Recursos y las Reservas: El Caso del Mineral de Hierro**

El uso del mineral de hierro puede servir como una ilustración del modo en que intervienen los elementos técnicos y económicos en la definición de lo que entendemos por reservas en un sentido económico. Para obtener el hierro, son indispensables tres elementos, mineral de hierro, como materia prima, carbón, como fuente de energía, y arena, para remover impurezas. El mineral de hierro contiene óxidos muy estables; sólo la aplicación de altas temperaturas en una atmósfera escasa de oxígeno puede separar el hierro. Los tres elementos se introducen en un alto horno, en el que se fuerza la entrada de aire para elevar la temperatura hasta el punto en que el mineral se reduce junto con el carbón y se puede obtener el hierro del fondo del horno. El oxígeno del aire se consume en el proceso de combustión, produciendo la atmósfera adecuada.

Los primeros centros siderúrgicos de Pittsburg, en Estados Unidos, Manchester, en Inglaterra, y los de Alemania y Suecia, surgieron en lugares donde los tres ingredientes se encontraban juntos o en sus proximidades. Las disponibilidades locales fueron consumidas rápidamente y el mineral hubo de ser importado de otras regiones, como las planicies de Mesabi en Minesota, de donde se obtuvo el 60 por ciento del mineral de hierro utilizado por los aliados en la segunda guerra mundial. Estos depósitos contenían una mayor concentración de hierro, hasta del 50%, de modo que pudieron ser utilizados rentablemente, a pesar de los costes de transporte de la época. Sin embargo, ya en 1908, el siderúrgico Andrew Carnegie, alertó que tales depósitos de alta calidad estaban al borde del agotamiento. La inminencia de la escasez de hierro de los primeros años de la posguerra se superó con el descubrimiento de depósitos de taconita, un mineral de hierro que, a pesar de su bajo contenido de hierro, puede ser objeto de un tratamiento especial que aumenta su concentración desde niveles inferiores al 20 por ciento hasta más del 60 por ciento. Estos materiales mejorados aumentaron de tal modo la eficiencia de la industria siderúrgica que compensaron sobradamente los aumentos de costes debidos a la escasez del material original. Debido al desarrollo de estas técnicas de concentración, las reservas de mineral de hierro crecieron notablemente, y fueron un elemento esencial en el mantenimiento durante décadas de los bajos precios del hierro.

*Fuente:* Schmidt, V. y Harbert, W. (1998) *Planet Earth and the New Geosciences*. University of Pittsburgh

función de nuestro grado de conocimiento sobre la cantidad y calidad de las mismas. En realidad, al nivel más general, nuestras certezas se reducen a una estimación global de la

cantidad total de cada mineral existente en la corteza terrestre. Así, por ejemplo, por la composición de la corteza terrestre, podemos deducir que en la tierra restan aun 11.000 billones de toneladas de cobre sin explotar ( $11 \times 10^{17}$  toneladas), que, si fuésemos capaces de explotarlas, permitirían satisfacer cualquier demanda previsible durante varios millones de años. La anterior es una medida del recurso, o de las reservas potenciales. Sin embargo, la abundancia física tiene poco que ver con la abundancia económica. Por el contrario, los depósitos de cobre de alta concentración son terriblemente escasos y, según datos de 1992, las reservas de cobre alcanzaban los 550 millones de toneladas<sup>2</sup>, indicando que con los precios actuales y con nuestros conocimientos tecnológicos, sólo podemos obtener una de cada 22 millones de las partículas de cobre existentes en el planeta.

La figura 6.1, ilustra nuestro conocimiento sobre las reservas disponibles. El eje superior presenta algunos conceptos útiles para definir nuestro grado de conocimiento sobre los recursos de un mineral hipotético. Es importante entonces establecer una distinción clara entre las reservas probadas de un mineral<sup>3</sup>, las reservas probables o inferidas, y aquellas aun no descubiertas<sup>4</sup>. Lo importante, es que, aunque los recursos disponibles son fijos, la frontera entre las reservas probadas, las probables y las inferidas cambia con el paso del tiempo, desplazándose hacia la derecha en el diagrama, con cada descubrimiento nuevo en la exploración.

#### b. La tecnología

Aparte de la información disponible, en la definición de las reservas también es importante tener en cuenta la capacidad tecnológica de que disponemos para producir bienestar a partir de los recursos no renovables. Tal capacidad depende esencialmente de la tecnología disponible para explotar, utilizar y reciclar los materiales que obtenemos de la corteza terrestre. Las innovaciones, impulsadas por la escasez y por los aumentos de precios que esta conlleva, permiten aumentar gradualmente las reservas disponibles.

---

<sup>2</sup> Obsérvese que, en contra de las previsiones pesimistas de la tabla 6.1, en 1992 las reservas conocidas de cobre eran un 80 por ciento superiores a las de 1970.

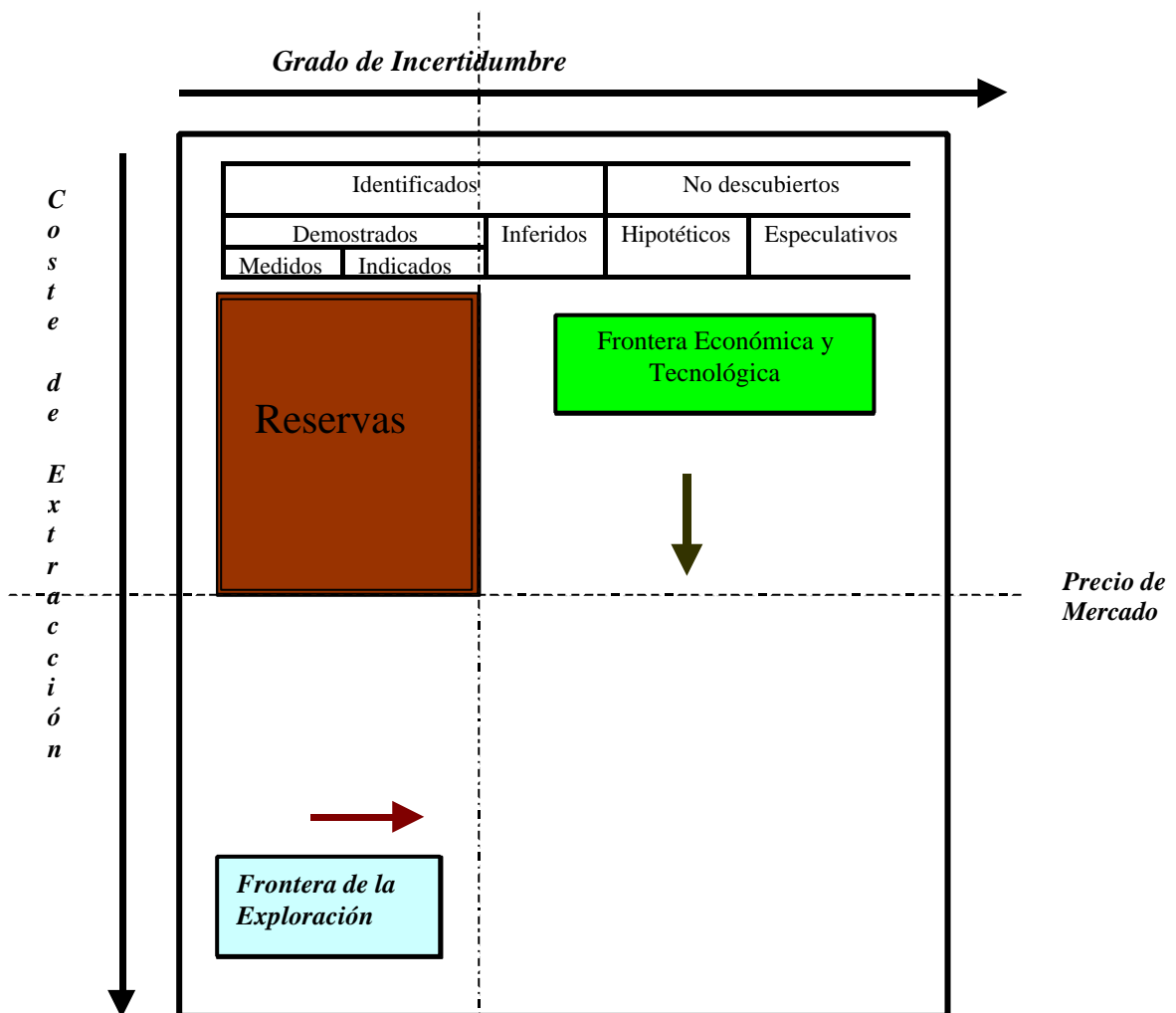
<sup>3</sup> Es decir, de acuerdo con la definición de la Oficina de minas de los Estados Unidos: los depósitos específicos de mineral, cuya localización, cantidad y calidad son conocidas a través de evidencia geológica apoyada por medidas de ingeniería.

<sup>4</sup> Siguiendo la clasificación mencionada en la nota anterior, dentro de las reservas no descubiertas podemos distinguir entre las hipotéticas y las especulativas. Las primeras son las reservas que se pueden esperar que existan en una zona cuyas condiciones geológicas son conocidas. Las segundas, se refieren a reservas no descubiertas en zonas con condiciones geológicas favorables, donde no se ha efectuado ningún descubrimiento o en tipos de depósitos que están pendientes de reconocimiento.

El progreso técnico puede asumir múltiples formas dependiendo esencialmente del punto en el ciclo vital de los minerales en los que se produzcan innovaciones tecnológicas. Así, la tecnología puede mejorar en la fase de exploración, extracción, transporte, producción, consumo, o reciclado de materiales. Veamos algunos ejemplos de cada caso.

En primer lugar, nuestro conocimiento sobre cómo se forman los depósitos de minerales ha afectado fuertemente el modo en que buscamos los mismos. Si nos remontamos al antiguo explorador con su mula y su batea, podremos ganar alguna perspectiva sobre lo lejos que hemos llegado. En gran parte, estos buscadores de fortuna, con su limitado conocimiento de la

**Figura 6.1: La Caja De McKelvey: Clasificación de Los Recursos No Renovables.**



geología o la mineralogía, buscaban un ambiente favorable a la mineralización, persiguiendo un determinado tipo de piedra o un color. La exploración moderna hace lo mismo, pero de un modo más sofisticado. Los avances recientes en el conocimiento científico sobre cómo y donde se forman los depósitos de minerales, han dado a los geólogos las herramientas

intelectuales que no tuvieron sus predecesores. Los avances teóricos y técnicos en la geoquímica y la geofísica han permitido acotar y centrar las tareas de búsqueda. Con lo importantes que son para el bienestar y la mejora de las sociedades modernas, los depósitos de minerales ocupan menos del uno por ciento de la superficie de la tierra. Cómo estos se encuentran sólo donde los caprichos de los procesos geológicos los han depositado, se deben sopesar los beneficios de la nueva información obtenida con la exploración, con los costes de los recursos y de los usos alternativos de las tierras asignadas a la explotación minera.

En segundo lugar, la escasez, y el aumento de los precios que esta conlleva, produce los incentivos necesarios para investigar y desarrollar las tecnologías de extracción de minerales. A modo de ejemplo, se puede mencionar que la concentración mínima requerida para la explotación rentable de un depósito de mineral de cobre cayó desde un 3 por ciento en 1880 hasta el 0.5 por ciento en 1960 y al 0.1 en 1985. Del mismo modo, hace sólo veinte años el factor de recuperación de los yacimientos de petróleo, es decir, la cantidad que puede extraerse rentablemente de un pozo, era de un 30 por ciento; hoy en día el promedio ronda el 45 por ciento y es probable que continúe aumentando en los próximos años. Todo esto ha traído como consecuencia un aumento efectivo de las reservas de cobre y de petróleo.

En tercer lugar, la escasez también está relacionada con las tecnologías de procesamiento de los materiales obtenidos de la naturaleza. La mayor parte de los minerales y recursos energéticos son sólo materias primas para la elaboración de materiales más complejos que sirven para el consumo o para la producción de otros bienes. Así, el hierro se utiliza en la producción de acero, y el petróleo crudo para la obtención de gasolina. En este proceso de tratamiento secundario existen también importantes posibilidades para el progreso técnico y, en consecuencia, para la conservación de los recursos remanentes.

A modo de ejemplo, podemos echar mano nuevamente de la industria petrolera. El petróleo crudo, que se obtiene directamente del subsuelo, es una mezcla heterogénea de distintos hidrocarburos (es decir, de cadenas de distinta longitud de átomos de carbono a hidrógeno). Las cadenas cortas, de hasta cuatro átomos de carbono, son gases, las de longitud intermedia son líquidos, más viscosos en cuanto mayor sea su longitud, desde las más cortas, como la gasolina, hasta las más largas, como las ceras. El refinado de petróleo consiste básicamente en la separación minuciosa de los hidrocarburos de la misma longitud formando gases o líquidos homogéneos. Así se obtiene la gasolina, el kerosene, el gas-oil, los lubricantes, etc. La mezcla, y lo que se puede obtener de ella, está determinada básicamente por la calidad del crudo encontrada en el yacimiento, lo que plantea un problema económico importante. La gasolina, por ejemplo, es el producto que tiene mayor valor en el mercado; ¿pero qué hacer con los demás subproductos? El deseo de aumentar la proporción obtenida de los componentes más valiosos del petróleo, ha servido para producir importantes avances tecnológicos en la historia reciente del sector. Así, para evitar los excedentes indeseados, las cadenas largas se rompen para formar cadenas más cortas que permiten, al mismo tiempo, obtener mayor gasolina y reducir los excedentes de subproductos mediante las técnicas conocidas como de craquéo catalítico. Además de ello, no sólo es posible aumentar la cantidad de gasolina que se obtiene de un barril de petróleo sino también conseguir un aumento de su potencia; esto se consigue mediante las llamadas técnicas de reforma de las moléculas de hidrocarburos, las cuales, mediante un procesamiento químico a partir de calor y agentes catalizadores, consiguen

reformar el hidrocarbón C<sub>8</sub>, llamado octano, en isoctano que quema de un modo más eficiente y reduce el consumo de gasolina en los automóviles. Ninguna de estas técnicas hace más abundante el petróleo en la naturaleza, pero sí lo hacen menos escaso para la sociedad; en otras palabras, aumentan el nivel de bienestar que podemos obtener de la misma cantidad de petróleo crudo.

Finalmente, en la definición de lo que consideramos escaso o abundante, no debe perderse de vista que, al menos en las sociedades modernas de mercado, la producción y comercialización de las materias primas depende en última instancia de la oferta y la demanda de los bienes para cuya elaboración estos sirven. Así, por ejemplo, el petróleo sólo se convirtió en una bien con valor económico en el siglo XIX; precisamente en un momento en que la industria ballenera empezaba a ser incapaz de proveer aceite suficiente para iluminar las lámparas del mundo. En agosto de 1859 Edwin Drake en Pensilvania inauguró una nueva era al cavar el primer pozo de petróleo y pocos años después la invención del motor de combustión interna convirtió la gasolina en un elemento vital para el transporte cuya demanda desde entonces no ha dejado de aumentar. Hoy en día se consumen diariamente en el mundo 70 millones de barriles. Sin embargo, al mismo tiempo que crece la demanda, también lo hace la tecnología de su utilización con motores más eficientes y materiales más livianos utilizados en su construcción. Por todo ello, a excepción de los años 70, las reservas económicamente explotables de petróleo no han dejado de aumentar guiadas por la exploración, el descubrimiento de nuevas tecnologías y la sustitución de materiales.

### c. Los costes de explotación y los precios de mercado.

En suma, tanto la información disponible como las posibilidades tecnológicas de explotar y utilizar las reservas, se deberán reflejar en los costes de producción y en los precios de los distintos recursos.

A medida que las empresas se ven forzadas a explotar materiales de menor concentración, más alejados de la superficie o en entornos más inhóspito, los efectos del agotamiento de los recursos, se dejarán notar en un aumento de los costes de extracción y de los precios de los mismos. Sin embargo, como hemos visto, estos efectos pueden verse compensados por otros factores positivos. Las compañías extractoras añadirán esfuerzos de exploración y descubrimiento y los avances tecnológicos permitirán que tales materiales sean utilizables (mediante técnicas más sofisticadas de minería o nuevos métodos de procesamiento que aumenten la calidad económica de los materiales). Adicionalmente, el mercado reaccionará al aumento de los precios mediante la búsqueda y el desarrollo de bienes sustitutivos (nuevos materiales, o nuevos usos para los materiales disponibles), un uso más eficiente de los recursos o actividades de reciclado.

En general, en cuanto más elevado sea el precio de mercado mayor será el volumen de las reservas. Por ejemplo, la mayoría de los yacimientos de petróleo actualmente en explotación se encuentran entre 900 y 5000 metros de profundidad; sin embargo, hoy en día es posible bombear petróleo desde 8 kilómetros bajo el suelo o la superficie marina, siempre que la mejor calidad del crudo compense los costes más elevados de bombeo. Así, por ejemplo, según datos de 1980, la cantidad de petróleo recuperable a un precio de mercado de 11,62

dólares era de 21.200 millones de barriles; si el precio aumentase hasta los 13,75 dólares, tales reservas se verían incrementadas hasta los 29.400 millones de barriles y, en el caso de que el precio del petróleo aumentara establemente hasta superar los 30 dólares tales reservas explotables crecerían hasta los 52.000 millones de barriles (Tietenberg, 1992).

Todas estas ideas pueden resumirse en la Figura 6.1. en la que se presentan los elementos básicos de la teoría económica de la escasez que hemos desarrollado en este apartado. El diagrama es una adaptación de la llamada Caja de McKelvey, utilizada para clarificar la distinción que entre reservas y recursos. Si los recursos son una medida física de las potenciales reservas remanentes, las reservas son una medida social que depende de nuestro grado de conocimiento (representado por la flecha superior) y de la viabilidad económica de explotación de los distintos yacimientos (representados por la flecha vertical). El propósito básico del sistema de McKelvey es ordenar todos los elementos necesarios para la planificación a largo plazo de la utilización de los recursos no renovables, teniendo en cuenta la evolución de los precios, las probabilidades de nuevos descubrimientos, etc. Así, tanto las reservas como los recursos son restimados continuamente a la luz de nuevas evidencias geológicas, del progreso tecnológico, de la extracción de reservas y de las circunstancias económicas y políticas. Todas las divisiones interiores de la caja de McKelvey, son móviles y su dinámica debe explicarse a la luz de las cambiantes condiciones económicas y políticas.

#### d. Una visión de conjunto

En este apartado hemos avanzado desde un punto de vista pesimista, que ilustramos con algunas de las conclusiones del Club de Roma, hasta otro que puede servir para albergar un cierto optimismo<sup>5</sup>. Sin embargo, hay que mencionar algunos motivos de cautela que deben prevenirnos contra el peligro de llevar demasiado lejos el optimismo de nuestro esquema de análisis. La caja de McKelvey ordena la información disponible, permite analizar con una cierta lógica lo que ha ocurrido en el pasado y da algunas pistas sobre lo que ocurrirá en el futuro. No obstante, este esquema tiene unas pretensiones limitadas de previsión del futuro. El relativo éxito pasado no es una garantía para el futuro. No podemos asumir que en el futuro el progreso técnico se producirá al mismo ritmo que en el pasado, o que todos los problemas de escasez y las respuestas de la sociedad se articularán en los años venideros tan armónicamente que no existirán desabastecimientos de materiales y energía o severos problemas ambientales.

Veamos algunos motivos de incertidumbre. Por ejemplo, algunos autores (Harris y Skinner, 1982; Anderson, 1985) han propuesto el concepto de umbral mineralógico para indicar un punto, a partir del cual un mineral existe en concentraciones tan pequeñas que hacen imposible su extracción. La mayor parte de los minerales existe en forma de silicatos en la piedra común, y sólo alrededor de un 3 por ciento de la mayoría de ellos existe en

---

<sup>5</sup> En el capítulo estamos más interesados en entender que es la escasez que en encontrar una forma de medirla con precisión. En efecto, en la práctica, la medida y la predicción de la escasez es una materia compleja. Esta tarea requiere la combinación de las ciencias físicas con el conocimiento de cómo se adapta la sociedad a lo largo del tiempo. Relacionar el stock de los recursos no renovables con el uso de los mismos (teniendo en cuenta el crecimiento demográfico, el progreso técnico, las expectativas económicas y sociales, etc.) es y será una tarea llena de incertidumbres. Para una discusión sobre las distintas alternativas que ofrece la teoría económica para medir la escasez, véase, por ejemplo, Hanley, et.al. 1996.

concentraciones importantes en forma de óxidos, sulfidas o carbonatos. Para algunos minerales, existen muy pocos depósitos con concentraciones importantes. Por ejemplo, la concentración media de plomo en la corteza terrestre es de 0.001 por ciento, pero las técnicas de minería disponibles sólo permiten obtener plomo de minerales con una concentración entre el 2 y el 20 por ciento; estos depósitos son escasos y, una vez que se hayan agotado, será necesaria una modificación radical en las tecnologías de extracción obligando a la extracción de plomo de la piedra común (lo que permitirá obtener muchos otros minerales como subproductos). Este tipo de minerales, abundantes pero altamente dispersos, se denomina geoquímicamente escasos y a esa categoría pertenecen, aparte del plomo, el cobre, el oro y el mercurio. A diferencia de otros minerales geoquímicamente abundantes, en este caso, el progreso gradual de la tecnología no garantiza un aumento de las reservas aprovechables. Al final del capítulo volveremos sobre este punto.

### **6.3. Un modelo de análisis:**

La cuestión importante en la economía de los recursos no renovables es ¿a qué ritmo deben explotarse? Es decir: ¿qué cantidad debe extraerse cada año para los usos corrientes? O, lo que es lo mismo, ¿qué cantidad debe permanecer en el subsuelo como reserva para usos futuros?. Esta pregunta lleva a otra, equivalente: ¿cuál es el precio al que deben venderse las unidades de cada recurso y cómo debe variar este precio a lo largo del tiempo? Estas cuestiones son claramente normativas; lo que nos interesa es saber el cómo deben usarse los recursos y, una vez que tengamos una respuesta clara a esta pregunta, podremos juzgar el comportamiento de la economía de mercado y valorar los problemas que ocasionan las distintas estructuras de derechos de propiedad.

A continuación exploraremos, en primer lugar, el modelo básico de gestión de los recursos naturales utilizando los conceptos de eficiencia estática y dinámica que vimos en el capítulo 3.

#### **6.3.1 Algunos principios básicos:**

A diferencia de otros sectores productivos, en la extracción de minerales, la producción en un momento dado no es independiente de la producción en el pasado ni de la que se hará en el futuro. Por muchas razones, en las decisiones de extraer minerales o recursos energéticos no renovables, es necesario tener en cuenta la estrecha interrelación entre las decisiones pasadas, las decisiones presentes y las posibilidades que dejamos abiertas para el futuro.

El coste de extraer una unidad en la actualidad depende no sólo del uso de factores productivos, como el trabajo y la energía, y de sus precios, sino también de las extracciones realizadas en el pasado y del impacto de estas en la rentabilidad actual de los depósitos de minerales.

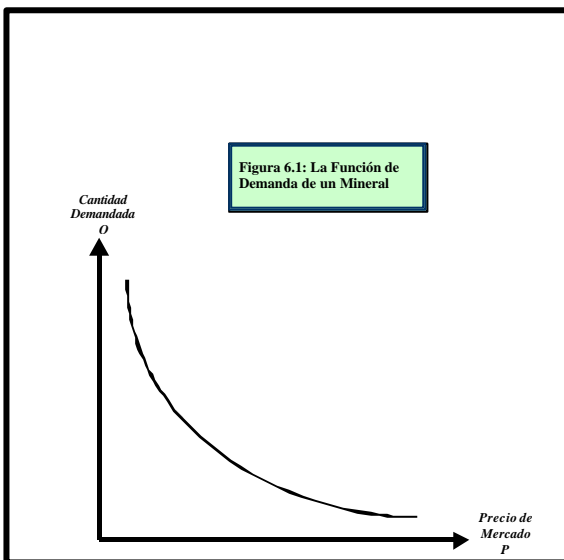
Del mismo modo, las decisiones actuales de extracción dependen de las que se hayan tomado en el pasado, así como de las expectativas sobre los costes y los precios futuros. La tasa actual de extracción afectará la cantidad que podrá obtenerse en el futuro, y no sólo porque de ella dependerán las reservas remanentes en cada depósito, sino también porque el ritmo de disminución actual de las reservas, puede ser un incentivo para aumentar la exploración y el

desarrollo de actividades que pueden llevar a un aumento en el nivel futuro de reservas. Además, para un nivel dado de reservas conocidas en la actualidad, la decisión de explotar los depósitos con menores costes de extracción, dejará sólo depósitos con costes más elevados de extracción para el futuro. Del mismo modo, la reducción del contenido de los grandes depósitos de mineral, y la tendencia a concentrar la exploración en los lugares más accesibles, y donde es más probable encontrar yacimientos más ricos, conducirá a un aumento de los costes de exploración en el futuro.

El modelo básico de análisis de la gestión de los recursos no renovables que desarrollamos a continuación pretende dar cuenta de estas complejas relaciones intertemporales, para resolver las preguntas básicas sobre a qué ritmo deben utilizarse las reservas de un recurso no renovable. Para ello concentraremos el análisis en un recurso concreto, del que conocemos las reservas disponibles en la actualidad y sus usos por parte del sistema productivo. Así las cosas, nuestro problema se reduce a averiguar, en cada momento del tiempo, cuánto se debe extraer y, en consecuencia, qué cantidad habrá de reservarse para los períodos futuros.

Estas decisiones dependen en primer lugar de la demanda existente en la economía del recurso en cuestión. Los recursos no renovables son básicamente insumos productivos para la fabricación de otros bienes. Así, el mineral de hierro se demanda para producir acero, que

luego es utilizado para la fabricación de distintas máquinas y utensilios. El petróleo crudo es un input utilizado para refinar gasolina que, a su vez, es demandada por otros para satisfacer las necesidades de transporte de la sociedad. En consecuencia, la demanda de recursos no renovables dependerá del valor de los bienes finales de consumo y de los servicios que se puedan obtener de ellos. Dada la tecnología de producción de acero, por ejemplo, se puede decir la industria siderúrgica está dispuesta a adquirir una cantidad mayor de mineral en cuanto menor sea el precio al que pueda adquirirlo. Podemos admitir entonces que la función de demanda de mineral se puede definir como una relación decreciente entre el



precio de mercado y la cantidad que las empresas están dispuestas a comprar, tal como aparece en la figura 6.2. Además de los motivos usuales para justificar la forma decreciente de la función de demanda, en el caso de los minerales existe un motivo adicional: el hecho de que a medida que el precio crece se hacen rentables los procesos de reciclado y, en consecuencia, el material utilizado se convierte gradualmente en un sustituto rentable de la materia prima original. Por ejemplo, según Tietenberg (1992, p.208), en 1987 el reciclado de botes de aluminio permitió ahorrar una cantidad de energía equivalente al consumo de seis meses de la ciudad de Nueva York, lo que fue posible por el aumento de los precios del mineral de hierro durante toda la década.

La función de demanda nos permite explicar por qué razón, en un momento determinado es útil extraer minerales del suelo, pero no nos dice nada sobre el valor de las reservas que permanecen enterradas, ni sobre los motivos que llevan a sus propietarios a conservarlas.

La economía de los recursos naturales trata “los recursos en el suelo” como activos de capital para la sociedad. La sociedad en su conjunto tiene motivos para preservar gran parte de los recursos para satisfacer las demandas futuras. No obstante, en una sociedad de mercado, donde los yacimientos de minerales son en su gran mayoría de propiedad privada, estas decisiones de conservación corresponden a los propietarios particulares de cada veta o cada yacimiento. Si las reservas en el suelo no produjeran ningún rendimiento, los propietarios de las mismas preferirían extraerlas en el menor tiempo posible para hacerse con unos beneficios que se puedan invertir en una actividad más rentable. Sin embargo, las cosas no ocurren de este modo; para los empresarios, y para la sociedad en su conjunto, esperar antes de agotar los recursos en el menor plazo posible, es una solución deseable y rentable.

Las razones y los incentivos que existen para esperar, son el argumento central del modelo básico de gestión de los recursos no renovables. Veamos estos motivos suponiendo que, como es habitual, el recurso en cuestión es de propiedad privada. Para su dueño, un pozo, una veta o un yacimiento es una inversión, un activo, que le proporciona beneficios, y, desde su punto de vista, es comparable a otras inversiones que proporcionan rendimientos financieros en la economía. Sin embargo, a diferencia de una máquina, o de otros activos, los recursos que permanecen enterrados no producen ningún ingreso mientras no se extraigan y se pongan a la venta. En una economía de mercado, sólo hay un motivo razonable para que el propietario de un depósito de mineral decida conservarlo, y es que dicho activo aumente de valor con el paso del tiempo. El único motivo para mantener inexploradas la mayor parte de las reservas de recursos no renovables es que el rendimiento financiero que se puede obtener de ellas en el futuro sea más alto que el que se puede obtener en la actualidad.

### **6.3.2. El Modelo Básico:**

Para hacer las cosas simples, supongamos que las reservas de mineral se pueden extraer sin ningún coste y que no es esperable el descubrimiento de nuevas reservas, ni el cambio en la demanda futura de minerales. En este caso, el único motivo para guardar reservas para el futuro, es la expectativa de que el precio de venta del mineral aumente.

La cantidad que los empresarios decidan extraer dependerá de las expectativas que éstos tengan sobre el aumento de los precios. Pero tales expectativas están lejos de ser algo inmutable y, en cada momento, deben ser revisadas y corregidas en función de las decisiones que vayan tomando los demás empresarios y, en suma, de la evolución de mercado de minerales. Por ejemplo, supongamos que los empresarios esperan que el precio del mineral aumente muy poco, o no lo haga en absoluto, durante los próximos años. En ese caso, es lógico que muchos de ellos opten por extraer y vender cuánto antes todas sus reservas para trasladar su capital a una alternativa más prometedora. Sin embargo, esta decisión razonable no hará más que crear una situación en la que todos se verán forzados a modificar sus expectativas y sus decisiones presentes. El aumento de la producción creará un exceso de oferta en el mercado, lo que hará disminuir momentáneamente los precios de venta del

mineral, pero también hará previsible una escasez de minerales en los años siguientes, haciendo plausible un aumento futuro de los precios. Estos efectos, la disminución de los precios actuales, resultado de la sobreproducción, y el aumento esperable de los precios futuros, resultado de una mayor escasez, restablecen los incentivos para conservar una mayor cantidad de minerales en el suelo y servirán para ajustar las pautas de extracción de recursos. En términos generales, podemos decir que la situación anterior será lo que ocurra cuando los empresarios esperan que el precio de los minerales crezca a un ritmo menor que el tipo de interés de la economía.

También podemos pensar en un ejemplo completamente opuesto al anterior. Supongamos que los empresarios esperan que, debido al agotamiento pasado de los yacimientos conocidos, en el futuro los precios serán muy superiores a los actuales. Si es así, la decisión lógica para ellos será esperar, conservando los minerales inexplorados para venderlos en el futuro con un margen mayor de beneficios. Sin embargo, al igual que en el caso anterior, estas decisiones no serán estables y el propio mercado se encargará de obligar a las empresas a revisarlas. Si se dejan muchas reservas para el futuro no será razonable esperar precios muy altos en los años subsiguientes; por otra parte, el mercado actual se verá desabatecido y, en consecuencia, el precio corriente de los minerales aumentará. Al aumentar el precio actual y reducirse la expectativa de precios muy elevados en el futuro, se crearán nuevos incentivos para extraer una mayor cantidad de recursos en el momento actual. Esta situación será la que ocurra cuando los empresarios esperan, inicialmente, que el precio de los minerales crezca a un ritmo mayor que el tipo de interés de la economía.

Entre los dos casos extremos, hay una situación intermedia que se puede mantener en el tiempo, extraer cada año una cantidad suficiente para que los precios de mineral crezcan al mismo ritmo que el tipo de interés de la economía. Esta es la idea central de la llamada Regla de Hotelling: según esta regla, la pauta óptima de explotación de un recurso natural se caracteriza porque, a lo largo del tiempo, el beneficio marginal que se puede obtener con la extracción y venta del recurso debe crecer al mismo ritmo que el tipo de interés. En nuestro modelo simple, como los costes de extracción son nulos, el beneficio es igual al precio de venta.

Para aclarar el significado de la regla de Hotelling, podemos ver algunas de sus consecuencias más generales con ayuda de la Figura 6.3. De acuerdo con la curva de demanda, el único modo de conseguir que el precio del mineral aumente es disminuyendo la cantidad que se extrae año tras año. Por eso la regla de Hotelling, también significa que, con nuestros supuestos restrictivos que luego matizaremos, la cantidad de mineral que se extrae cada año es menor que la del año anterior. Esto se ilustra en la figura 6.3 en la que se relacionan tres elementos fundamentales para entender la pauta de explotación de un recurso no renovable en una economía de mercado: en primer lugar la demanda del recurso, que se muestra en el panel (a); en segundo lugar, la pauta de crecimiento de los precios, de acuerdo con la regla de Hotelling, en el panel (b) y, en tercer lugar, los dos elementos anteriores se relacionan en el panel (c) donde se representa la pauta de extracción decreciente a lo largo del tiempo. En resumen, en la pauta óptima de extracción de recursos, a medida que el precio crece, la cantidad demandada disminuye gradualmente y, con ella, disminuye la cantidad de material que se extrae del suelo.



haría rentable obtener este recurso a partir de la piedra común, un recurso evidentemente abundante, en el que el cobre se encuentra atrapado en concentraciones muy pequeñas.

Estos procesos de producción, que permiten prescindir definitivamente de un recurso natural se conocen como tecnologías de remplazo. Muchas de ellas son conocidas y han superado los estudios de prueba necesarios para su puesta a punto, varias energías renovables entran en esta categoría, y otras opciones parecidas fueron ya ejercidas por la sociedad en el pasado, como la sustitución del caucho por las fibras sintéticas o de los abonos naturales por los fertilizantes químicos.

En el modelo simple de análisis la tecnología de remplazo se puede representar a través de un precio, suficientemente alto, que haría cero la demanda del mineral en cuestión, tal como se representa en el panel (a) de la figura 6.2. Este precio, en términos prácticos, representa un umbral, a partir del cual, el depósito de mineral deja de tener valor para su propietario. Una vez que se active y se generalice la tecnología de remplazo, dejarán de tener valor los recursos que no se hayan explotado. Esto nos permite matizar el primer resultado de la regla de Hotelling, los precios del mineral deberán crecer al ritmo marcado por la tasa de interés, y deberán aproximarse al precio de la tecnología de remplazo a medida que las reservas remanentes se vayan aproximando a cero.

El modelo de Hotelling, pretende mostrarnos la pauta óptima de extracción de un recurso natural durante toda su vida útil. Es decir, durante todo el período de tiempo en que tal recurso es utilizado por la economía. La duración de ese período de tiempo, estará determinado, aparte de por la demanda y la tecnología de explotación, por la cantidad de reservas disponibles. Estas reservas serán iguales a la suma de todas las cantidades que se extraigan desde el momento actual hasta el momento en que la sociedad pueda prescindir del recurso, lo que se representa mediante el área sombreada del panel (c) de la figura 6.3.

Ya tenemos completo el modelo de análisis de la gestión económica de los recursos naturales. Si contásemos con toda la información necesaria, podríamos afirmar que, a medida que se utiliza un recurso no renovable, los precios deben crecer al ritmo de la tasa de descuento, reflejando la escasez cada vez mayor. Al mismo tiempo, la tasa de extracción debe disminuir a medida que el recurso se agota y su precio converge a aquel que permite la transición suave a una nueva tecnología que permita prescindir del mismo.

#### **6.4. Algunos análisis:**

Para elaborar nuestro modelo básico hemos establecido algunos supuestos restrictivos y poco realistas, sobre todo en un período de análisis tan largo como el tiempo que la humanidad tardará en extraer la última partícula de hierro o quemar el último barril de petróleo. Hemos supuesto, en primer lugar, que los costes de explotación son cero, que la demanda actual y

#### **Recuadro 6.2: La Regla de Hotelling y la tecnología del Futuro**

El Modelo de análisis inspirado en la regla de Hotelling es la pieza central de la economía de los recursos naturales. Este modelo ha servido también como marco de análisis para una gran cantidad de estudios sobre el modo en que la sociedad irá respondiendo a los desafíos cada vez mayores que suponen el agotamiento de los recursos no renovables. Un ejemplo, clásico, de este tipo de trabajos es el estudio elaborado por Gordon, Koopmans, Nordhaus y Skinner, por encargo del gobierno de los Estados Unidos sobre el modo en que la sociedad reaccionará en el futuro a la escasez de cobre. Su modelo, inspirado en el marco teórico de Hotelling, considera la evolución previsible de la demanda de cobre, sus posibilidades de sustitución y estima como se satisfará la oferta futura con producción nueva y reciclado. Las principales conclusiones son las siguientes:

1. La tasa de extracción de cobre crecerá durante los próximos cien años, alcanzando su máximo cerca del año 2100, año a partir del cual empezará a disminuir gradualmente. Tal máximo será alrededor de 8 veces mayor que el nivel de extracción actual.
2. Los minerales de cobre estarán virtualmente extinguidos hacia el año 2070. A partir de allí el cobre se obtendría de rocas con una concentración máxima del 0.05 %. Una vez que el cobre se obtenga de las rocas, su escasez intrínseca desaparecerá. El cobre será muy caro, pero ya no será escaso en el mismo sentido que un recurso agotable.
3. Con el paso del tiempo los servicios que históricamente ha prestado el cobre, serán cubiertos progresivamente por una gama creciente de materiales sustitutivos como el aluminio, el titanio, el acero, los plásticos y el vidrio. A finales del siglo 21, sólo sobrevivirá un puñado de los usos actuales.
4. El reciclado se convertirá en un gran negocio. A mediados del próximo siglo virtualmente todo el cobre disponible de deshecho será recuperado y reutilizado.
5. El precio del cobre crecerá exponencialmente durante el próximo siglo, desde los 2 hasta los 120 dólares por kilogramo, cuando los recursos de remplazo (la roca común) entre en la escena; a partir de allí los precios permanecerán estables en términos reales.

*Fuente: Robert Gordon, Tjalling Koopmans, William Nordhaus y Brian Skinner (1987) *Toward a New Iron Age? Quantitative Modelling of Resource Exhaustion*. Harvard University Press.*

futura de minerales se puede representar con una curva estable en el tiempo, y que el tipo de interés, o la tasa de descuento, son estables. En segundo lugar, implícitamente, hemos supuesto que existe un mercado de competencia perfecta, lo que excluye los monopolios y cualquier otra barrera al comercio. Finalmente, también hemos admitido que tenemos toda la información sobre la cantidad de reservas disponibles, y sobre las tecnologías de explotación, de uso, y de remplazo del recurso no renovable. Todos los supuestos mencionados nos permitieron obtener una respuesta relativamente simple a la pregunta de a qué ritmo debemos agotar un recurso no renovable y, en particular, el supuesto de información completa, nos

permitió deducir cuánto se debe consumir cada año y a qué precio se deben vender los recursos en el mercado desde el momento actual hasta su agotamiento.

Sería ingenuo no reconocer que estos supuestos son equivocados. Sin embargo, la utilidad de nuestro modelo no está en que represente de un modo fiel la realidad en que vivimos, sino en que nos proporciona una herramienta básica de análisis que, al mismo tiempo que nos ofrece respuestas simples, podemos ampliar en muchas direcciones introduciendo todas las complicaciones que hemos mencionado y para las que existen respuestas en los textos más avanzados sobre la materia.

La respuesta que nuestra sociedad puede dar al problema del agotamiento de los recursos naturales dependerá necesariamente de la información de que disponemos en la actualidad. Esto significa también que nuestras previsiones sobre la senda de agotamiento de un recurso no renovable deben ser revisadas permanentemente cada vez que dicha información cambie. Por ese motivo, la senda de eficiencia que hemos definido es asombrosamente vulnerable a cualquier cambio en las condiciones de partida, por ejemplo, en el volumen de reservas conocidas, en la demanda de minerales, o en las tecnologías de remplazo. A modo de ilustración veamos lo que ocurre en el tercero de los casos mencionados.

Supongamos que se produce un descubrimiento nuevo que permite encontrar un modo de sustituir la gasolina como combustible de los automóviles y que, aunque resulta más caro que el precio actual de la gasolina en el mercado, es más barato que obtener el mismo combustible con las técnicas conocidas de licuefacción de carbón. En otras palabras, ya no será necesario que el precio del barril de petróleo aumente hasta los treinta dólares para que decidamos masivamente cambiar de combustible. ¿Qué consecuencias tendrá esta circunstancia sobre las reservas y la extracción de petróleo?. La primera consecuencia es que, aunque la cantidad física de petróleo en el subsuelo sea la misma que antes, el petróleo será ahora un recurso menos escaso que antes; las posibilidades efectivas de mantener nuestro bienestar prescindiendo del petróleo son ahora mayores que antes.

**¡Error! Vínculo no válido.**

Esto tendrá necesariamente consecuencias que afectarán a los precios del barril de petróleo. De mantenerse el crecimiento actual de los precios, se alcanzará antes el momento en que no lo demandaremos para producir gasolina y, llegado ese momento, quedarán en el suelo reservas sin explotar que carecerán de valor para los propietarios de los pozos petroleros. Por esa razón todas las previsiones deberán revisarse, será necesario acelerar el ritmo de extracción, lo que conducirá a una revisión de los precios actuales y futuros, y probablemente se reducirá también la vida útil del petróleo.

El ejemplo sólo pretende ilustrar una característica de la regla de Hotelling, la senda de explotación de un recurso no renovable cambia con cada circunstancia nueva y debe ser revisada con cada descubrimiento de nuevas reservas, de nuevas tecnologías, o con cada cambio en la demanda total.

## **6.5 Conclusiones:**

En este capítulo hemos desarrollado los principios económicos básicos de la gestión de los recursos no renovables. Aparte de una caracterización de tales recursos y de una presentación de su importancia para el presente y el futuro de la economía hemos dedicado especial atención al problema de la escasez insistiendo en que esta debe ser vista como un problema económico más que como la consecuencia del agotamiento físico de los yacimientos disponibles y conocidos. En la segunda mitad del capítulo, hemos presentado el modelo básico que permite dar una respuesta a la pregunta sobre a qué ritmo debemos agotar los recursos no renovables.

Como nota final, vale la pena insistir en que todas nuestras respuestas son tan buenas como la información de que disponemos. Esto es especialmente importante si tenemos en cuenta que nos movemos en un mundo donde las incertidumbres juegan un papel importante. El panorama que se adivinaba en los años 70, con proyecciones de un aumento constante de la demanda de minerales junto con una escasez inminente de los mismos, resultó excesivamente pesimista a la luz de la experiencia posterior. La economía fue capaz de transformar la penuria en abundancia y actualmente las reservas económicas de la mayoría de los recursos son mayores y sus precios, en términos reales, más bajos. Sin embargo, aunque en muchos casos relevantes es posible prever las opciones tecnológicas que utilizaremos en el futuro (véase el Recuadro 6.2), no podemos afirmar con certeza que la economía será capaz de responder ante cualquier forma de escasez futura.

Otra fuente de incertidumbre está en la casi imposibilidad de prever importantes descubrimientos futuros de nuevas yacimientos. Las técnicas de exploración se han desarrollado hasta el punto en que la mayor parte de los depósitos de mineral de alta calidad han sido localizados en la mayor parte del planeta. Algunos observadores conocidos son pesimistas sobre la posibilidad de cambios en los depósitos conocidos de minerales, y creen que los principales cambios deberán ser de carácter económico y tecnológico.

Aunque la prudencia desaconseja hacer previsiones más allá de un par de décadas en el futuro, sí existen algunas cautelas importantes que deben tenerse en cuenta.

Aun existen regiones en el mundo con escaso o nulo desarrollo de actividades extractivas. Esto es cierto especialmente en las regiones polares. Gradualmente, los avances técnicos han hecho posible operar en las costas heladas de Canadá, Siberia y la Antártida, donde existen importantes depósitos y no es improbable que se concentren actividades de exploración. Los fondos oceánicos también son objeto de una atención cada vez mayor. Una gran parte del suelo del Océano Pacífico está cubierta por nódulos de manganeso y óxidos de hierro así como de otros recursos escasos como el cobre, níquel, que ya fueron descubiertos desde la expedición del Challenger, el primer buque de investigación, en 1870. Las exploraciones desarrolladas revelan que las reservas de tales recursos pueden superar las que aun se encuentran en las plataformas continentales. No obstante, la explotación de nuevos yacimientos supone nuevos retos para la sociedad. ¿Cuáles son los efectos que esto tendrá sobre la vida marina?, ¿quién tiene el derecho a tales recursos? ¿cuáles serán sus efectos ambientales?.

Aunque conocemos las posibilidades de sustitución de distintos materiales y es previsible que estas entren en funcionamiento a medida que se agoten las reservas de alta concentración de los recursos que actualmente utilizamos, también existen importantes incertidumbres sobre algunos materiales. Por ejemplo, no hay un material conocido tan resistente como el titanio que pueda sustituirle en la producción de motores de aviones; ni hay sustitutos para el cobalto en la producción de carbidos cementados para herramientas o para el germanio en la producción de aparatos ópticos de infrarojos.

Otra fuente de incertidumbre se puede encontrar en el uso de la energía. Evidentemente, a medida que nos vemos forzados a utilizar minerales de menor concentración, el uso de energía por unidad de producto deberá crecer. La combinación del agotamiento paulatino de los recursos de mineral con precios crecientes de la energía podría tener efectos desastrosos para la economía. Este fenómeno es más acusado para los minerales geoquímicamente escasos ya que, una vez agotados los depósitos de alta concentración, el material deberá ser recuperado de minerales en los que el recurso se encuentra atrapado en muy pequeñas cantidades en la estructura atómica de los minerales. Por ejemplo, Skinner sugiere que la transición de depósitos en los que la concentración de cobre es de alrededor del 1 por mil a otros en los que el mismo material se encuentra sólo en un uno por diez mil exigirá un la utilización de 2.000 unidades térmicas de energía en lugar de sólo 188.

Con independencia de que las nuevas fuentes se desarrollen o no, el escenario más plausible para asegurar el abastecimiento futuro de materiales y energía es a través de sustitución y conservación.