

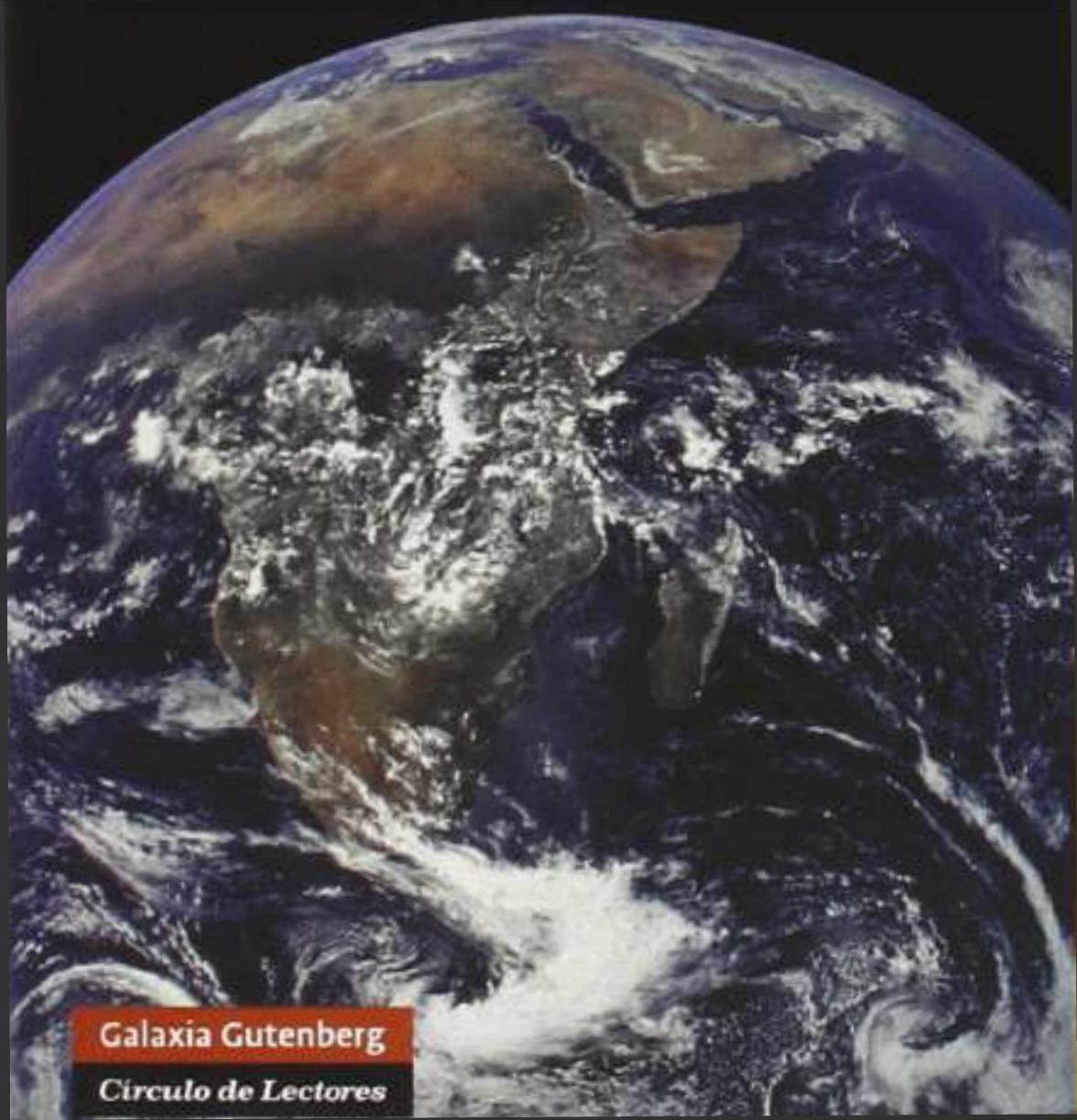
**Donella Meadows**

**Jorgen Randers**

**Dennis Meadows**

**Los límites del crecimiento**

**30 años después**



**Galaxia Gutenberg**

*Círculo de Lectores*

---

## Los límites del crecimiento

## Dedicatoria

A lo largo de los últimos tres decenios, muchas personas y organizaciones nos han ayudado a entender cómo los límites del crecimiento material conformarán el futuro del mundo. Dedicamos este volumen a tres personas cuyas aportaciones han sido fundamentales:

**AURELIO PECCEI**, fundador del Club de Roma, cuya profunda preocupación por el mundo y cuya fe inquebrantable en la humanidad nos han inspirado a nosotros y a muchos otros para plantearnos y abordar las perspectivas de futuro a largo plazo de la humanidad.

**JAY W. FORRESTER**, profesor emérito de la Sloan School of Management del MIT y maestro nuestro. Él concibió el prototipo del modelo informático que hemos utilizado, y su profundo conocimiento de los sistemas nos ha ayudado a comprender los comportamientos del sistema económico y ambiental.

Por último, tenemos el triste honor de dedicar este libro a su principal autora, **DONELLA H. MEADOWS**. Conocida popularmente por el nombre de Dana por todos los que la respetaban y apreciaban su labor, fue una pensadora de alto nivel, escritora e innovadora social. Su gran capacidad ética, de comunicación y de servicio todavía nos inspiran y nos incitan a superarnos, y junto con nosotros a miles de personas. Buena parte de los análisis y textos de esta obra son suyos, pero este

libro acabó de escribirse después de la muerte de Dana en febrero de 2001. Ansiamos que esta edición honre y resalte su largo esfuerzo por informar a los ciudadanos del mundo y los convenza de la necesaria sostenibilidad.

## Índice

<i>Límites, esperanzas y compromisos</i> , por Ricardo Díez Hochleitner . . . . .	13
Prólogo . . . . .	17
1972: Los límites del crecimiento . . . . .	19
El final del crecimiento . . . . .	21
1992: Más allá de los límites del crecimiento . . . . .	22
1970-2000: Crecimiento de la huella humana . . . . .	24
¿Qué ocurrirá? . . . . .	26
¿Tuvimos razón hace treinta años? . . . . .	29
¿Por qué otro libro? . . . . .	31
Proyecciones y predicciones . . . . .	32
Los libros y la transición a la sostenibilidad . . . . .	33
Extralimitación y colapso en la práctica . . . . .	35
Planes de futuro . . . . .	37
LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO . . . . .	39
CAPÍTULO 1. Extralimitación . . . . .	41
CAPÍTULO 2. La fuerza motriz: el crecimiento exponencial . . . . .	65
Las matemáticas del crecimiento exponencial . . . . .	67
Magnitudes que crecen exponencialmente . . . . .	75
Crecimiento de la población mundial . . . . .	80
El crecimiento industrial a escala mundial . . . . .	91
Más población, más pobreza, más población . . . . .	98

<b>CAPÍTULO 3. Los límites: fuentes y sumideros . . . . .</b>	<b>111</b>
Fuentes renovables . . . . .	119
Alimentos, tierras, suelo . . . . .	119
Agua . . . . .	134
Bosques . . . . .	144
Especies y servicios del ecosistema . . . . .	158
Fuentes no renovables . . . . .	163
Combustibles fósiles . . . . .	163
Materiales . . . . .	180
Sumideros de contaminación y residuos . . . . .	193
Más allá de los límites . . . . .	211
Vivir del capital, no de la renta . . . . .	212
<b>CAPÍTULO 4. World3: La dinámica del crecimiento en un mundo finito . . . . .</b>	<b>221</b>
Objetivo y estructura de World3 . . . . .	222
La finalidad de World3 . . . . .	232
La estructura de World3 . . . . .	239
Límites y ausencia de límites . . . . .	247
Límites y desfases . . . . .	260
Extralimitación y oscilación . . . . .	268
Extralimitación y colapso . . . . .	270
World3: dos proyecciones posibles . . . . .	275
¿Por qué la extralimitación y el colapso? . . . . .	285
<b>CAPÍTULO 5. El retorno de más allá de los límites: la cuestión del ozono . . . . .</b>	<b>293</b>
El crecimiento . . . . .	294
El límite . . . . .	297
Las primeras señales . . . . .	301
Los desfases . . . . .	303
Extralimitación: el agujero de ozono . . . . .	305
La siguiente respuesta: desfases en la práctica . . . . .	310
Vivir sin CFC . . . . .	319
Moraleja . . . . .	321

<b>CAPÍTULO 6. Tecnología, mercados y extralimitación</b>	
. . . . .	325
Tecnología y mercados en el «mundo real» . . . . .	330
Estirar los límites a base de tecnología en World3 . . . . .	335
Algunas reservas . . . . .	350
Por qué la tecnología y los mercados no pueden evitar la extralimitación por sí solos . . . . .	352
Un ejemplo de imperfección del mercado: las oscilaciones del precio del petróleo . . . . .	358
Tecnología, mercados y la destrucción de los caladeros de peces . . . . .	363
Un resumen . . . . .	370
 <b>CAPÍTULO 7. Transiciones a un sistema sostenible</b>	
. . . . .	373
Limitación deliberada del crecimiento . . . . .	378
Limitación del crecimiento y mejora tecnológica . . . . .	386
La diferencia que pueden suponer veinte años . . . . .	391
¿Cuánto es demasiado? . . . . .	395
La sociedad sostenible . . . . .	399
 <b>CAPÍTULO 8. Instrumentos para la transición a la sostenibilidad</b>	
. . . . .	413
Las dos primeras revoluciones: agricultura e industria . . . . .	415
La próxima revolución: sostenibilidad . . . . .	419
Visión . . . . .	423
Coordinación . . . . .	427
Verdad . . . . .	429
Aprendizaje . . . . .	434
Amor . . . . .	436

<b>APÉNDICE I. Diferencias entre World3 y</b>	
World3-03 . . . . .	441
Nuevas estructuras en World3-03 . . . . .	443
Escalas de las proyecciones de World3-03 . . . . .	444
<b>APÉNDICE II. Indicadores de bienestar humano</b>	
y huella ecológica . . . . .	447
Antecedentes . . . . .	447
El índice de desarrollo humano del PNUD . . . . .	448
El índice de bienestar humano en World3 . . . . .	449
La huella ecológica de Mathis Wackernagel . . . . .	450
La huella ecológica humana en World3 . . . . .	452
Notas . . . . .	453
Lista de cuadros y figuras y sus fuentes . . . . .	475
Índice de materias . . . . .	495

## Prólogo a la edición española

### Límites, esperanzas y compromisos

Esta nueva versión y puesta al día de *Los límites del crecimiento*, primer Informe al Club de Roma publicado en 1972, es el tercer aldabonazo de sus autores sobre nuestras conciencias de ciudadanos del planeta Tierra. Atrás quedaron las críticas vertidas sobre la primera versión y sobre las observaciones del Comité Ejecutivo del Club de Roma publicadas como Introducción del *Informe* dirigido por Dennis Meadows.

Los peligros que acechan a la humanidad son ahora probablemente mayores y más inminentes. Sin embargo, no se trata de que los autores de este libro ni el Club de Roma seamos heraldos de potenciales catástrofes. Se trata, muy por el contrario, de impedir situaciones límite. Tampoco se pretende formular profecías ya que, desde la primera versión, se plantearon escenarios alternativos propios de todo trabajo prospectivo, además de proponer remedios posibles.

Actualmente, cuando se releen aquellas páginas o se consulta la versión actualizada del excelente texto publicado veinte años más tarde, bajo el título *Más allá de los límites del crecimiento*, hay que concluir que, a pesar de las muchas personas que van tomando conciencia de los grandes riesgos, seguimos sin percatarnos plenamente de que si no se producen cambios sustanciales de nuestros hábitos egoístas y derrochadores, esos riesgos se convertirán en situaciones muy peligrosas, prácticamente irreversibles e imposibles de gestio-

nar en favor de todos. Las señales que entonces se apreciaban de que se estaban dilapidando recursos no renovables, deteriorando así la insustituible herencia de la humanidad, son hoy en día acaso más evidentes y acuciantes. El mundo exponencial en que vivimos sigue siendo un mundo en el que aún no se sabe cómo acrecentar la calidad de vida y hacerla accesible a todos sin incrementar las graves huellas ecológicas que deja sobre nuestro planeta el actual modelo de crecimiento económico. La magnitud del actual consumismo muestra desde hace tiempo que necesitaríamos contar con más de un planeta Tierra para poder mantener, de este modo, los afanes de gran bienestar material por parte de los más privilegiados.

En las vibrantes páginas que siguen y que constituyen un nuevo alegato a favor de la cordura y la esperanza, los autores siguen confiando en las capacidades humanas para encontrar modos de convivencia y maneras de aprovechar nuestros saberes de forma solidaria en favor de todos. Lamentablemente, cuando estos trabajos vieron la luz en lengua inglesa, ya había fallecido Donella Meadows, la queridísima Dana, y ahora, cuando llega a los lectores de habla hispana, otros queridos miembros del Club de Roma también nos han dejado, como Víctor Urquidi, quien revisó y prologó la primera edición en español en 1972. Su esfuerzo se centró en difundir esta nueva revolución de la sostenibilidad, de la que se vuelve a hablar en los capítulos que siguen, así como la exigencia de una mayor información y de mayor claridad para no escamotear los problemas. Se trataba, y se sigue tratando, de ejercer más solidaridad para buscar soluciones que no sean para unos pocos sino para todos los pobladores del planeta, así como para las futuras generaciones, además de preservar la Naturaleza.

Los autores de esta obra piensan, como debemos pensar todos, que aún estamos a tiempo. Sin embargo, no basta si antes no estamos predispuestos a afrontar cambios radicales y globales en nuestra convivencia y en la forma como nos relacionamos con la Naturaleza. Para ello habrá que practicar el buen gobierno democrático de los asuntos colectivos e idear nuevas fórmulas productivas que hagan posible erradicar la pobreza y extender la calidad de vida a todos, a fin de impedir que se agoten los recursos no renovables del planeta. Ello supone replantear nuestra capacidad tecnológica, creativa e innovadora para que actúe en favor de todos sin limitarlo a la simple rentabilidad industrial. A tal fin es preciso idear nuevos modos de encarar los problemas y de moderar nuestros pequeños egoísmos para apostar, por el contrario, a favor de un desarrollo sostenible humano y social que deje de ser una expresión retórica para empezar a ser una ilusión esperanzada para todas las personas. La realidad de hoy se presenta tan llena de amenazas y límites como de esperanzas y posibilidades que, para hacerlas realidad, requieren de nuestra parte algunos compromisos personales y colectivos, sin los cuales de nada servirán los avances científicos o nuestras buenas palabras, ya que ambos –*saberes y voluntades*– resultarían totalmente inútiles si no actuamos con decisión en favor de una convivencia más respetuosa con la Naturaleza, más solidaria y equitativa con todos, además de ecológicamente más perdurable.

RICARDO DÍEZ HOCHLEITNER  
Presidente de Honor del Club de Roma

## Prólogo

Este libro –*Los límites del crecimiento: 30 años después*– es la tercera edición dentro de una serie. El primer texto apareció en 1972<sup>1</sup>. En 1992 publicamos la edición revisada, *Beyond the Limits (BTL)*<sup>2</sup>, donde comentamos fenómenos globales acaecidos durante los primeros veinte años de existencia de las proyecciones de *Limits to Growth (LTG)*. Esta nueva edición, treinta años después, expone las partes esenciales de nuestros análisis originales y resume algunas de las informaciones relevantes y los conocimientos que hemos adquirido a lo largo de las últimas tres décadas.

El proyecto que dio lugar a *LTG* se llevó a cabo en el seno del Grupo de Dinámica de Sistemas de la Sloan School of Management del Massachusetts Institute of Technology (MIT) de 1970 a 1972. Nuestro equipo de proyecto utilizó la teoría de la dinámica de sistemas y la modelización informática para analizar las causas y consecuencias a largo plazo del crecimiento de la población mundial y de la economía material. Abordamos cuestiones como éstas: *¿Conducen las políticas actuales a un futuro sostenible o al colapso? ¿Qué podemos hacer para crear una economía humana que aporte lo suficiente para todos?*

El examen de estas cuestiones respondía a un encargo del Club de Roma, un grupo internacional informal de destacados empresarios, políticos y científicos. La Fundación Volkswagen de Alemania aportó los fondos para financiar nuestra labor.

Dennis Meadows, a la sazón miembro del cuerpo docente del MIT, reunió y dirigió el equipo de proyecto compuesto por las siguientes personas, que dedicaron dos años a la elaboración del estudio original.

Alison A. Anderson (EE. UU.)  
Erich K. O. Zahn (Alemania)  
Ilyas Bayar (Turquía)  
Jay M. Anderson (EE. UU.)  
Farhad Hakimzadeh (Irán)  
William W. Behrens III (EE. UU.)  
Judith A. Machen (EE. UU.)  
Steffen Harbordt (Alemania)  
Donella H. Meadows (EE. UU.)  
Peter Milling (Alemania)  
Nirmala S. Murthy (India)  
Roger F. Naill (EE. UU.)  
Jorgen Randers (Noruega)  
Stephen Schantzis (EE. UU.)  
John A. Seeger (EE. UU.)  
Marilyn Williams (EE. UU.)

Una base importante de nuestro trabajo fue el modelo informático *World3*, que creamos para que nos ayudara a integrar informaciones y teorías relativas al crecimiento<sup>3</sup>. Con este modelo pudimos elaborar proyecciones de la evolución mundial que son en sí mismas coherentes. En la primera edición de *LTG* publicamos y analizamos 12 proyecciones de *World3* que mostraban distintas pautas posibles de evolución mundial a lo largo de los dos siglos comprendidos entre 1900 y 2100. *BTL* presentó 14 proyecciones de una versión ligeramente mejorada de *World3*.

*LTG* fue un éxito de ventas en varios países y se tradujo a unas treinta lenguas. *BTL* se publicó en muchos

idiomas y se utiliza ampliamente como libro de texto universitario.

## 1972: Los límites del crecimiento

*Los límites del crecimiento* (LTG, en sus siglas en inglés) reveló que los condicionamientos ecológicos globales (asociados al uso de recursos y a las emisiones) ejercerían una influencia significativa en los fenómenos mundiales a lo largo del siglo XXI. LTG advirtió de que tal vez la humanidad tendría que dedicar mucho capital y mano de obra a la lucha contra esos impedimentos, posiblemente hasta el punto de que la calidad de vida media declinaría en algún momento dado a lo largo del siglo XXI. Nuestro libro no especificaba con exactitud qué escasez de recursos o qué tipo de emisión podrían poner punto final al crecimiento al requerir más capital que el que hubiera disponible, simplemente por el hecho de que unas predicciones tan detalladas no pueden formularse sobre una base científica en el enorme y complejo sistema demográfico-económico-ambiental que constituye nuestro mundo.

LTG propugnaba una innovación social profunda y activa a través del cambio tecnológico, cultural e institucional con el fin de evitar un aumento de la huella ecológica de la humanidad que superara la capacidad de carga del planeta Tierra. Aunque el desafío global se consideraba grave, el tono de LTG era optimista, pues se resaltaba una y otra vez hasta qué punto se podía reducir el daño causado por la aproximación a los límites ecológicos planetarios (o su transgresión) si se tomaban medidas a tiempo.

Las 12 proyecciones de World3 descritas en LTG ilustran cómo el crecimiento de la población y del uso de

los recursos naturales interactúa con una serie de límites. En realidad, los límites del crecimiento se manifiestan de muchas formas. En nuestro análisis nos centramos principalmente en los límites físicos del planeta, en forma de recursos naturales agotables y de capacidad finita de la Tierra para absorber las emisiones de la industria y la agricultura. En todas las proyecciones realistas observamos que estos límites imponen el fin del crecimiento físico en World3 en algún momento del siglo XXI.

Nuestro análisis no preveía límites abruptos, ausentes un día y totalmente insoslayables al día siguiente. En nuestras proyecciones, la expansión de la población y del capital físico obliga gradualmente a la humanidad a dedicar cada vez más capital a hacer frente a los problemas derivados de un conjunto de impedimentos. Al final se dedica tanto capital a resolver esos problemas que resulta imposible sostener todo crecimiento ulterior de la producción industrial. Cuando la industria decae, la sociedad no puede seguir sosteniendo una producción cada vez mayor en otros sectores económicos: alimentación, servicios y otros consumos. Cuando estos sectores dejan de crecer, el crecimiento demográfico también cesa.

El final del crecimiento puede adoptar muchas formas. Puede producirse a modo de colapso: un declive incontrolado tanto de la población como del bienestar humano. Las proyecciones de World3 prevén tal colapso a partir de diversas causas. El final del crecimiento también puede acaecer a modo de paulatina adaptación de la huella ecológica de la humanidad a la capacidad de carga del planeta. Si especificamos importantes cambios de la política actual podemos conseguir que World3 genere proyecciones que prevean un final ordenado del crecimiento, seguido de un largo período de bienestar humano relativamente alto.

## El final del crecimiento

El final del crecimiento, cualquiera que fuera la forma que adoptara, nos parecía una perspectiva muy lejana en 1972. Todas las proyecciones de World3 en *LTG* mostraban un crecimiento de la población y la economía hasta mucho más allá del año 2000. Incluso en la proyección más pesimista de *LTG*, el nivel de vida material se mantenía al alza continuamente hasta 2015. De este modo, *LTG* situaba el final del crecimiento a unos cincuenta años vista después de la publicación del libro; un margen de tiempo suficiente para la deliberación, la toma de decisiones y las acciones correctivas, incluso a escala mundial.

Cuando escribimos *LTG* esperábamos que dicha deliberación condujera a la sociedad a adoptar medidas correctivas con el fin de reducir las posibilidades de un colapso. El colapso no es un futuro atractivo. El rápido declive de la población y la economía a unos niveles soportables por los sistemas naturales del planeta vendrá acompañado sin duda de problemas de salud, conflictos, devastación ecológica y enormes desigualdades. El colapso descontrolado de la huella humana se derivará de un rápido aumento de la mortalidad y una reducción acelerada del consumo. Con la toma de decisiones y medidas adecuadas podría evitarse este colapso; la extralimitación, en cambio, podría subsanarse mediante un esfuerzo consciente por reducir la explotación del planeta por parte de la humanidad. En este último caso, el ajuste gradual a la baja de la huella ecológica se derivaría de los esfuerzos efectivos por reducir la fertilidad y de una distribución más equitativa del nivel sostenible de consumo material.

Vale la pena repetir que el crecimiento no conduce

necesariamente al colapso. El colapso sólo sigue al crecimiento si este crecimiento se extralimita y sobreexplota las fuentes y sumideros del planeta hasta niveles superiores a los sostenibles. En 1972 parecía que la población y la economía humanas se hallaban todavía bastante por debajo de la capacidad de carga del planeta. Pensábamos que aún quedaba margen para seguir creciendo constantemente mientras se examinaban opciones a más largo plazo. Esto podía ser cierto en 1972, pero en 1992 ya no lo era.

### 1992: Más allá de los límites del crecimiento

En 1992 procedimos a una revisión –veinte años después– de nuestro estudio original y publicamos los resultados en *Beyond the Limits*. En *BTL* examinamos la evolución a escala mundial entre 1970 y 1990 y utilizamos esta información para actualizar el informe *LTG* y el modelo informático *World3*. *BTL* reiteró el mensaje original; en 1992 concluimos que dos decenios de historia corroboraban la mayor parte de las conclusiones que habíamos adelantado veinte años antes. Pero el libro de 1992 contenía un nuevo hallazgo importante: en *BTL* conjeturamos que la humanidad ya había traspasado los límites de la capacidad de carga de la Tierra. Este hecho era tan trascendente que decidimos reflejarlo en el título del libro.

Ya a comienzos de la década de 1990 había cada vez más indicios de que la humanidad se adentraba en territorio insostenible. Por ejemplo, se tenía noticia de que las selvas tropicales estaban siendo taladas a ritmos insostenibles; se especulaba con que la producción de cereales ya no podía mantener el paso con el creci-

miento de la población; algunos pensaban en un aumento de la temperatura terrestre; y había inquietud por la reciente aparición de un agujero en la capa de ozono estratosférico. Pero a los ojos de la mayoría de las personas, esto no bastaba para demostrar que la humanidad hubiera superado la capacidad de carga del medio ambiente planetario. Nosotros discrepamos. A nuestro juicio, a comienzos de la década de 1990 ya no era posible evitar la extralimitación mediante una política sabia: la extralimitación ya era una realidad. La tarea principal consistía entonces en reconducir el mundo de nuevo a un territorio sostenible. Con todo, *BTL* mantenía un tono optimista, demostrando en numerosas proyecciones hasta qué punto los daños causados por la extralimitación podrían reducirse mediante una política mundial inteligente, cambios tecnológicos e institucionales, objetivos políticos y aspiraciones personales.

*BTL* se publicó en 1992, el año en que tuvo lugar la cumbre mundial sobre medio ambiente y desarrollo en Río de Janeiro. La celebración de la cumbre parecía demostrar que por fin la sociedad mundial había decidido abordar seriamente los importantes problemas ambientales. Pero ahora sabemos que la humanidad no consiguió cumplir los objetivos de Río. La conferencia Río + 10 en Johannesburgo en 2002 fue todavía menos fructífera y se vio casi paralizada por una serie de disputas ideológicas y económicas y por la labor de quienes se aferraban a sus particulares intereses nacionales, empresariales o individuales<sup>4</sup>.

## 1970-2000: Crecimiento de la huella humana

Los últimos treinta años han producido muchos fenómenos positivos. En respuesta a una huella humana que no cesa de crecer, el mundo ha puesto a punto nuevas tecnologías, los consumidores han modificado sus hábitos de compra, se han creado nuevas instituciones y se han cerrado acuerdos multinacionales. En algunas regiones, la disponibilidad de alimentos, de energía y de productos industriales ha aumentado a un ritmo que supera con creces el crecimiento de la población. En estas regiones, la mayoría de las personas han incrementado su riqueza. En respuesta al alza de los niveles de renta se ha frenado el ritmo de crecimiento demográfico. El conocimiento de los problemas ambientales es mucho mayor hoy que en 1970. En la mayoría de países existen ministerios de medio ambiente y la educación ambiental está generalizada. Gran parte de la contaminación se ha eliminado de las chimeneas y los desagües de las fábricas del mundo rico y empresas de primera línea se esfuerzan con éxito por mejorar la ecoeficiencia.

Estos éxitos aparentes supusieron una traba para ponerse a hablar de los problemas de la extralimitación alrededor de 1990. La dificultad se vio agravada por la falta de datos básicos e incluso de un vocabulario elemental en materia de extralimitación. Tuvieron que pasar más de dos decenios para que el marco conceptual—por ejemplo, la distinción entre el crecimiento del producto interior bruto (PIB) y el crecimiento de la huella ecológica—madurara lo suficiente como para permitir una conversación inteligente sobre la cuestión de los límites del crecimiento. Y la sociedad mundial todavía intenta comprender la noción de *sostenibilidad*, un tér-

mino que sigue siendo ambiguo y del que se abusa ampliamente incluso dieciséis años después de que la Comisión Brundtland lo acuñara<sup>5</sup>.

La última década ha producido muchos datos que corroboran nuestra tesis formulada en *BTL* de que el mundo se halla en fase de extralimitación. Ahora se sabe que la producción per cápita mundial de cereales tocó techo a mediados de la década de 1980. Las perspectivas de un aumento significativo de la producción pesquera marítima se han esfumado. Los costes de las catástrofes naturales aumentan y los esfuerzos por repartir los recursos de agua potable y combustibles fósiles entre demandas que compiten entre ellas son cada vez más intensos e incluso conflictivos. Estados Unidos y otros grandes países siguen incrementando sus emisiones de gases de efecto invernadero pese a que el consenso científico y los datos meteorológicos indican que el clima mundial se está alterando a causa de la actividad humana. Ya se observan declives económicos persistentes en muchas localidades y regiones. Cincuenta y cuatro países, que abarcan el 12 % de la población mundial, experimentaron un descenso del PIB per cápita durante más de un decenio en el período comprendido entre 1990 y 2001<sup>6</sup>.

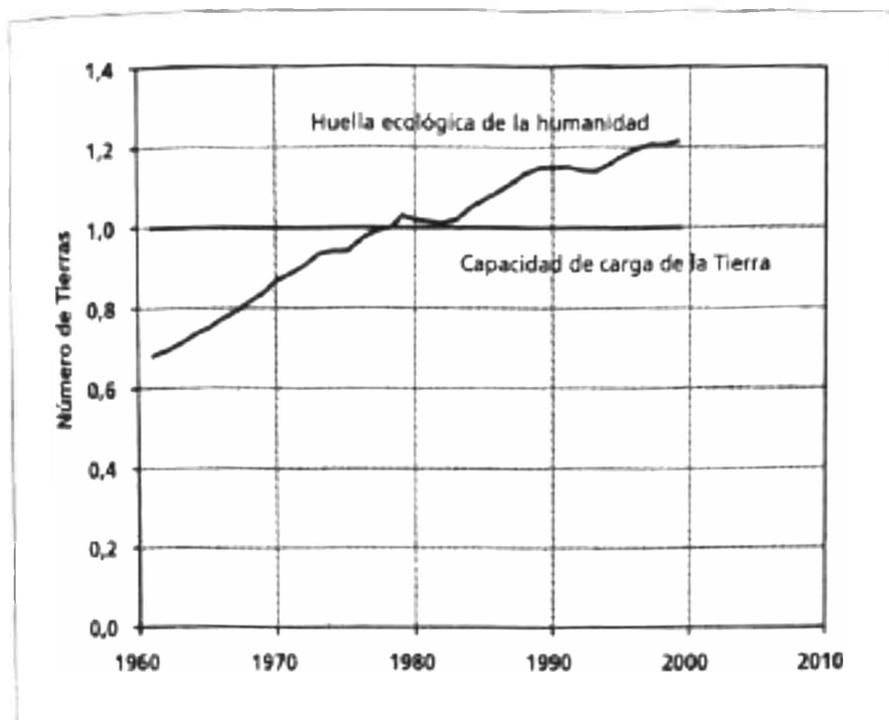
La década pasada también ha generado un nuevo vocabulario y nuevas medidas cuantitativas para examinar la extralimitación. Por ejemplo, Mathis Wackernagel y sus colaboradores han medido la *huella ecológica* de la humanidad y la han comparado con la «capacidad de carga» del planeta<sup>7</sup>. De acuerdo con su definición, la huella ecológica es la extensión de tierra que sería necesaria para suministrar los recursos (cereales, pienso, leña, pescado y terreno urbano) y absorber las emisiones (dióxido de carbono) de la sociedad mundial. Al compararla con la extensión de tierra disponible, Wackernagel

concluyó que el consumo humano de recursos se sitúa actualmente más o menos un 20 % por encima de la capacidad de carga mundial (figura P-1). Según este criterio de medición, la última vez que la humanidad se hallaba en niveles sostenibles fue en la década de 1980. Ahora se ha extralimitado aproximadamente un 20 %.

Por desgracia, la huella ecológica humana sigue aumentando a pesar de los progresos tecnológicos e institucionales. Esto es tanto más grave cuanto que la humanidad se encuentra ya en territorio insostenible. Pero la conciencia general de esta difícil situación es desesperadamente limitada. Se necesitará mucho tiempo en conseguir apoyo político para introducir los cambios de valores individuales y políticas públicas que permitirían invertir las tendencias imperantes y reducir la huella ecológica por debajo de la capacidad de carga a largo plazo del planeta.

### ¿Qué ocurrirá?

El desafío global es fácil de formular: para alcanzar la sostenibilidad, la humanidad tiene que incrementar el consumo de los pobres del mundo y al mismo tiempo reducir la huella ecológica humana total. Hacen falta avances tecnológicos, cambios personales y horizontes de planificación más largos. Hace falta más respeto, atención y equidad por encima de las divisorias políticas. Conseguir esto llevará decenios, incluso en las mejores circunstancias. Ningún partido político moderno ha obtenido un amplio apoyo para un programa de este tipo, y sobre todo no entre los ricos y poderosos, que podrían hacer sitio para el crecimiento entre los pobres reduciendo sus propias huellas. Mientras tanto, la huella mundial crece día a día.



*Figura P-1 Huella ecológica y capacidad de carga*

Este gráfico muestra el número de Tierras que se precisa para suministrar los recursos consumidos por la humanidad y para absorber sus emisiones anuales desde 1960. Esta demanda humana se compara con la oferta disponible: nuestro único planeta Tierra. La demanda humana supera la oferta de la naturaleza a partir de la década de 1980, alcanzando en 1999 una extralimitación cercana al 20 %. (Fuente: M. Wackernagel y cols.)

Por tanto, ahora somos mucho más pesimistas con respecto al futuro del mundo que en 1972. Es un hecho triste que la humanidad haya desperdiciado en gran medida los últimos treinta años en debates fútiles y respuestas bien intencionadas pero vacilantes al desafío ecológico planetario. No tenemos otros treinta años para temblar. Muchas cosas tendrán que cambiar para que la extralimitación actual no dé lugar al colapso durante el siglo XXI.

Prometimos a Dana Meadows, antes de que muriera a comienzos de 2001, que acabaríamos de escribir la nueva edición de «30 años después» del libro que ella

tanto amaba. Pero en el proceso nos topamos de nuevo con las grandes diferencias entre las esperanzas y expectativas de los tres autores.

Dana era la optimista incorregible. Tenía fe, con preocupación y compasión, en la humanidad. Predicó la labor de toda su vida suponiendo que si ponía suficiente información correcta en manos de las personas, éstas optarían finalmente por la solución sabia, clarividente y humana: en este caso, adoptar políticas globales que permitieran alejar la extralimitación (o, en su defecto, alejar el mundo del borde del abismo). Dona invirtió su vida trabajando por este ideal.

Jorgen es el escéptico. Cree que la humanidad seguirá buscando objetivos inmediatos de aumento del consumo, del empleo y de seguridad económica hasta el trágico final, haciendo caso omiso de las señales cada vez más claras y contundentes hasta que sea demasiado tarde. Le entristece pensar que la sociedad renunciará voluntariamente al maravilloso mundo que podría haber sido.

Dennis se sitúa entre ambos. Cree que en última instancia se adoptarán medidas para evitar los peores presagios de colapso mundial. Espera que al final el mundo opte por un futuro relativamente sostenible, pero sólo después de graves crisis mundiales que le obligarán a actuar, aunque sea con retraso. Y los resultados obtenidos debido a la larga demora serán mucho menos halagüeños que los que podrían haberse alcanzado si se hubiera actuado más pronto. En el proceso se destruirán muchos de los maravillosos tesoros ecológicos del planeta; se perderán muchas opciones políticas y económicas prometedoras; habrá grandes y persistentes desigualdades, una militarización creciente de la sociedad y conflictos por doquier.

Es imposible unificar estos tres puntos de vista dis-

tintos en una única visión común del futuro más probable del mundo. Pero coincidimos en lo que esperamos que pudiera suceder. Los cambios que preferiríamos que se produjeran se describen en una versión ligeramente actualizada del capítulo de conclusiones esperanzadas que escribió Dana para *BTL*, ahora titulado «Instrumentos para la transición a la sostenibilidad». El mensaje es que si perseveramos en nuestro esfuerzo pedagógico, cada vez más habitantes del mundo optarán por tomar el buen camino, por amor y respeto hacia sus cohabitantes del planeta, actuales y futuros, humanos y no humanos. Esperamos fervientemente que lo hagan a tiempo.

### ¿Tuvimos razón hace treinta años?

A menudo nos preguntan si las predicciones de *Los límites del crecimiento* fueron acertadas. Conviene señalar que éste es el lenguaje de los medios de comunicación, no el nuestro. Nosotros seguimos concibiendo nuestra investigación como un esfuerzo por dilucidar diferentes futuros posibles. No intentamos predecir el futuro, sino que esbozamos proyecciones alternativas para la humanidad a medida que ésta avanza hacia 2100. No obstante, es útil reflexionar sobre las lecciones de los treinta años transcurridos. Así pues, ¿qué ha ocurrido desde que se publicó *LTG* en un delgado tomo editado en rústica por una pequeña editorial de Washington en marzo de 1972?

Se alzaron las voces de un gran número de economistas, quienes junto a industriales, políticos y defensores del Tercer Mundo, mostraron su indignación ante la idea de poner límites al crecimiento. Pero al final los hechos han demostrado que el concepto de limitación

ecológica planetaria no es absurdo. Sin duda el crecimiento físico está limitado, y eso ejerce una enorme influencia en el resultado de las políticas que elegimos para tratar de alcanzar nuestros objetivos. Y la historia enseña que la sociedad tiene una capacidad limitada para responder a aquella limitación con medidas sabias, clarividentes y altruistas que supongan una desventaja para gente importante a corto plazo.

Las limitaciones de recursos y emisiones han originado muchas crisis desde 1972, movilizándolo a los medios de comunicación, atrayendo la atención del público y despertando a los políticos de su letargo. El descenso de la producción de petróleo en países importantes, la reducción del ozono estratosférico, el aumento de la temperatura del planeta, la extendida persistencia del hambre, el debate cada vez más acalorado sobre la ubicación de vertederos para residuos tóxicos, el descenso del nivel de las aguas subterráneas, la desaparición de especies y la mengua de los bosques son tan sólo algunos de los problemas que han dado pie a amplios estudios, reuniones internacionales y acuerdos mundiales. Todos ellos ilustran nuestra conclusión fundamental y son coherentes con ella: las limitaciones del crecimiento físico son un aspecto importante de la política mundial en el siglo XXI.

Para quienes aprecian los números podemos informar de que las proyecciones altamente agregadas de World3 siguen siendo, al cabo de treinta años, bastante acertadas. En el año 2000, el mundo tenía exactamente el número de habitantes (unos 6.000 millones, frente a los 3.900 millones que había en 1972) que nosotros proyectamos en la simulación normal de World3<sup>8</sup>. Es más, esta proyección mostraba un crecimiento de la producción mundial de alimentos (de 1.800 millones de toneladas equivalentes de cereal al

año en 1972 a 3.000 millones en 2000) que se ajusta bastante a la realidad histórica<sup>9</sup>. ¿Demuestra esta coincidencia con la realidad histórica que nuestro modelo estaba en lo cierto? No, por supuesto que no. Pero indica que *World3* no era del todo absurdo; en la actualidad, sus supuestos y nuestras conclusiones siguen estando justificados.

Es importante recordar que no hace falta cargar el modelo *World3* en un ordenador para comprender sus conclusiones básicas. Nuestras principales afirmaciones sobre la probabilidad del colapso no se derivan de una fe ciega en las curvas generadas por *World3*; simplemente, se desprenden de la comprensión de las pautas de comportamiento dinámicas generadas por tres características evidentes, persistentes y comunes del sistema planetario: límites erosionables, búsqueda incesante del crecimiento y desfase de las respuestas de la sociedad ante la proximidad de los límites. Todo sistema dominado por estas características es propenso a la extralimitación y el colapso. Los supuestos centrales de *World3* consisten en mecanismos de causa y efecto que producen límites, crecimiento y desfases. Dado que estos mecanismos indispensables también existen en el mundo real, no tiene nada de extraño que el mundo esté siguiendo una trayectoria coincidente con las principales características de las proyecciones de *LTG*.

### ¿Por qué otro libro?

¿Por qué insistimos en publicar esta versión actualizada de *BTL* si en el fondo dice lo mismo que los dos libros anteriores? El principal objetivo es reafirmar nuestro argumento de 1972, de manera que sea más comprensible y esté mejor respaldado por todos los datos y ejemplos

que han surgido durante los últimos decenios. Además, queremos proporcionar a los numerosos profesores que trabajan con nuestros textos anteriores materiales actualizados para utilizarlos con sus estudiantes. *BTL* sigue aportando visiones útiles del futuro, pero sería una práctica dudosa por parte de cualquier profesor encomendar en pleno siglo XXI un texto con cuadros de datos que acaban en 1990.

Y tenemos otras razones para escribir este libro. Una vez más, queremos

- insistir en que la humanidad se extralimita y que el daño y el sufrimiento resultantes pueden reducirse en gran medida mediante una política inteligente;
- presentar datos y análisis que contradicen las aseveraciones políticas al uso de que la humanidad se halla en el buen camino hacia su vigésimo primer siglo;
- inspirar a los ciudadanos del mundo a que reflexionen sobre las consecuencias a largo plazo de sus acciones y decisiones y concitar su apoyo político a favor de medidas susceptibles de reducir los perjuicios de la extralimitación;
- interesar a una nueva generación de lectores, estudiantes e investigadores por el modelo informático World3;
- demostrar que desde 1972 ha mejorado la comprensión de las causas y consecuencias a largo plazo del crecimiento.

### Proyecciones y predicciones

Que quede claro que *no* escribimos este libro para formular una predicción de lo que ocurrirá realmente en el siglo XXI. Desde luego, *no* predécimos que vaya a impo-

nerse un futuro determinado. Nos limitamos a presentar una gama de proyecciones alternativas: literalmente, diez diferentes panorámicas de la posible evolución del nuevo siglo. Lo hacemos para estimular el aprendizaje, la reflexión y la opción personal del lector.

No creemos que los datos disponibles y las teorías existentes permitan predecir qué ocurrirá con el mundo en el curso del siglo *xxi*. Pero sí creemos que el conocimiento actual nos permite descartar una serie de futuros por ser irrealistas. Los datos disponibles ya invalidan muchas de las expectativas implícitas de los humanos de un crecimiento sostenido en el futuro: eso es confundir los deseos con la realidad, una perspectiva atractiva pero equivocada, conveniente pero ineficaz. Nuestro análisis será útil si ayuda a los ciudadanos de la sociedad mundial a replantearse las cosas, informarse más y respetar los límites físicos del planeta, que desempeñarán un papel importante en el futuro de sus vidas.

### Los libros y la transición a la sostenibilidad

Un libro podría parecer un instrumento débil en la lucha por alcanzar el desarrollo sostenible. Pero la historia de nuestra obra ofrece una visión distinta. Se han vendido millones de ejemplares de *LTG* y *BTL*. El primer libro desencadenó un amplio debate y el segundo lo reavivó. Logramos potenciar la conciencia y la preocupación por las cuestiones ambientales en los albores del movimiento ecologista. Muchos estudiantes que leyeron *LTG* adoptaron nuevos objetivos profesionales y centraron sus estudios en cuestiones relacionadas con el medio ambiente y el desarrollo sostenible. Todo esto resultó útil.

Pero nuestro libro se quedó corto en muchos aspectos. La principal ambición en *LTG* y *BTL* era llamar la atención sobre el fenómeno de la extralimitación ecológica planetaria y animar a la sociedad a poner en tela de juicio el crecimiento como panacea para la mayoría de los problemas. Conseguimos que la expresión «límites del crecimiento» pasara a ser de uso común. El término, sin embargo, se malinterpreta a menudo y hoy suele utilizarse de modo muy simplista. La mayoría de críticos piensan que nuestra inquietud en torno a los límites se deriva de la creencia de que los combustibles fósiles o algún otro recurso están a punto de agotarse. En realidad, nuestra aprensión es más sutil: nos preocupa que las políticas actuales conduzcan a una extralimitación y a un colapso mundial mediante esfuerzos inefectivos por anticiparse y hacer frente a los límites ecológicos. Creemos que la economía humana transgrede en la actualidad importantes límites y que esta extralimitación se intensificará en gran medida durante los próximos decenios. En nuestros libros anteriores no logramos transmitir esta inquietud de un modo lúcido. Fracasamos totalmente en nuestro empeño en que el concepto de «extralimitación» fuera aceptado como preocupación legítima en el debate público.

Es interesante comparar nuestros resultados con los de aquellos grupos (integrados en gran parte por economistas) que se han pasado los últimos treinta años propugnando el concepto de libre comercio. A diferencia de nosotros, ellos han sido capaces de convertir su noción en una expresión de uso común. A diferencia de nosotros, han conseguido que muchos políticos luchen por el libre comercio. Pero también ellos se enfrentan a una falta de convicción y de fidelidad extendida y bastante fundamental que surge cada vez que la política de libre comercio genera asimismo costes personales o lo-

cales, como la pérdida de puestos de trabajo. Existen también muchos equívocos en torno al conjunto de costes y beneficios que se derivan de la adopción del objetivo del libre comercio. A nuestro juicio, la extralimitación ecológica es un concepto mucho más importante en el siglo XXI que el libre comercio. No obstante, está llevando las de perder en la lucha por la atención y el respeto del público. Este libro es un nuevo intento de recuperar esa desventaja.

### Extralimitación y colapso en la práctica

La extralimitación –y el declive subsiguiente– del bienestar social se producirá si la sociedad no se prepara suficientemente bien para el futuro. La pérdida de bienestar ocurrirá, por ejemplo, cuando no haya nada que sustituya de inmediato a las menguantes reservas de petróleo, a la pesca silvestre cada vez más escasa o a las maderas tropicales más caras una vez estos recursos empiecen a agotarse. El problema se agrava si la base del recurso es erosionable y se destruye durante la extralimitación. Es entonces cuando la sociedad podría experimentar el colapso.

En los albores del milenio se produjo un ejemplo vivo de extralimitación y colapso mundiales: la «burbuja puntocom» en el mercado bursátil mundial. La burbuja ilustra la dinámica que interesa en este libro, aunque sea en el terreno de las finanzas y no en el de los recursos físicos. El recurso erosionable era la confianza de los inversores.

He aquí un somero relato de lo que sucedió: los precios de las acciones aumentaron de un modo espectacular de 1992 a marzo de 2000 hasta alcanzar lo que, retrospectivamente, era un techo en grado sumo insos-

tenible. Desde este punto máximo, los valores de las acciones cayeron durante tres años hasta tocar fondo en marzo de 2003. Después, los precios se recuperaron gradualmente (al menos hasta enero de 2004, cuando se escriben estas líneas).

Del mismo modo que ocurrirá si la humanidad rebasa un límite de recursos o emisiones, apenas hubo inquietud ante el prolongado movimiento alcista de los precios de las acciones. Al contrario, cundió un gran entusiasmo cada vez que las cotizaciones alcanzaban alturas nunca vistas. Conviene señalar, ante todo, que el entusiasmo persistió incluso después de que los precios de las acciones entraran en territorio insostenible, un hecho que retrospectivamente parece que ya sucedió en 1998. Tan sólo mucho después de tocar techo y tras varios años de colapso, los inversores empezaron a hablar de que había habido una «burbuja», el término que ellos emplean para designar la extralimitación. Una vez instalados en el colapso, nadie pudo ya frenar la caída. Tras tres años de duración, muchos dudaban de que alguna vez llegara a su fin. La confianza de los inversores estaba totalmente erosionada.

Por desgracia, pensamos que el mundo conocerá la extralimitación y el colapso en el uso mundial de recursos y las emisiones de un modo muy parecido a lo que sucedió con la «burbuja puntocom», aunque a una escala de tiempo mucho más prolongada. La fase de crecimiento será bienvenida y celebrada incluso mucho después de que se haya adentrado en territorio insostenible (eso ya lo sabemos, pues ya ha ocurrido). El colapso llegará de forma muy repentina, en gran medida sorprendiendo a todos. Y tras perdurar algunos años, será cada vez más evidente que la situación anterior al colapso era totalmente insostenible. Después de más años de declive, pocos creerán que alguna vez vaya a

tocar a su fin. Pocos creerán que volverá a haber energía abundante y pesca silvestre suficiente. Ojalá estén equivocados.

## Planes de futuro

Hubo un tiempo en que los límites del crecimiento estaban muy lejos en el futuro. Ahora están a la vista en muchos aspectos. Hubo un tiempo en que la idea del colapso era impensable. Ahora ha empezado a instalarse en el discurso público, aunque todavía como un concepto remoto, hipotético y académico. Creemos que tendrá que pasar otro decenio hasta que las consecuencias de la extralimitación sean claramente visibles y dos decenios hasta que la extralimitación sea un hecho generalmente reconocido. Las proyecciones de este volumen muestran que la primera década del siglo XXI seguirá siendo un período de crecimiento, como mostraron también las proyecciones de *LTG* hace treinta años. Por tanto, nuestras expectativas para el período 1970-2010 no divergen mucho de las de nuestros críticos. Habremos de esperar otro decenio hasta tener pruebas concluyentes de quién está más en lo cierto.

Tenemos previsto actualizar este informe en 2012, en el 40º aniversario de nuestro primer libro. Para entonces esperamos que haya abundantes datos para verificar la realidad de la extralimitación. Seremos capaces de demostrar que teníamos razón o habremos de reconocer hechos que indiquen que la tecnología y el mercado han ampliado en efecto los límites globales hasta cotas muy superiores a las demandas de la sociedad humana. El declive de la población y la economía serán inminentes o el mundo se estará preparando para nuevos decenios de crecimiento. Hasta que llegue el

momento de elaborar ese informe, el lector tendrá que formarse su propia opinión sobre las causas y consecuencias del crecimiento en la huella ecológica humana. Esperamos que esta recopilación de información constituya una base útil para este empeño.

Enero de 2004

DENNIS L. MEADOWS, Durham, Estados Unidos

JORGEN RANDERS, Oslo, Noruega

---

# LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO

## CAPÍTULO I

## Extralimitación

El futuro ya no es... lo que podría haber sido si los humanos hubieran sabido cómo usar sus cerebros y sus oportunidades de manera más efectiva. Pero el futuro todavía puede llegar a ser lo que deseamos de modo razonable y realista.

AURELIO PECCEI, 1981

Extralimitarse significa ir demasiado lejos, rebasar accidentalmente los límites, sin intención. Las personas experimentan estas extralimitaciones todos los días. Cuando uno se levanta demasiado rápido de la silla, puede perder momentáneamente el equilibrio. Si usted abre en exceso el grifo de agua caliente en la ducha, puede salir escaldado. En una carretera helada, su coche puede deslizarse más allá de una señal de stop. En una fiesta uno puede beber mucho más alcohol de lo que el cuerpo puede metabolizar con facilidad; a la mañana siguiente, tendrá un atroz dolor de cabeza. Las empresas constructoras edifican periódicamente más viviendas que las que puede absorber la demanda, lo que conlleva vender unidades por debajo del coste y enfrentarse a la posibilidad de la quiebra. A menudo se construyen demasiados buques de pesca, y entonces las flotas pesqueras crecen tanto que capturan mucho más que el volumen sostenible; de este modo se agotan las poblaciones de peces y los buques deben permanecer en puerto. La industria química ha fabricado más produc-

tos clorados de los que la atmósfera superior puede asimilar con seguridad, y ahora la capa de ozono se reducirá peligrosamente durante decenios hasta que desciendan los niveles estratosféricos de cloro.

Las tres causas de la extralimitación son siempre las mismas, en cualquier dimensión, desde la personal hasta la planetaria. En primer lugar el crecimiento, la aceleración, el cambio rápido. En segundo lugar, alguna especie de límite o barrera que impide el correcto funcionamiento del sistema dinámico. Por último, se produce un desfase o error de percepción en las respuestas encaminadas a mantener el sistema dentro de sus límites. Estas tres condiciones son necesarias y suficientes para producir una extralimitación.

La extralimitación es un fenómeno común y adopta formas casi infinitas. El cambio puede ser físico, como el aumento del consumo de petróleo; organizativo, como el incremento del número de personas sometidas supervisadas; de carácter psicológico, como los deseos de un consumo personal cada vez mayor; o bien de índole financiera, biológica, política o muchas otras.

Los límites son igualmente diversos: pueden venir impuestos por un espacio acotado; por un tiempo limitado; por restricciones inherentes a las características físicas, biológicas, políticas, psicológicas u otras propiedades de un sistema.

Los desfases también surgen de muchas maneras. Pueden deberse a la falta de atención, al retraso de la información, a la lentitud de reflejos, a una burocracia aparatosa o arisca, a una teoría falsa sobre el funcionamiento del sistema o a la dinámica que impide parar el sistema rápidamente pese a todos los esfuerzos por detenerlo. Por ejemplo, puede producirse un desfase cuando un automovilista no se percata de hasta qué punto la fuerza de frenado de su coche ha menguado

debido al hielo de la carretera; o en el caso del contratista, que se basa en los precios actuales para tomar decisiones sobre una actividad constructora que se presentará en el mercado dos o tres años después; o los propietarios de flotas pesqueras, que basan sus decisiones en datos sobre capturas recientes, y no en informaciones sobre la futura tasa de reproducción de los peces; y respecto a los productos químicos que tardan años en migrar desde donde se utilizan hasta un lugar del ecosistema en que causan profundos daños.

En la mayoría de los casos, las extralimitaciones apenas son lesivas. Situarse más allá de muchos tipos de límites no expone a nadie ni ocasiona graves perjuicios. La mayor parte de las extralimitaciones ocurren con tanta frecuencia que cuando se tornan potencialmente peligrosas, las personas aprenden a evitarlas o a minimizar sus consecuencias. Por ejemplo, antes de meterse bajo la ducha uno comprueba la temperatura del agua con la mano. A veces se producen daños, pero se corrigen rápidamente: la mayoría de las personas tratan de dormir más por la mañana después de haber trasnochado hasta muy tarde bebiendo en el bar.

Ocasionalmente, sin embargo, surge el potencial de una extralimitación catastrófica. El crecimiento de la población mundial y de la economía material confronta a la humanidad con esta posibilidad. Éste es el tema del presente libro.

A lo largo de este texto bregaremos con las dificultades para comprender y describir las causas y consecuencias de una población y una economía que han crecido más allá de la capacidad de carga de la Tierra. Las cuestiones implicadas en esto son complejas. Muchos de los datos que interesan son inexactos o están incompletos. La ciencia actual no ha generado todavía el consenso entre los científicos, y mucho menos entre los po-

líticos. No obstante, necesitamos un término que remita a la relación entre las demandas de la humanidad con respecto al planeta y la capacidad del globo para satisfacerlas. A este fin utilizaremos la expresión *huella ecológica*.

Este término se popularizó a raíz de un estudio realizado por Mathis Wackernagel y sus colaboradores para el Consejo de la Tierra en 1997. Wackernagel calculó la porción de terreno que se precisaría para suministrar los recursos naturales consumidos por la población de varios países y para absorber sus residuos<sup>1</sup>. El término de Wackernagel y su planteamiento matemático fueron adoptados más tarde por el World Wide Fund for Nature (WWF, Fondo Mundial para la Naturaleza), que publica datos semestrales sobre la huella ecológica de más de ciento cincuenta países en su *Living Planet Report*<sup>2</sup>. De acuerdo con estos datos, desde finales de la década de 1980 los habitantes de la Tierra han consumido cada año más recursos producidos por el planeta que los que han podido regenerarse durante ese mismo año. En otras palabras, la huella ecológica de la sociedad mundial ha sobrepasado la capacidad de abastecimiento de la Tierra. Hay muchos datos que corroboran esta conclusión, que comentaremos en el capítulo 3.

Las consecuencias potenciales de esta extralimitación son sumamente peligrosas. La situación es inédita, pues confronta a la humanidad con una serie de cuestiones que nunca antes ha experimentado nuestra especie a escala mundial. Carecemos de la perspectiva, las normas culturales, los hábitos y las instituciones necesarias para afrontarla. Y en muchos casos, el daño tardará siglos o milenios en subsanarse.

Pero las consecuencias no necesariamente serán catastróficas. La extralimitación puede llevar a dos sali-

das diferentes. Una es un choque de algún tipo; la otra es un cambio de rumbo, una corrección, una mitigación suave. En este libro exploramos estas dos posibilidades desde el punto de vista de la sociedad humana y del planeta que la sostiene. Creemos que la corrección es posible y que podría desembocar en un futuro deseable, sostenible y suficiente para todos los pueblos del mundo. También creemos que si no se procede —y pronto— a una rectificación profunda, será inevitable un choque de alguna clase. Y éste ocurrirá durante la vida de muchos de los que hoy están vivos.

Todo esto son palabras mayores. ¿Cómo hemos llegado a formularlas? Durante los últimos treinta años hemos trabajado con muchos colegas con ánimo de comprender las causas y las consecuencias a largo plazo del crecimiento para la población humana y su huella ecológica. Hemos enfocado estas cuestiones de cuatro maneras, como si hubiéramos empleado cuatro lentes para observar los datos desde distintas ópticas, del mismo modo que los lentes de un microscopio y de un telescopio nos muestran perspectivas diferentes. Tres de estos instrumentos de observación son de uso común y fáciles de describir: (1) las teorías científicas y económicas al uso sobre el sistema global; (2) datos sobre los recursos mundiales y el medio ambiente; y (3) un modelo informático que nos ayuda a integrar esta información y proyectar sus implicaciones. Gran parte de este libro profundiza en estas tres perspectivas y explica cómo las hemos utilizado y qué nos han permitido ver.

El cuarto instrumento es nuestra «visión del mundo», un conjunto en sí mismo coherente de creencias, actitudes y valores: un paradigma, un modo básico de mirar la realidad. Todas las personas tienen una visión del mundo, que influye en lo que miran y en lo que ven. Funciona como un filtro que deja pasar la información

coherente con sus expectativas (a menudo subconscientes) con respecto a la naturaleza del mundo, y les lleva a descartar las informaciones que ponen en duda o desmienten dichas expectativas. Cuando alguien mira a través de un filtro, como una placa de vidrio coloreado, suele mirar *a través* de él, más que ver el mismo filtro; eso mismo ocurre con la visión del mundo. No hace falta describir una visión del mundo a las personas que ya la comparten y resulta difícil describirla a quienes tienen otra distinta. Pero es fundamental recordar que todo libro, todo modelo informático, toda declaración pública vienen acuñados por lo menos en la misma medida por la visión del mundo de sus autores como por cualesquiera datos o análisis «objetivos».

No podemos evitar esta influencia de nuestra propia visión del mundo. Pero podemos intentar al máximo posible describir sus características principales a nuestros lectores. Nuestra visión del mundo ha sido forjada por las sociedades industriales occidentales en que nos criamos, por nuestra formación científica y económica y por las lecciones que hemos aprendido a raíz de nuestros viajes y nuestro trabajo en muchas partes del mundo. Pero la parte más importante de nuestra visión del mundo, al tiempo que la menos común, es nuestra perspectiva sistémica.

Al igual que cualquier punto de vista —como la cima de una montaña, por ejemplo—, una perspectiva sistémica permite ver cosas que uno no podría percibir desde cualquier otro punto destacado y puede bloquear la visión de otras cosas. Nuestra formación estuvo centrada en sistemas dinámicos, en conjuntos de elementos materiales e inmateriales que cambian con el tiempo. Nuestra formación nos ha enseñado a ver el mundo como un conjunto de pautas de comportamiento dinámicas, como el crecimiento, el declive, la fluctuación, la

extralimitación. Nos ha enseñado a no fijarnos tanto en los componentes singulares de un sistema como en los nexos. Vemos los numerosos elementos de la demografía, la economía y el medio ambiente como *un único sistema planetario*, con sus innumerables interacciones. Vemos reservas y flujos y reacciones y umbrales en las interconexiones, que influyen todas en el modo en que se comportará el sistema en el futuro y en las medidas que podemos tomar para cambiar su comportamiento.

La perspectiva sistémica no es en modo alguno la única manera útil de ver el mundo, pero la consideramos particularmente ilustrativa. Nos permite enfocar los problemas desde diversas ópticas y descubrir opciones insospechadas. Nos proponemos exponer aquí algunas de sus nociones, de modo que el lector pueda ver lo que nosotros vemos y formarse su propia opinión sobre el estado del mundo y las alternativas de cara al futuro.

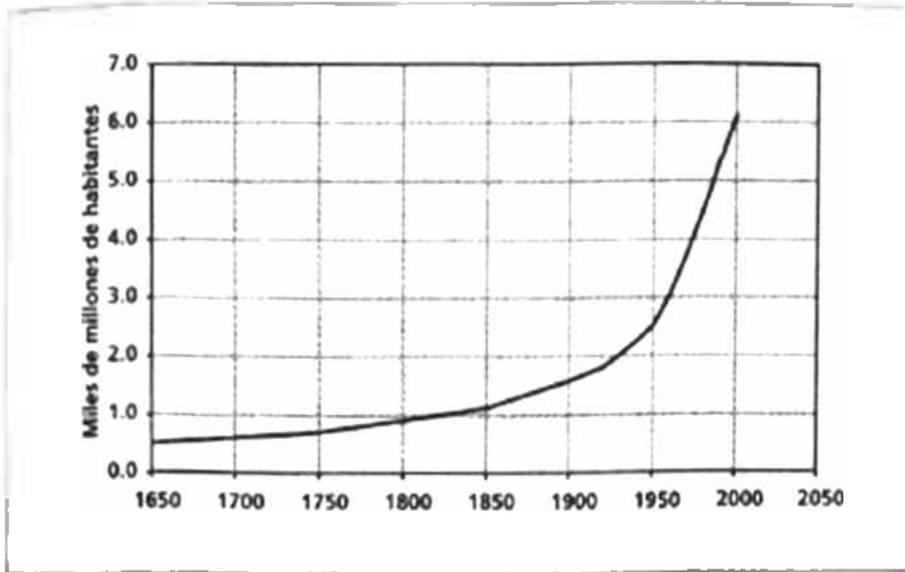
La estructura de este libro se ajusta a la lógica de nuestro análisis sistémico global. Ya hemos puntualizado la cuestión básica: la extralimitación se deriva de la combinación de (1) el cambio rápido, (2) los límites de este cambio y (3) los errores o desfases de la percepción de los límites y del control del cambio. Examinaremos la situación mundial en el orden siguiente: en primer lugar, las fuerzas motrices que generan el rápido cambio global, después los límites del planeta y finalmente los procesos a través de los cuales la sociedad humana experimenta los límites y responde a los mismos.

Iniciaremos nuestro estudio en el capítulo siguiente con el fenómeno del cambio. Los ritmos de cambio absolutos y globales son en la actualidad mayores que nunca en la historia de nuestra especie. Este cambio viene impulsado principalmente por el crecimiento expo-

nencial de la población y de la economía material. El crecimiento es el comportamiento dominante del sistema socioeconómico mundial desde hace más de doscientos años. Por ejemplo, la figura 1-1 muestra el crecimiento de la población mundial, que sigue ascendiendo a un ritmo vertiginoso a pesar de la caída de las tasas de natalidad. La figura 1-2 refleja que la producción industrial también aumenta pese a las inflexiones derivadas de las alzas bruscas de los precios del petróleo, el terrorismo, las epidemias y otros factores coyunturales. La producción industrial ha crecido más rápidamente que la población, dando lugar a un incremento del nivel de vida material medio.

Una consecuencia del crecimiento demográfico e industrial es la alteración de otras características del sistema planetario. Por ejemplo, muchos niveles de contaminación van en aumento. La figura 1-3 refleja un cambio importante: la acumulación en la atmósfera de dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles y a la tala de los bosques por los humanos.

Este libro incluye asimismo gráficos que ilustran el crecimiento de la producción de alimentos, de las poblaciones urbanas, el consumo de energía, el uso de materiales y muchas otras manifestaciones físicas de la actividad humana en el planeta. No todo crece al mismo ritmo o de idéntica manera. Como se desprende del cuadro 1-1, las distintas tasas de crecimiento varían mucho unas de otras. Algunas de ellas han ido decayendo, pero todavía comportan incrementos anuales significativos de la variable subyacente. A menudo, una tasa de crecimiento en declive sigue produciendo aumentos absolutos crecientes, cuando un porcentaje menor se multiplica por una base mucho más grande. Éste es el caso de 8 de los 14 factores del cuadro 1-1. Du-



*Figura 1-1 Población mundial*

La población mundial ha crecido exponencialmente desde el comienzo de la Revolución Industrial. Nótese la forma de la curva y el cambio cada vez más rápido a medida que pasa el tiempo; éstas son características distintivas del crecimiento exponencial. La tasa de crecimiento, sin embargo, está disminuyendo actualmente; la curva se torna menos empinada de un modo apenas perceptible. En 2001, la tasa de crecimiento de la población mundial era del 1,3 % al año, lo que comporta un período de duplicación de 55 años. (Fuentes: PRB; ONU; D. Bogue.)

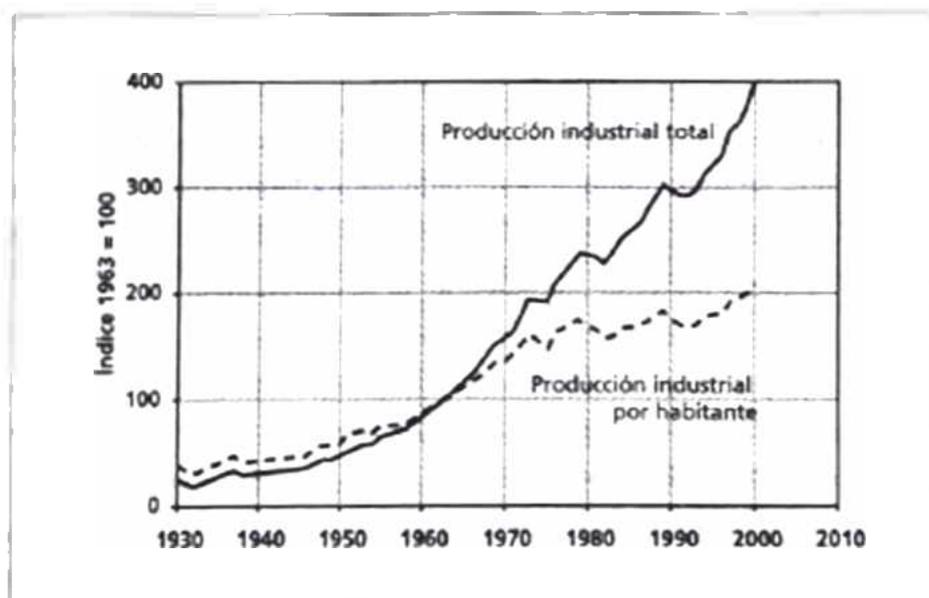
rante los últimos cincuenta años, los seres humanos han multiplicado por factores de 2, 4, 10 o incluso mayores su propia población, sus bienes físicos y los flujos de materiales y energía que utilizan, y esperan aún más crecimiento en el futuro.

Las personas apoyan las políticas orientadas al crecimiento porque creen que éste les reportará un bienestar cada vez mayor. Las políticas gubernamentales están dirigidas hacia el crecimiento porque los gobiernos ven en él un remedio para casi todos los problemas. En el mundo rico, el crecimiento se considera necesario para el empleo, la movilidad social ascendente y el progreso tecnológico. En el mundo pobre, el crecimiento

parece ser el único camino para salir de la pobreza. Muchos piensan que el crecimiento es necesario para aportar los recursos que se requieren para proteger y mejorar el medio ambiente. Los dirigentes políticos y empresariales hacen todo lo posible por generar más y más crecimiento.

Por estas razones, el crecimiento ha llegado a verse como un motivo de celebración. Basta evocar algunos sinónimos de esta palabra: *desarrollo, progreso, avance, ganancia, mejora, prosperidad, éxito.*

Éstas son razones psicológicas e institucionales del crecimiento. También existen lo que los analistas de sistemas denominan razones *estructurales*, insertas en



*Figura 1-2 Producción industrial mundial*

La producción industrial mundial, a partir del año base de 1963, muestra un claro incremento exponencial a pesar de las fluctuaciones debidas a las alzas bruscas de los precios del petróleo y los baches financieros. La tasa de crecimiento de los últimos veinticinco años arroja un promedio del 2,9 % anual, que representa un periodo de duplicación de 25 años. Sin embargo, la tasa de crecimiento per cápita ha sido más lento debido al crecimiento de la población: tan sólo un 1,3 % anual, con un periodo de duplicación de 55 años. (Fuentes: ONU; PRB.)

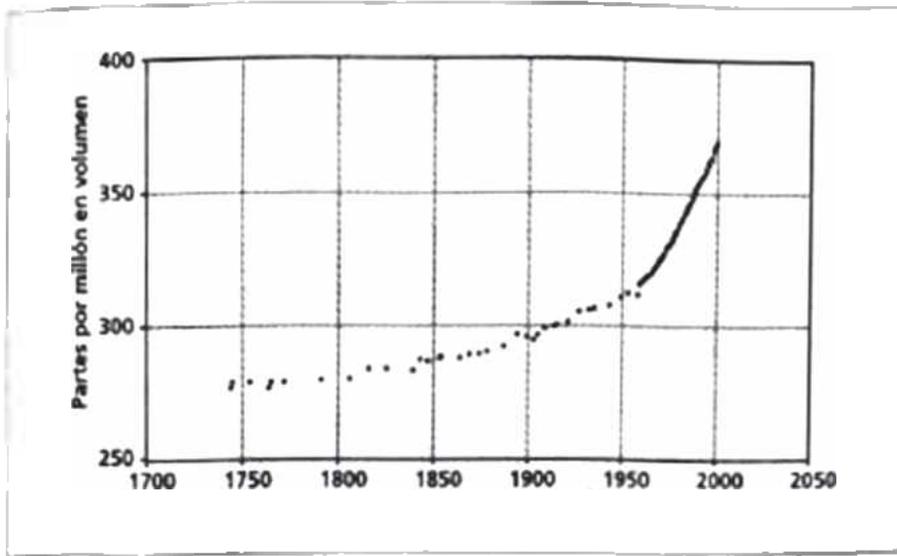


Figura 1-3 Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera

La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera ha aumentado de unas 270 partes por millón (ppm) a más de 370 ppm y mantiene su trayectoria ascendente. Las fuentes del aumento de la concentración de dióxido de carbono radican principalmente en la quema de combustibles fósiles y la destrucción de los bosques. La consecuencia es el cambio climático mundial. (Fuentes: PNUMA; DoE de EE. UU.)

los nexos entre los elementos del sistema población-economía. En el capítulo 2 se examinan estas causas estructurales del crecimiento y se describen sus implicaciones. En él mostraremos por qué el crecimiento es un comportamiento tan dominante del sistema mundial.

El crecimiento puede resolver algunos problemas, pero genera otros. Esto se debe a la existencia de límites, de los que trata el capítulo 3. El crecimiento de cualquier magnitud física, incluida la población humana, con sus automóviles, sus casas y sus fábricas, no puede continuar *ad eternum*. Pero los límites del crecimiento no limitan el número de personas, automóviles, casas o fábricas, al menos no directamente. Lo que limitan es el *caudal productivo*, es decir, los flujos conti-

CUADRO 1-1  
 CRECIMIENTO MUNDIAL DE ACTIVIDADES HUMANAS  
 Y PRODUCTOS SELECCIONADOS

	Variación		1975	Variación	
	1950	en 25 años		en 25 años	2000
Población mundial (millones)	2.520	160 %	4.077	150 %	6.067
Automóviles matriculados (millones)	70	470 %	328	220 %	723
Consumo anual de petróleo (millones de barriles)	3.800	540 %	20.512	130 %	27.635
Consumo anual de gas natural (billones de pies cúbicos)	6,5	680 %	44,4	210 %	94,5
Consumo anual de carbón (millones de toneladas métricas)	1.400	230 %	3.300	150 %	5.100
Capacidad de generación eléctrica (millones de kilovatios)	154	1.040 %	1.606	200 %	3.240
Producción anual de maíz (millones de toneladas métricas)	131	260 %	342	170 %	594
Producción anual de trigo (millones de toneladas métricas)	143	250 %	356	160 %	584

CUADRO 1-1 (cont.)  
 CRECIMIENTO MUNDIAL DE ACTIVIDADES HUMANAS  
 Y PRODUCTOS SELECCIONADOS

	1950	Variación en 25 años	1975	Variación en 25 años	2000
Producción anual de arroz (millones de toneladas métricas)	150	240 %	357	170 %	598
Producción anual de algodón (millones de toneladas métricas)	5,4	230 %	12	150 %	18
Producción anual de pulpa de papel (millones de toneladas métricas)	12	830 %	102	170 %	171
Producción anual de hierro (millones de toneladas métricas)	134	350 %	468	120 %	580
Producción anual de acero (millones de toneladas métricas)	185	350 %	651	120 %	788
Producción anual de aluminio (millones de toneladas métricas)	1,5	800 %	12	190 %	23

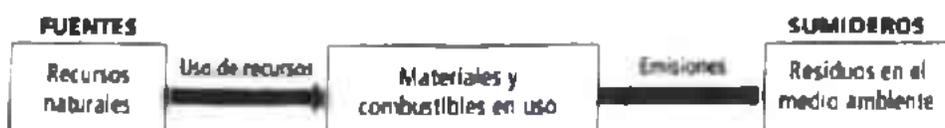
(Fuentes: PRB; American Automobile Manufacturers Association; Ward's Motor Vehicle Facts & Figures; DoE de EE.UU. ONU; FAO; CRB.)

nuos de material y energía que se precisan para mantener funcionando a la población, los automóviles, las casas y las fábricas. Limitan el ritmo al que la humanidad puede extraer recursos (cosechas, pastos, madera, pescado) y emitir residuos (gases de efecto invernadero, sustancias tóxicas) sin superar la capacidad de producción o de absorción del planeta.

La población y la economía dependen del aire, el agua, los alimentos, los materiales y los combustibles fósiles de la Tierra. Emiten residuos y contaminantes que retornan a la Tierra. Las fuentes incluyen yacimientos minerales, acuíferos y las reservas de nutrientes en el suelo; entre los sumideros está la atmósfera, los cuerpos acuáticos de superficie y los vertederos. Los límites físicos del crecimiento son límites de la capacidad de las *fuentes* del planeta para suministrar materiales y energía y de la capacidad de los *sumideros* del planeta para absorber la contaminación y los residuos.

En el capítulo 3 examinamos el estado de las fuentes y sumideros de la Tierra. Los datos que presentamos indican dos noticias que cabe destacar: una mala, y otra buena.

La mala noticia es que muchas fuentes cruciales se agotan o degradan y que muchos sumideros se llenan o desbordan. *Los flujos de caudal productivo generados actualmente por la economía humana no pueden mantenerse en sus niveles actuales durante mucho más tiempo.* Algunas fuentes y sumideros están tan explotados que ya empiezan a limitar el crecimiento, por ejemplo a través del aumento de los costes, de la contaminación y de la tasa de mortalidad.



La buena noticia es que *los altos niveles actuales del caudal productivo no son necesarios para sostener un nivel de vida digno de todos los habitantes del planeta*. La huella ecológica podría reducirse si disminuyera la población, se cambiaran las pautas de consumo o se emplearan tecnologías que permitieran un uso más eficiente de las fuentes. Estos cambios son posibles. La humanidad posee los conocimientos necesarios para mantener niveles suficientes de productos y servicios finales reduciendo en gran medida la carga sobre el planeta. En teoría existen muchas maneras posibles de rebajar la huella ecológica más acá de sus límites.

Pero la teoría no se convierte automáticamente en práctica. No se llevan a cabo los cambios y decisiones que permitirán reducir la huella ecológica, o al menos con la rapidez suficiente para reducir la carga creciente que soportan las fuentes y los sumideros. Y no se llevan a cabo porque no existe una presión inmediata para hacerlo y porque se necesita mucho tiempo para ponerlos en práctica. Éste es el tema del capítulo 4, donde examinamos las señales que advierten a la humanidad de los síntomas de la extralimitación y de la rapidez de respuesta de las personas e instituciones.

En el capítulo 4 volvemos a nuestro modelo informático, *World3*, que nos permite ensamblar numerosos datos y teorías, situando todos los elementos del cuadro –crecimiento, límites, tiempos de respuesta– en un conjunto explícito y coherente. Y nos proporciona un instrumento para proyectar las consecuencias futuras de nuestra comprensión actual. Así mostramos qué sucede cuando el ordenador simula cómo podría evolucionar el sistema, en el supuesto de que no haya cambios profundos ni esfuerzos extraordinarios, para ver qué se avecina, aclarar las señales o resolver los problemas antes de que se tornen críticos.

El resultado de estas simulaciones, en casi todas las proyecciones, es la extralimitación y el colapso de la economía y la población del planeta.

No obstante, no todas las proyecciones muestran un colapso. En el capítulo 5 hacemos mención del mejor ejemplo que conocemos de la capacidad humana para mirar hacia delante, percibir un límite y retroceder antes de experimentar el desastre. Describimos la respuesta internacional a los informes de la década de 1980 sobre el deterioro de la capa de ozono estratosférico. Este ejemplo es importante por dos razones: en primer lugar, es un contundente desmentido de la creencia omnipresente y cínica de que las personas, los gobiernos y las empresas nunca podrán cooperar para resolver los problemas globales que requieren previsión y autodisciplina; en segundo lugar, ilustra concretamente las tres características necesarias para que se produzca la extralimitación: crecimiento rápido, límites y respuesta desfasada (tanto en la ciencia como en la política).

La historia de la reducción del ozono estratosférico y la respuesta humana parece que ha tenido un final feliz —al menos por ahora—, pero su último capítulo no se escribirá hasta dentro de algunos decenios. De modo que también es un cuento con moraleja, una ilustración de lo complicado que puede ser dirigir a la compleja empresa humana hacia la sostenibilidad dentro de los sistemas imbricados del planeta sobre la base de una comprensión imperfecta, de señales que llegan con retraso y de un sistema marcado por una enorme inercia.

En el capítulo 6 utilizamos el ordenador para su finalidad primordial: no se trata de predecir lo que *ocurrirá* como resultado de las políticas que actualmente se llevan a cabo, sino de preguntar qué *podría* ocurrir si llevamos a cabo ciertos cambios. Integramos en el modelo World3 algunas hipótesis sobre el ingenio humano. Nos

centramos en dos mecanismos de resolución de problemas –tecnología y mercados– en los que numerosas personas han depositado mucha confianza. World3 ya contiene importantes características de esas dos notables capacidades de respuesta humanas, pero en el capítulo 6 las reforzamos. Exploramos qué ocurriría si la sociedad mundial comenzara a asignar seriamente sus recursos al control de la contaminación, la preservación del suelo, la salud humana, el reciclado de materiales y un fuerte aumento de la eficiencia del uso de los recursos.

Las proyecciones resultantes de World3 nos revelan que estas medidas son de gran ayuda, pero aun así insuficientes por sí solas. Se quedan cortas, porque las propias respuestas de la tecnología y los mercados están desfasadas y son imperfectas. Llevan su tiempo, exigen capital, requieren flujos de materiales y energía y pueden verse arrolladas por el crecimiento poblacional y económico. El progreso técnico y la flexibilidad del mercado serán factores necesarios para evitar el colapso y situar al mundo dentro de la sostenibilidad. Son necesarias, pero no suficientes. Necesitamos algo más. Éste es el tema del capítulo 7.

En el capítulo 7 utilizamos World3 para explorar qué sucedería si el mundo industrial complementara el ingenio con la sabiduría. Suponemos que el mundo adopta y empieza a actuar con respecto a dos definiciones de lo que se considera *suficiente*, una que tiene que ver con el consumo material y la otra con el tamaño de las familias. Estos cambios, combinados con las innovaciones técnicas contempladas en el capítulo 6, permiten llegar a una población mundial simulada sostenible de unos ocho mil millones de habitantes, que alcanzan un nivel de bienestar más o menos equivalente al de los países de renta baja de la Europa actual. Partiendo de supuestos razonables sobre la eficiencia de los merca-

dos y el progreso técnico, el planeta podría soportar indefinidamente los flujos de materiales y energía que requiere ese mundo simulado. En dicho capítulo mostramos que la extralimitación puede facilitar el retorno a la sostenibilidad.

La sostenibilidad es un concepto tan ajeno a nuestra actual cultura obsesionada con el crecimiento que en el capítulo 7 nos explayamos un poco en definirlo y en describir a grandes rasgos cómo podría ser un mundo sostenible, y cómo *no* tendría que ser. No vemos motivo alguno por el cual un mundo sostenible tenga que condenar a todos a vivir en la pobreza. Al contrario, pensamos que ese mundo tendría que proporcionar seguridad material a todos sus habitantes. No creemos que una sociedad sostenible tenga que estar estancada y ser aburrida, uniforme o rígida. No tendría que estar por fuerza —y probablemente no podría estarlo— sometida a un control centralizado o ser autoritaria. Podría ser un mundo que tendría tiempo, recursos y voluntad de corregir sus errores, innovar y preservar la fertilidad de sus ecosistemas planetarios. Podría centrarse en el incremento razonable de la calidad de vida en vez de la expansión irracional del consumo material y de las existencias de capital físico.

El capítulo 8, donde se exponen las conclusiones, se deriva más de nuestros modelos mentales que de los datos o de un modelo informático. Refleja los resultados de nuestros intentos personales de comprender qué hay que hacer ahora. Nuestro modelo planetario, World3, da pie tanto al pesimismo como al optimismo con respecto al futuro. Y en esta cuestión los autores discrepan. Dennis y Jorgen han llegado a la conclusión de que actualmente es inevitable un declive de la calidad de vida media y de que incluso es probable que la población y la economía mundiales están abocadas al des-

censo. Donella creyó durante toda su vida que la humanidad sería capaz de desarrollar los conocimientos, las instituciones y la ética necesarias para instaurar una sociedad sostenible atractiva. Pero pese a nuestras diferencias, todos estábamos de acuerdo en el modo de enfocar la respuesta al desafío planteado, y esto se explica en el capítulo 8.

La primera parte del capítulo final expone las medidas prioritarias que permitirían reducir los daños infligidos al planeta y la sociedad. La segunda parte describe cinco instrumentos que pueden ayudar a la sociedad mundial a avanzar hacia un estado sostenible.

Pase lo que pase en el futuro, sabemos que las principales dimensiones de lo que ocurrirá se harán visibles en los próximos dos decenios. La economía mundial ya ha rebasado tanto los niveles sostenibles que la fantasía de un globo infinito tiene los días contados. Sabemos que el ajuste será una tarea ingente, que comportará una revolución tan profunda como la revolución agrícola e industrial. Calibramos la dificultad de encontrar soluciones a problemas como el de la pobreza y el empleo, para los que el crecimiento ha sido hasta ahora la única esperanza que goza de amplia aceptación. Pero sabemos también que confiar en el crecimiento encierra falsas expectativas, pues ese crecimiento no se sostiene. A fin de cuentas, la búsqueda ciega del crecimiento físico en un mundo finito agrava la mayoría de los problemas; son posibles soluciones mejores a nuestros problemas reales.

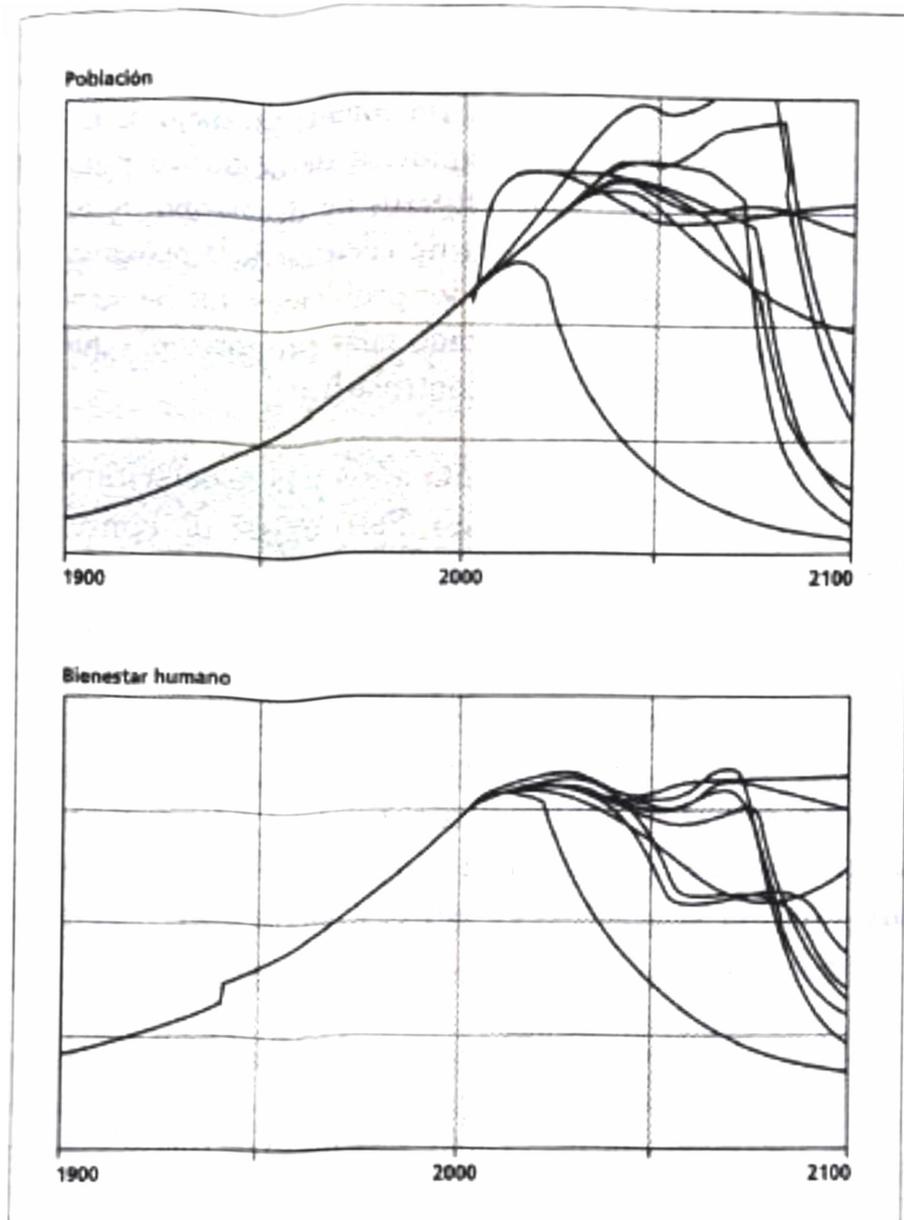
Buena parte de lo que escribimos en *Los límites del crecimiento* hace treinta años sigue siendo cierto. Pero la ciencia y la sociedad han evolucionado en los últimos tres decenios. Todos nosotros hemos aprendido mucho y adquirido nuevas perspectivas. Los datos, el ordenador y nuestra propia experiencia nos indican que las

posibles vías que conducen al futuro se han estrechado desde que abordamos por primera vez los límites del crecimiento en 1972. Determinados niveles de riqueza que podríamos haber aportado a todos los habitantes del globo ya no son viables; ecosistemas que podríamos haber preservado se han extinguido; recursos que podrían haber asegurado el bienestar de futuras generaciones se han agotado. Pero todavía existen muchas opciones disponibles, y éstas son cruciales. La figura 1-4 ilustra el amplísimo abanico de posibilidades que creemos que aún existen. El gráfico se deriva de la superposición de las curvas de evolución de la población humana y del bienestar humano generados por las nueve proyecciones informáticas que presentamos más adelante en este libro<sup>3</sup>.

El conjunto de futuros posibles abarca una gran variedad de trayectorias. Puede haber un colapso súbito; también es posible que haya una transición suave a la sostenibilidad. Pero los futuros posibles no incluyen un crecimiento indefinido del caudal de producción físico. Esta opción no es posible en un planeta finito. Las únicas opciones reales consisten en rebajar los caudales productivos que sostienen las actividades humanas a niveles sostenibles mediante una decisión consciente, tecnología y organización humanas, o en dejar que la naturaleza fuerce la decisión a través de la escasez de alimentos, de energía o de materiales, o bien mediante un deterioro creciente del medio ambiente.

En 1972 encabezamos *Los límites del crecimiento* con una cita de U. Thant, el entonces secretario general de las Naciones Unidas:

No pretendo parecer excesivamente dramático, pero sólo puedo concluir, a partir de la información de que dispongo como secretario general, que los miembros de las Na-



*Figura 1-4 Proyecciones alternativas de la población mundial y del bienestar humano*

Esta figura superpone todas las proyecciones relevantes de World3 que aparecen en este libro para ilustrar la amplitud del abanico de posibles trayectorias de dos importantes variables: la población y el bienestar humano medio (medido sobre la base de un índice que combina la renta per cápita con otros indicadores del bienestar). La mayoría de las proyecciones muestran un declive, pero algunas reflejan una sociedad que consigue estabilizar la población y un alto bienestar humano sostenible.

ciones Unidas disponen quizá de sólo diez años para dejar de lado sus viejas rencillas y crear una asociación global para reducir la carrera armamentista, mejorar el medio ambiente, frenar la explosión demográfica y dar el necesario empuje a los esfuerzos de desarrollo. Si no se forja una asociación de este tipo dentro de la próxima década, mucho me temo que los problemas que he mencionado puedan haber alcanzado tales proporciones que ya no esté a nuestro alcance controlarlos<sup>4</sup>.

Han pasado más de treinta años y la asociación global todavía no está a la vista. Pero existe un consenso creciente de que la humanidad está inmersa en problemas que escapan a su control. Y gran parte de la información disponible así como nuevos estudios corroboran la advertencia del secretario general.

Por ejemplo, las preocupaciones de U. Thant encontraron eco en un informe de 1992, «Advertencia de científicos del mundo a la humanidad», suscrito por más de mil seiscientos científicos, entre ellos 102 premios Nobel, de 70 países:

Los seres humanos y el mundo natural siguen una trayectoria que conduce a la colisión. Las actividades humanas menoscaban violentamente y a menudo de modo irreversible el medio ambiente y recursos cruciales. Si no se revisan, muchas de las prácticas actuales ponen gravemente en peligro el futuro que deseamos para la sociedad humana y los reinos vegetal y animal y puede que alteren el mundo vivo hasta el punto de que ya no sea capaz de sostener la vida del modo que conocemos. Urgen cambios fundamentales si queremos evitar la colisión a que conduce nuestro rumbo actual<sup>5</sup>.

La advertencia fue reafirmada incluso por un informe de 2001 elaborado en el seno del Banco Mundial:

[...] se ha alcanzado un ritmo alarmante de degradación ambiental y en algunos casos incluso se acelera. [...] En todo el mundo desarrollado, los problemas ambientales imponen fuertes costes humanos, económicos y sociales y amenazan los cimientos de que depende el crecimiento y, en última instancia, la supervivencia<sup>6</sup>.

¿Tenía razón U. Thant? ¿Se hallan ya los problemas actuales fuera de toda capacidad de control? ¿O acaso se precipitó y podríamos calificar de correcta la declaración confidencial de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo de 1987?

La humanidad tiene la capacidad de hacer sostenible el desarrollo: asegurar que hace frente a las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para hacer frente a sus propias necesidades<sup>7</sup>.

Nadie puede contestar a estas preguntas por el lector con absoluta certeza. Pero urge que cada uno desarrolle respuestas meditadas a las mismas. Esas respuestas son necesarias para interpretar los acontecimientos en curso y guiar las medidas y opciones personales cotidianas.

Invitamos al lector a acompañarnos a través del siguiente examen de los datos, análisis y conocimientos que hemos acumulado durante los últimos treinta años. Entonces tendrá una base para extraer sus propias conclusiones sobre el abanico de futuros del mundo así como para tomar las decisiones que puedan guiar su propia vida.

## CAPÍTULO 2

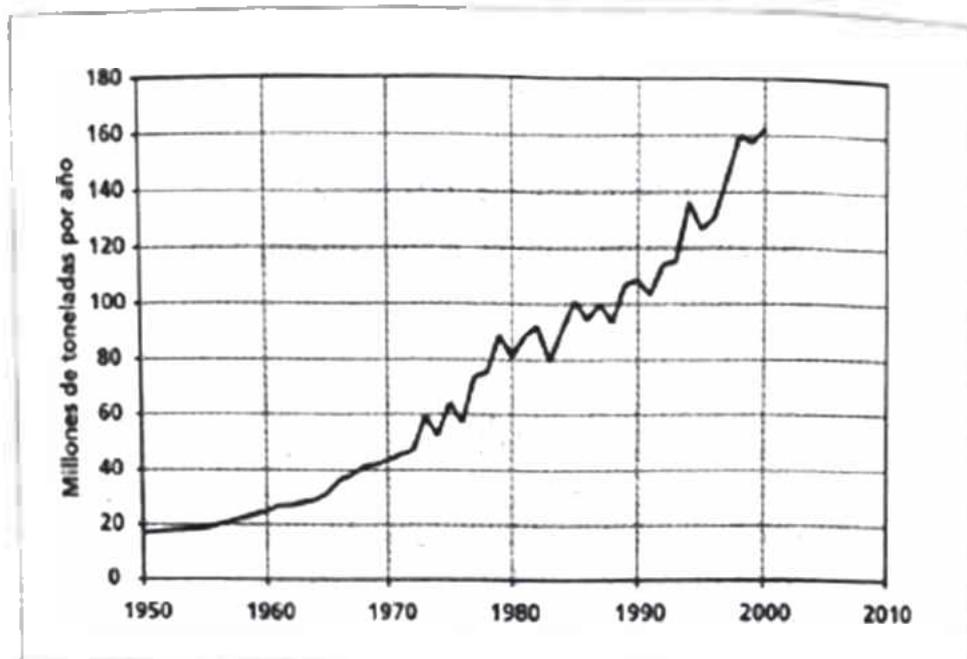
La fuerza motriz:  
el crecimiento exponencial

He descubierto con gran horror que no he sido inmune a la ingenuidad acerca de las funciones exponenciales. [...] Aunque he sido consciente de que los problemas interrelacionados de pérdida de biodiversidad biológica, deforestación tropical, retroceso de los bosques en el hemisferio norte y cambio climático crecen exponencialmente, creo que hasta este año no he comprendido realmente con qué rapidez acelerada se cierne su amenaza sobre nosotros.

THOMAS E. LOVEJOY, 1988

La primera causa de la extralimitación es el crecimiento, la aceleración, el cambio rápido. Durante más de un siglo, muchas características físicas del sistema mundial han crecido a gran velocidad. Por ejemplo, la población, la producción de alimentos, la producción industrial, el consumo de recursos y la contaminación no dejan de crecer, en muchos casos de forma cada vez más rápida. Su aumento sigue una pauta que los matemáticos denominan *crecimiento exponencial*.

Esta pauta es muy común. Las figuras 2-1 y 2-2 ilustran dos ejemplos muy distintos: el número de toneladas de haba de soja producidas cada año y el número de personas de las regiones menos desarrolladas que viven en zonas urbanas. Unas condiciones climáticas extremas, los vaivenes de la economía, los cambios tecnológicos, las epidemias o las convulsiones civiles pueden imprimir pequeñas oscilaciones a las curvas



*Figura 2-1 Producción mundial de haba de soja*

La producción mundial de haba de soja crece desde 1950 con un período de duplicación de 16 años. (Fuentes: Worldwatch Institute; FAO.)

regulares, pero en su conjunto el crecimiento exponencial ha sido un comportamiento dominante del sistema socioeconómico humano desde la Revolución Industrial.

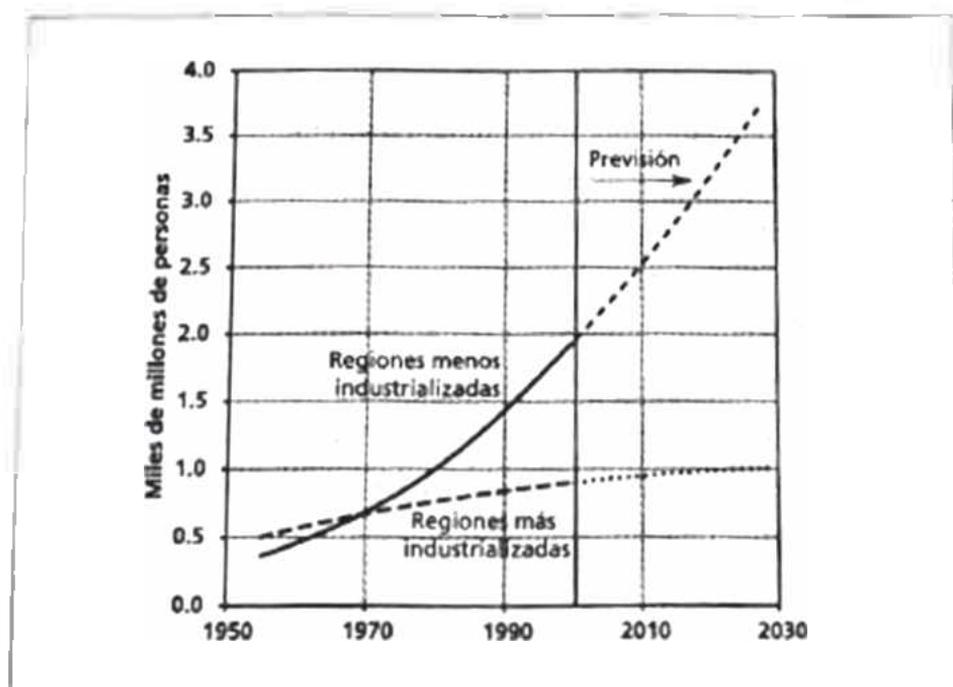
Este tipo de crecimiento tiene rasgos sorprendentes que dificultan mucho su control. Por ello, antes de analizar las opciones a largo plazo, definiremos la noción del crecimiento exponencial, describiendo sus causas y examinando los factores que gobiernan su trayectoria. El crecimiento físico en un planeta finito tiene por fuerza que llegar alguna vez a su fin. Pero la pregunta es: ¿cuándo? ¿Qué fuerzas provocarán su declive? ¿En qué condiciones quedarán la humanidad y el ecosistema mundial una vez haya cesado? Para responder a estas preguntas es necesario comprender la estructura del sistema que hace que la población y la economía humanas tiendan constantemente a crecer. Este sistema se halla

en el núcleo del modelo World3 y a nuestro juicio es un rasgo definitorio de la sociedad global.

## Las matemáticas del crecimiento exponencial

Tome un trozo de tela y dóblelo por la mitad. No ha hecho más de doblar su grosor. Dóblelo de nuevo por la mitad para que sea cuatro veces más grueso. Dóblelo otra vez, y después una cuarta vez. Ahora su grosor es 16 veces mayor que el que tenía al principio, es decir, más o menos un centímetro.

Si pudiéramos seguir doblando el trozo de tela de esta manera otras 29 veces, con lo que lo habríamos he-



*Figura 2-2 Población urbana mundial*

Durante el último medio siglo, la población urbana ha crecido exponencialmente en las regiones menos industrializadas del mundo, pero casi linealmente en las regiones más industrializadas. El periodo de duplicación medio de las poblaciones urbanas en las regiones menos industrializadas era de 19 años. Se prevé que esta tendencia continúe durante varios decenios. (Fuente: ONU.)

cho 33 veces en total, ¿qué grosor cree que tendrá? ¿Menos de un palmo? ¿Entre uno y diez palmos? ¿Entre 10 palmos y 1 kilómetro?

Claro que no es posible doblar un trozo de tela por la mitad 33 veces. Pero si pudiéramos, el trozo de tela sería tan grueso que alcanzaría desde Boston hasta Francfort, o sea, unos 5.400 kilómetros<sup>1</sup>.

El crecimiento exponencial —el proceso de doblar y volver a doblar y así una y otra vez— es sorprendente, porque produce magnitudes gigantescas de forma muy rápida. Las magnitudes que crecen exponencialmente pueden llevarnos a engaño porque la mayoría de nosotros concebimos el crecimiento como un proceso lineal. Una magnitud crece *linealmente* cuando *su incremento es una magnitud constante durante un período determinado*. Si una cuadrilla de trabajadores construye 1 kilómetro de carretera cada semana, la vía crece linealmente. Si un niño mete cada año siete dólares en su hucha, el ahorro crece linealmente. La cantidad de asfalto añadido no depende de la longitud de la carretera ya construida, y el importe del ahorro anual no está influido por el dinero que ya está en la hucha. Cuando un factor experimenta un crecimiento lineal, *el importe de su incremento siempre es el mismo en un determinado espacio de tiempo*; no depende de la cantidad previamente acumulada del factor.

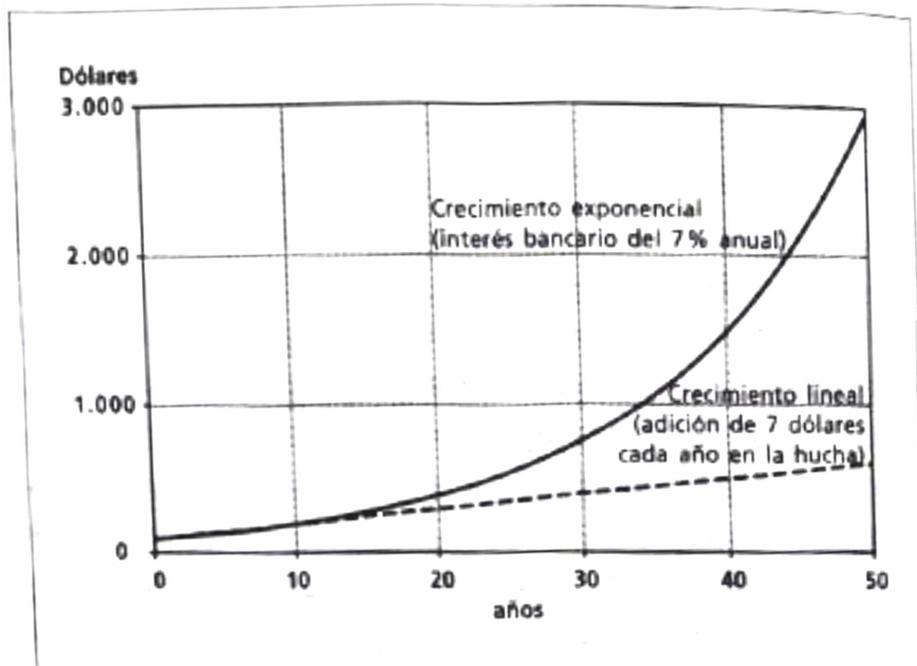
Una magnitud crece *exponencialmente* cuando *su incremento es proporcional a la cantidad preexistente*. Una colonia de células de levadura en la que cada célula se divide en dos cada 10 minutos crece exponencialmente. Por cada célula existente, al cabo de 10 minutos habrá dos. Transcurridos otros diez minutos, habrá 4, 10 minutos después habrá 8, luego 16 y así sucesivamente. Cuantas más células de levadura existan, tanto más se generarán nuevas por unidad de tiempo. Una

empresa que logra incrementar sus ventas en cierto porcentaje un año tras otro crecerá exponencialmente. *Cuando un factor experimenta un crecimiento exponencial, la magnitud del aumento crecerá de un periodo a otro; depende de la cantidad previamente acumulada del factor en cuestión.*

Para ilustrar la enorme diferencia que existe entre el crecimiento lineal y el exponencial, pensemos en dos maneras de incrementar la suma de 100 dólares: uno puede depositar el dinero en una cuenta bancaria para acumular intereses o meterlo en una hucha para añadir un importe fijo cada año. Si colocamos un único depósito de 100 dólares en un banco que da un 7 % de interés anual, compuesto anualmente, y acumula el interés devengado en la misma cuenta, el dinero invertido crecerá exponencialmente. Cada año se añadirá un importe al dinero que ya hay en la cuenta. La proporción que se añade es constante, del 7 %, pero el importe absoluto añadido aumentará. Dicho importe es de 7 dólares al término del primer año. El interés del segundo año será del 7 % de 107 dólares, es decir, 7,49 dólares, sumando un total de 114,49 dólares al comienzo del tercer año. Un año después, el interés será de 8,01 dólares y el total de 122,50 dólares. Al cabo de diez años, la cuenta habrá aumentado a 196,72 dólares.

Si uno mete los 100 dólares en una hucha y añade cada año 7 dólares, la cantidad de dinero crecerá linealmente. Al final del primer año, en la hucha habrá también 107 dólares, al igual que en la cuenta bancaria. Al término del décimo año, la hucha contendrá 170 dólares, menos que el dinero que habrá en la cuenta bancaria, aunque no mucho menos.

Al principio, ambas estrategias de ahorro parecen generar resultados muy similares, pero el efecto explosivo de la acumulación exponencial sostenida salta fi-



**Figura 2-3 Aumento lineal y exponencial del ahorro**

Si una persona mete 100 dólares en una hucha y añade cada año 7 dólares, el ahorro crecerá linealmente, como muestra la línea discontinua. Si en cambio invierte los 100 dólares en un banco a cambio de un 7 % de interés anual, esos 100 dólares crecerán exponencialmente, con un período de duplicación de unos diez años.

nalmente a la vista (figura 2-3). Al término del vigésimo año, en la hucha habrá 240 dólares, mientras que el importe de la cuenta bancaria será de casi 400. Pasados treinta años, el aumento lineal del ahorro en la hucha habrá alcanzado 310 dólares. La cuenta bancaria, con un interés anual del 7 %, arrojará un saldo de poco más de 761 dólares. Así que en treinta años el crecimiento exponencial del 7 % anual produce dos veces más que el crecimiento lineal, por mucho que en ambos casos se partiera de la misma cantidad depositada. Transcurridos cincuenta años, en la cuenta bancaria hay 6,5 veces más dinero que en la hucha, casi 2.500 dólares más.

Las consecuencias inesperadas del crecimiento exponencial han fascinado a las personas durante siglos.

Una leyenda persa cuenta que un avezado cortesano regaló al rey un bello tablero de ajedrez y le pidió que a cambio le diera un grano de arroz por el primer cuadro del tablero, dos granos por el segundo, cuatro por el tercero, y así sucesivamente.

El rey accedió y ordenó que trajeran arroz de su almacén. Por el cuarto cuadro del tablero de ajedrez tuvo que entregar 8 granos, por el décimo ya eran 512 granos, por el decimoquinto 16.384, y el vigésimo primer cuadro le reportó al cortesano más de un millón de granos de arroz. Para el cuadragésimo primer cuadro había que entregar un billón ( $10^{12}$ ) de granos. La contrapartida nunca podría haberse satisfecho porque para llegar al último cuadro habría hecho falta más arroz que el que había en todo el mundo.

Un acertijo francés ilustra otro aspecto del crecimiento exponencial: la forma en apariencia repentina en que una cantidad que crece exponencialmente se aproxima a un límite fijo. Una persona tiene un estanque y un día observa que en el mismo ha salido un nenúfar. Sabe que el nenúfar doblará su tamaño cada día y calcula que si deja crecer la planta sin vigilar, ésta cubrirá totalmente el estanque al cabo de 30 días, ahogando las demás formas de vida que hay en el agua. Pero al comienzo el nenúfar parece pequeño, así que el propietario del estanque decide no preocuparse, para intervenir sólo cuando la planta cubra la mitad del estanque. ¿Cuánto tiempo se ha dado para evitar la destrucción del estanque?

¡Nada más que un día! Al cabo de 29 días, el estanque está medio cubierto por el nenúfar, pero al día siguiente —después de la última duplicación— estará completamente tapado. Al principio parece razonable posponer toda intervención hasta que el estanque esté medio cubierto. A los 21 días, la planta apenas cubre

el 0,2 % del estanque. A los 25 días, cubre poco más del 3 %. De modo que la decisión de esperar no deja más que un día para salvar el estanque<sup>2</sup>.

Podemos ver, entonces, cómo el crecimiento exponencial, combinado con respuestas retrasadas, puede conducir a la extralimitación. Durante mucho tiempo, el crecimiento parece insignificante y a simple vista no hay problema. Entonces, de repente, el cambio se vuelve más y más rápido hasta que, con las últimas duplicaciones, ya no queda tiempo para reaccionar. La crisis evidente del último día del estanque del nenúfar no se debe a ningún cambio del proceso subyacente; la tasa de crecimiento porcentual del nenúfar se mantiene perfectamente constante a lo largo de todo el mes. Sin embargo, este crecimiento exponencial se acumula de pronto para crear un problema que resulta incontrolable.

Cualquiera puede experimentar por sí mismo este súbito paso de la insignificancia a la sobrecarga. Imaginemos que nos proponemos comer un cacahuete el primer día del mes, dos el segundo, cuatro el tercero y así sucesivamente. Al comienzo, compraremos y comemos una cantidad insignificante de cacahuetes. Pero mucho antes de finales de mes se verían afectadas tanto nuestra cuenta bancaria como nuestra salud. ¿Durante cuánto tiempo podría uno proseguir con este crecimiento exponencial de la ingesta de alimentos con un período de duplicación de un día? El décimo día del mes tendría que consumir menos de un cuarto de kilo de cacahuetes, pero el último día del mes esta práctica de doblar el consumo cada día que pasa le obligaría a comprar y comer más de 500 toneladas de cacahuetes.

El experimento de los cacahuetes no causaría ningún daño grave porque un día simplemente contemplaríamos el montón de cacahuetes y abandonaríamos. En este ejemplo no se producen desfases significativos en-

tre el momento en que se emprende una actividad y se sienten de lleno sus consecuencias.

Una magnitud que crece con arreglo a una ecuación puramente exponencial se duplica en un período constante. En el caso de la colonia de levadura, el período de duplicación era de 10 minutos. El dinero depositado en el banco a un 7 % de interés se duplica más o menos cada diez años. En el caso del nenúfar y en el experimento de los cacahuets, el período de duplicación es exactamente de un día. Existe una relación simple entre la tasa de crecimiento en términos porcentuales y el tiempo que tardará una magnitud en duplicarse. El período de duplicación es aproximadamente igual a 72 dividido entre la tasa de crecimiento porcentual<sup>1</sup>. Esto queda ilustrado en el cuadro 2-1:

CUADRO 2-1  
PERÍODOS DE DUPLICACIÓN

<i>Tasa de crecimiento (% anual)</i>	<i>Períodos de duplicación aproximados (años)</i>
0,1	720
0,5	144
1,0	72
2,0	36
3,0	24
4,0	18
5,0	14
6,0	12
7,0	10
10,0	7

Podemos citar el ejemplo de Nigeria para ilustrar las consecuencias de la duplicación sostenida. En 1950, este país tenía una población de unos 36 millones. En el año 2000, esta población ya había aumentado a

unos 125 millones. A lo largo de la segunda mitad del siglo xx, la población de Nigeria aumentó casi al cuadruplo. En el año 2000 la tasa de crecimiento oficial era del 2,5 % anual<sup>4</sup>. El período de duplicación correspondiente era de aproximadamente 72 dividido entre 2,5 o alrededor de 29 años. Si esta tasa de crecimiento demográfico se mantuviera igual en el futuro, la población nigeriana seguiría una trayectoria como la del cuadro 2-2.

Una niña nigeriana nacida en el año 2000 se sumó a una población cuatro veces más numerosa que la que tenía Nigeria en 1950. Si el crecimiento del país se mantiene constante más allá del año 2000, y esta niña vive 87 años, verá cómo la población se multiplicará *ocho veces*. Hacia finales del siglo XXI habría 8 nigerianos por cada uno que vivía en 2000, y 28 por cada uno que vivía en 1950. ¡Nigeria tendría entonces más de mil millones de habitantes!

CUADRO 2-2  
CRECIMIENTO EXTRAPOLADO DE LA POBLACIÓN  
/ DE NIGERIA

Año	Población (millones de habitantes)
2000	125
2029	250
2058	500
2087	1.000

Nigeria ya es uno de los numerosos países que sufren hambre y deterioro ambiental. Está claro que su población no puede seguir multiplicándose otra vez por ocho. El único motivo para hacer un cálculo como el del cuadro 2-2 es ilustrar el álgebra de los períodos de

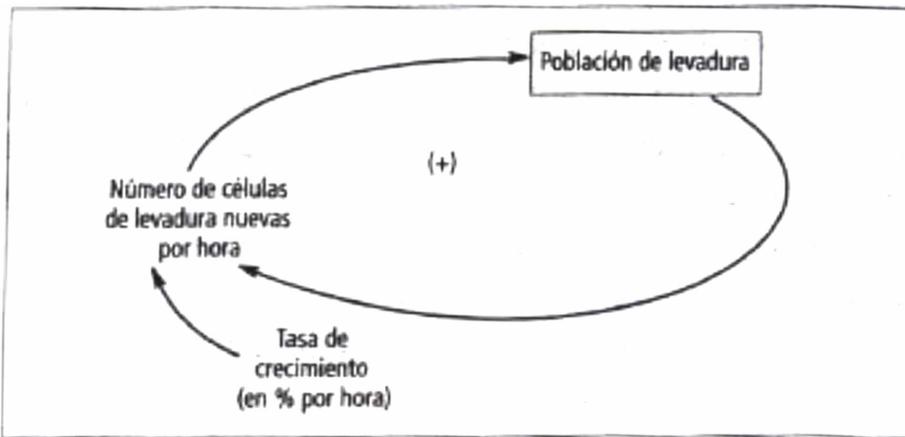
duplicación y demostrar que *el crecimiento exponencial nunca puede perdurar mucho en un espacio finito con recursos finitos.*

¿Por qué, entonces, prosigue este crecimiento en el mundo actual? ¿Y qué puede pararlo?

## Magnitudes que crecen exponencialmente

El crecimiento exponencial se produce de dos maneras distintas. Si una entidad se autorreproduce, lleva inherente su crecimiento exponencial. Si una entidad es impulsada por algo que crece exponencialmente, su crecimiento es derivado.

Todos los seres vivos, desde las bacterias hasta las personas, forman parte de la primera categoría. Las criaturas son fruto de criaturas. Ilustramos la estructura sistémica de una población que se autorreproduce con un diagrama como éste:



*Ciclo de realimentación del crecimiento de la población de levadura*

El formato del diagrama anterior es propio de nuestra disciplina, la dinámica de sistemas, y es bastante preciso. El recuadro que enmarca la población de levadura

indica que se trata de *existencias* —una acumulación, el resultado neto de todos los procesos anteriores por los que crece y decrece la levadura. Las flechas indican una causa o influencia, que pueden ejercerse de muchas maneras. En este diagrama, la flecha superior representa la influencia de los flujos físicos y significa que las nuevas células de levadura se incorporan a las existencias e incrementan la población de levadura. La flecha inferior representa la influencia de la información; significa que el volumen de las existencias afecta a la producción de nueva levadura. Cuanto mayores sean las existencias, tantas más células nuevas pueden producirse mientras no ocurra nada que altere la tasa de crecimiento. (Hay factores que modifican la tasa de crecimiento, por supuesto. Para simplificar se han omitido de este diagrama, pero volveremos sobre ello más adelante.)

El signo (+) en el centro del ciclo quiere decir que las dos flechas conjuntamente generan un *ciclo de realimentación positivo* o *de refuerzo*. Un ciclo de realimentación positivo es una cadena de relaciones de causa y efecto cerrada en sí misma que genera un cambio que se autorrefuerza. Opera de tal manera que un cambio de cualquier elemento de cualquier parte del ciclo tendrá consecuencias que repercuten en cascada a lo largo de la cadena, variando finalmente todavía más el elemento original en el mismo sentido. Un aumento causará nuevos incrementos; una disminución dará lugar finalmente a un nuevo decrecimiento.

En la dinámica de sistemas, la noción de *ciclo positivo* no significa necesariamente que el ciclo genere resultados favorables. Simplemente refleja el sentido *de refuerzo* de la influencia causal a lo largo del ciclo. De modo similar, los ciclos de realimentación negativos, que seguidamente comentaremos más a fondo, no producen por fuerza resultados desfavorables. De hecho, a

menudo tienen un efecto estabilizador. Son negativos en el sentido de que *contrarrestan* o *invierten* o *equilibran* la influencia causal a lo largo del ciclo.

Un ciclo de realimentación positivo puede funcionar como un «círculo virtuoso» o un «círculo vicioso», en función de si el crecimiento que genera es deseado o no. La realimentación positiva da lugar al crecimiento exponencial de la levadura que hace fermentar el pan y del dinero de la cuenta bancaria que devenga intereses. Son resultados provechosos. La realimentación positiva también puede ser responsable de la propagación de plagas en una plantación o del crecimiento de un virus del resfriado en nuestra garganta. Estos efectos no son provechosos.

Siempre que las existencias del sistema estén insertas en un ciclo de realimentación positivo, estas existencias tienen el *potencial* de crecer exponencialmente. Esto no significa que *tendrán* que crecer de modo exponencial, pero sí que tienen la *capacidad* para hacerlo si se liberan de los impedimentos. El crecimiento puede verse constreñido por muchos factores, como la falta de nutrientes (en el caso de la levadura), bajas temperaturas y la presencia de otras poblaciones (en el caso de las plagas) y, en el caso de la población humana, por incentivos, factores disuasorios, objetivos, propósitos, catástrofes, enfermedades, deseos. La tasa de crecimiento cambiará con el tiempo y variará de un lugar a otro. Pero el crecimiento de la levadura, la plaga o la población, cuando no está limitado por un impedimento, se produce exponencialmente.

Las existencias de *capital industrial* son otro elemento que puede experimentar un crecimiento exponencial intrínseco. Las máquinas y fábricas pueden crear colectivamente otras máquinas y fábricas. Una acería puede producir el acero necesario para construir otra acería;

una fábrica de tornillos y tuercas puede suministrar tornillos y tuercas para ensamblar máquinas que fabrican tornillos y tuercas; todo negocio que genera beneficios aporta dinero para invertir en la expansión del negocio. Tanto el capital físico como el monetario permiten generar más capital del modo autorreproductivo y orientado al crecimiento propio de la economía industrial.

No es casual que el mundo industrial prevea que una economía crecerá por sí misma en cierta proporción —digamos que un 3 %— cada año. Esta expectativa es fruto de varios siglos de experiencia en que el capital ha creado más capital. Es una costumbre inveterada ahorrar e invertir en el futuro, apartar cierta fracción de la producción total con el propósito de invertirlo para generar todavía más producción en el futuro. Una economía crecerá exponencialmente siempre que la autorreproducción del capital no se vea constreñida por la demanda de los consumidores y la disponibilidad de mano de obra, materias primas, energía, fondos de inversión o cualquier otro factor susceptible de limitar el crecimiento de un sistema industrial complejo. Al igual que la población, el capital tiene la *estructura* sistémica inherente (un ciclo de realimentación positivo) para generar el *comportamiento* del crecimiento exponencial. Las economías no siempre crecen, por supuesto, como tampoco las poblaciones. Pero están estructuradas para crecer, y cuando lo hacen, crecen exponencialmente.

Hay muchos otros factores en nuestra sociedad que pueden ser propensos al crecimiento exponencial. La violencia puede ser intrínsecamente exponencial y la corrupción parece autoalimentarse. El cambio climático también comporta varios factores de realimentación positiva. Por ejemplo, la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera ocasiona un aumento de la temperatura, que a su vez acelera la fusión de la tundra

ártica. A medida que se descongela la tundra, libera el metano atrapado en ella. El metano es un potente gas de efecto invernadero que puede facultar a que aumente todavía más la temperatura del planeta. En World3 se han incluido explícitamente varias realimentaciones positivas. Hemos modelado las fuerzas que influyen en la fertilidad del suelo. Son varias las tecnologías que parecen crecer exponencialmente, y de hecho experimentamos con ellas en el capítulo 7. Sin embargo, creemos que los procesos de crecimiento que rigen el comportamiento de la población y la industria han sido las principales fuerzas motrices que han empujado a la sociedad mundial fuera de sus límites, y nos centraremos en ellos.

La población y el capital productivo son los motores del crecimiento exponencial en la sociedad humana. Otras magnitudes, como la producción de alimentos, el consumo de recursos y la contaminación, tienden a crecer exponencialmente, pero no porque se automultipliquen, sino porque *son impulsadas* por la población y el capital. Ninguna autogeneración, ningún ciclo de realimentación positivo hace que los plaguicidas presentes en las aguas freáticas generen más plaguicidas, ni que el carbón se reproduzca en el subsuelo y genere más carbón. Las consecuencias físicas y biológicas del cultivo de 6 toneladas de trigo por hectárea no facilitan el cultivo de 12 toneladas por hectárea. Llega un punto —cuando se alcanza un límite— en que la duplicación de la cantidad de alimentos cosechados o minerales extraídos no resulta más fácil, sino más difícil que la duplicación anterior.

Por tanto, en la medida en que la producción de alimentos y el consumo de materiales y energía han crecido exponencialmente (como en efecto ha sucedido), no lo han hecho por su propia capacidad estructural, sino porque el crecimiento exponencial de la población y la economía han demandado más alimentos y materiales

y energía y se ha conseguido producirlos. Del mismo modo, la contaminación y el volumen de residuos no han crecido porque tengan su propia estructura de realimentación positiva, sino debido a las crecientes cantidades de materiales que circulan y de energía que se consume en la economía humana.

Un supuesto central del modelo de World3 es que la población y el capital son estructuralmente capaces de crecer de un modo exponencial. No es un supuesto arbitrario, sino que se apoya en las características observables del sistema socioeconómico global y en las pautas de cambio históricas. El crecimiento demográfico y económico comporta un aumento de la huella ecológica humana a menos o hasta que cambien en profundidad las preferencias de consumo y mejore sustancialmente la eficiencia del consumo de recursos. Ninguno de estos cambios o mejoras se ha producido todavía. La población humana, los bienes de capital y los flujos de energía y materiales que los sustentan han crecido exponencialmente durante al menos un siglo, aunque no con regularidad, no de forma simple y no sin fuertes repercusiones de otros ciclos de realimentación. El mundo es más complejo que esto. También lo es el modelo World3, como veremos.

### Crecimiento de la población mundial

En el año 1650, la población humana se cifraba en unos 500 millones de habitantes. Crecía al ritmo de aproximadamente un 0,3 % anual, con un período de duplicación de casi 240 años.

En 1900, la población había alcanzado los 1.600 millones y crecía entre un 0,7 y un 0,8 % anual, con un período de duplicación de alrededor de 100 años.

En 1965, la población sumaba 3.300 millones. La tasa de crecimiento había ascendido al 2 % anual, siendo entonces el período de duplicación de unos 36 años. Por tanto, la población no sólo crecía exponencialmente desde 1650, sino de hecho *superexponencialmente*, ya que incluso crecía la propia tasa de crecimiento. Aumentaba por una buena razón: el descenso de la tasa de mortalidad. También disminuía la tasa de natalidad, pero más lentamente, razón por la cual se disparó el crecimiento demográfico.

Después de 1965, la tasa de mortalidad siguió descendiendo, pero la tasa de natalidad caía en promedio todavía más rápidamente (figura 2-4). Mientras que la población total ascendió de 3.300 millones a cerca

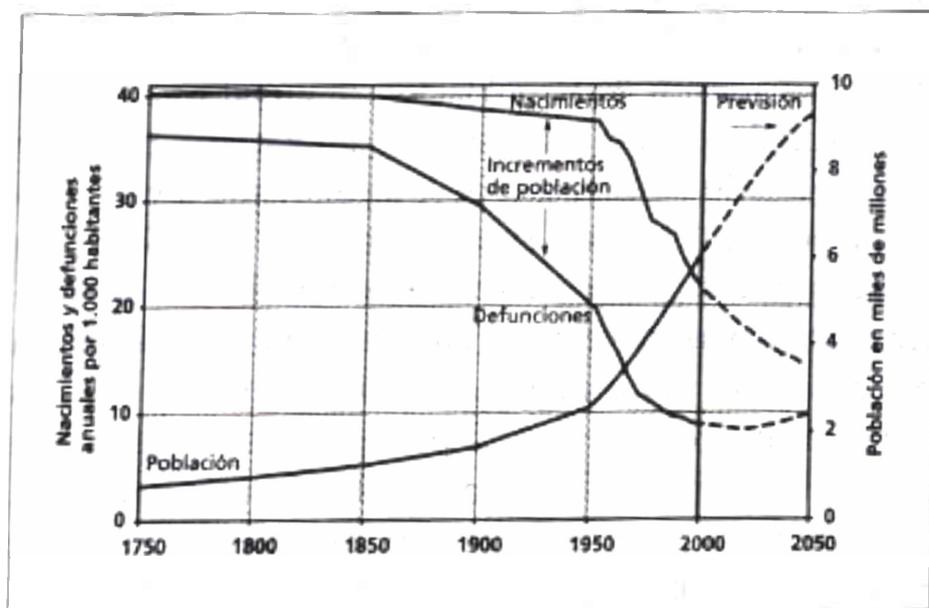


Figura 2-4 Transición demográfica mundial

La diferencia entre nacimientos y defunciones determina la tasa de crecimiento de la población. Hasta 1965, más o menos, la tasa de mortalidad media caía más rápidamente que la tasa de natalidad, con lo que aumentaba la tasa de crecimiento de la población. Desde 1965, la tasa media de natalidad ha venido descendiendo más rápidamente que la tasa de mortalidad. Por tanto, la tasa de crecimiento demográfico ha disminuido notablemente, aunque el crecimiento siga siendo exponencial. (Fuente: ONU.)

de 6.000 millones hasta el año 2000, la *tasa* de crecimiento se redujo del 2 al 1,2 % anual<sup>5</sup>.

Esta inversión de la tasa de crecimiento de la población supone un cambio asombroso que refleja importantes variaciones de los factores culturales que hacen que las personas decidan el tamaño de sus familias y de los factores tecnológicos que les permiten poner en práctica efectivamente esta opción. El número total medio de niños nacidos por cada mujer en todo el mundo descendió de 5 en la década de 1950 a 2,7 en la de 1990. En Europa, a finales del siglo xx el tamaño medio de las familias era de 1,4 hijos por pareja, bastante menos que el número necesario para reponer la población<sup>6</sup>. Todo indica que la población europea disminuirá lentamente, de 728 millones en 1998 a 715 millones en 2025<sup>7</sup>.

Este declive de la fertilidad no significa que haya cesado el crecimiento de la población mundial total, o que haya dejado de ser exponencial. Implica simplemente que el período de duplicación se ha alargado (de 36 años con una tasa del 2 % a 60 años con una tasa del 1,2 % anual) y puede prolongarse todavía más. De hecho, la cifra neta de personas nuevas en el planeta fue más alta en 2000 que en 1965, aunque la tasa de crecimiento era más baja. El cuadro 2-3 muestra por qué: la tasa inferior de 2000 se multiplicaba por una población más numerosa.

El número de nuevas incorporaciones anuales a la población mundial dejó de crecer finalmente a finales de la década de 1980. Pero los 75 millones del año 2000 todavía equivalen a añadir en ese año la población total de nueve veces Nueva York. Para ser más exactos, puesto que casi todo el incremento se produjo en el hemisferio sur, equivale a añadir en un año la población total de Filipinas, o aproximadamente diez veces Pekín o seis veces Calcuta. Incluso a base de proyecciones optimistas sobre nuevos declives de la tasa de natalidad, nos espera

todavía un fuerte aumento de la población, sobre todo en los países menos industrializados (figura 2-5).

CUADRO 2-3  
NUEVAS INCORPORACIONES A LA POBLACIÓN MUNDIAL

Año	Población (millones)	x	Tasa de crecimiento (% anual)	=	Nuevas incorporaciones (millones de personas por año)
1965	3.330	x	2,03	=	68
1970	3.690	x	1,93	=	71
1975	4.070	x	1,71	=	70
1980	4.430	x	1,70	=	75
1985	4.820	x	1,71	=	82
1990	5.250	x	1,49	=	78
1995	5.660	x	1,35	=	76
2000	6.060	x	1,23	=	75

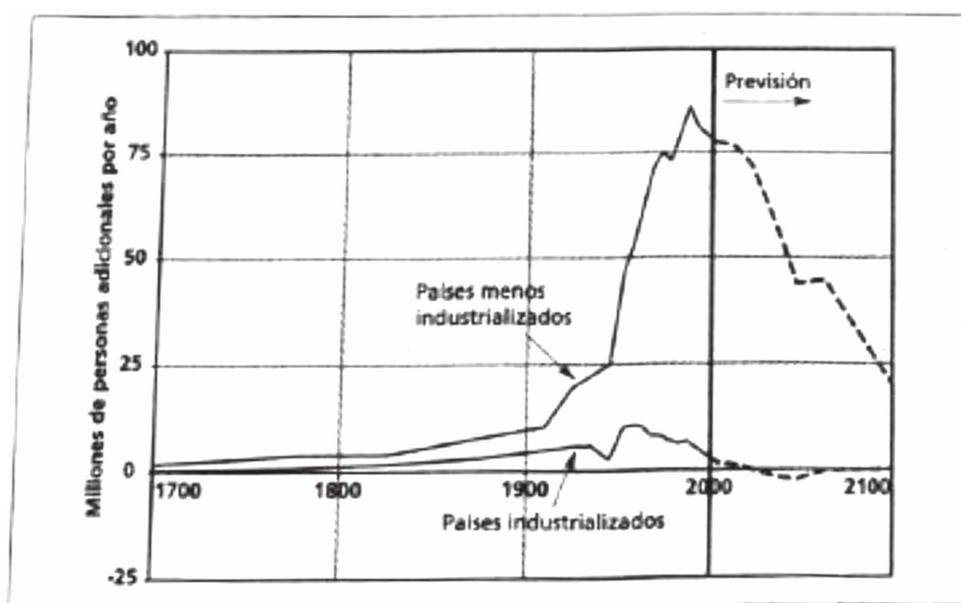
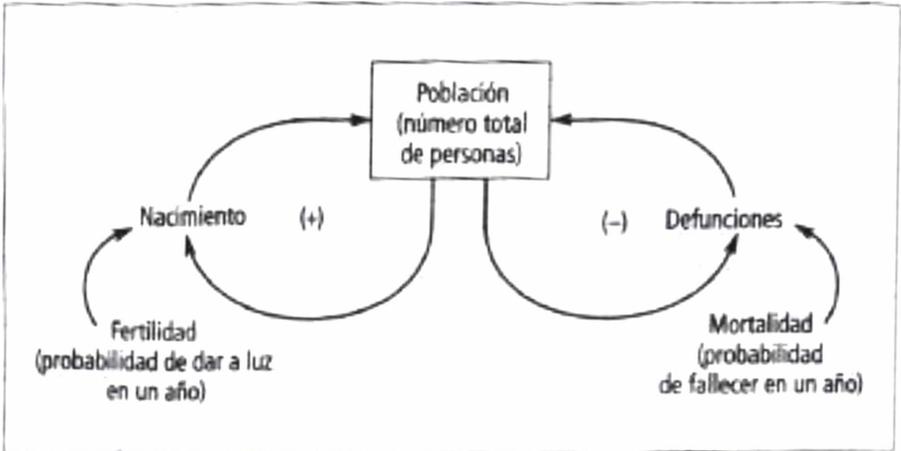


Figura 2-5 Aumento anual de la población mundial

Hasta hace poco, el número de personas incorporadas cada año a la población mundial iba en aumento. Según las previsiones de Naciones Unidas, esta incorporación anual descenderá drásticamente dentro de pocos años. Estas previsiones parten del supuesto de una rápida caída de las tasas de natalidad en los países menos industrializados. (Fuentes: ONU; D. Bogue.)

El gráfico siguiente muestra la estructura central de realimentación que gobierna el sistema poblacional.



*Ciclos de realimentación de nacimientos y defunciones*

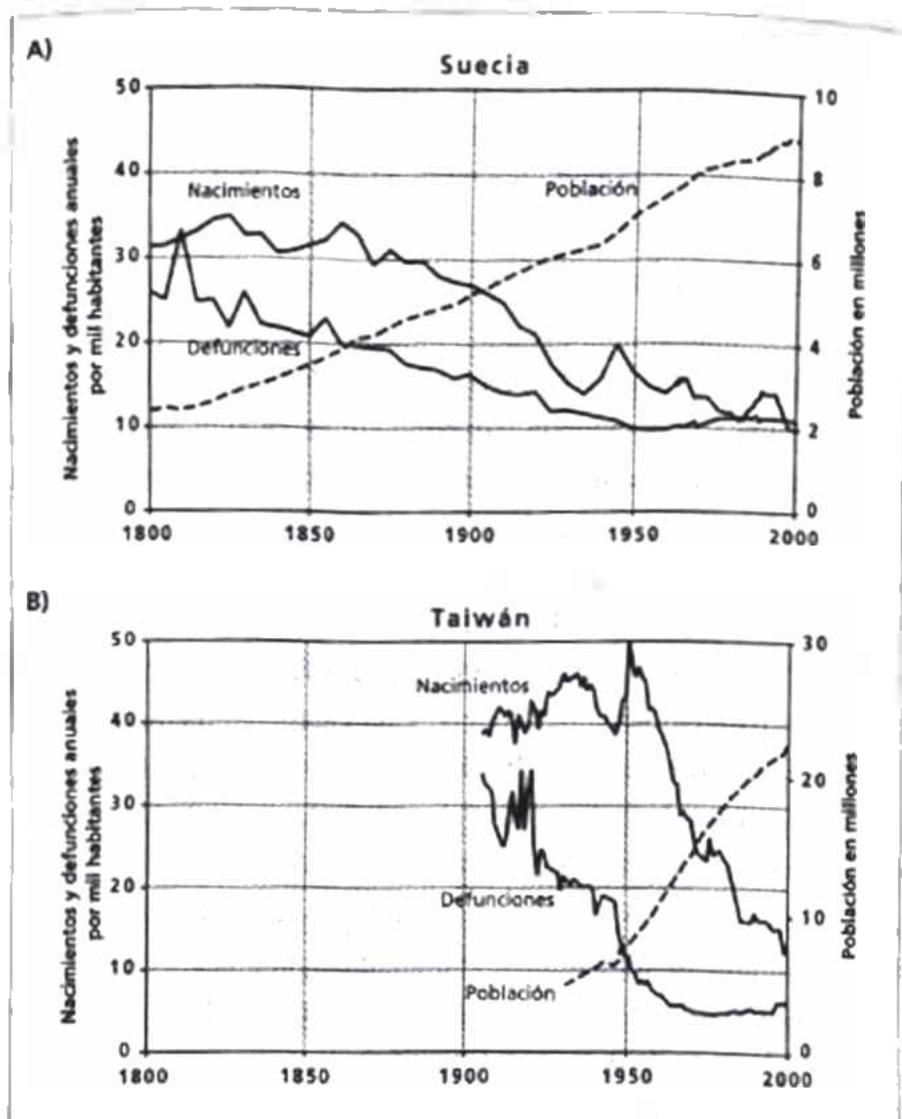
A la izquierda está el ciclo positivo que puede generar un crecimiento exponencial. Cuanto más numerosa sea la población, tantos más nacimientos se producen cada año. A la derecha vemos el *ciclo de realimentación negativo*. Mientras que los ciclos positivos generan un crecimiento desbocado, los ciclos negativos tienden a regular el crecimiento, a mantener el sistema dentro de un margen aceptable o retrotraerlo a una situación estable en que las existencias del sistema tienen valores más o menos constantes en el tiempo. Un ciclo de realimentación negativo propaga las consecuencias del cambio de un elemento a lo largo del círculo hasta que éstas vuelven para cambiar dicho elemento en sentido *contrario* al del cambio inicial.

El número de defunciones por año equivale a la población total multiplicada por la mortalidad media, es decir, la probabilidad media de fallecimientos. El número de nacimientos equivale a la población total multiplicada por la fertilidad media. La tasa de crecimiento de una población es igual a su fertilidad menos su

mortalidad. Por supuesto, ni la fertilidad ni la mortalidad son constantes, sino que dependen de factores económicos, ambientales y demográficos como la renta, la educación, la sanidad, las tecnologías de planificación familiar, la religión, los niveles de contaminación y la estructura de edad de la población.

La teoría más extendida sobre el *modo* en que varían la fertilidad y la mortalidad y el *motivo* por el que descienden las tasas de crecimiento de la población —teoría integrada en el modelo World3— se denomina *transición demográfica*. De acuerdo con esta teoría, en las sociedades preindustriales tanto la fertilidad como la mortalidad son elevadas y la población crece lentamente. A medida que mejoran la alimentación y los servicios sanitarios, las tasas de mortalidad decrecen. Las tasas de natalidad, en cambio, se mantienen durante una o dos generaciones, abriendo una brecha entre fertilidad y mortalidad que comporta un rápido crecimiento de la población. Finalmente, cuando las vidas y los estilos de vida adquieren las pautas de una sociedad plenamente industrializada, las tasas de natalidad también descienden y la tasa de crecimiento de la población se desacelera.

En la figura 2-6 se ilustran las experiencias demográficas reales de seis países. Podemos observar que las tasas de natalidad y mortalidad en países industrializados desde hace tiempo, como Suecia, descienden muy lentamente. La distancia entre ellas nunca ha sido muy grande: la población no ha crecido en ningún momento más del 2 % anual. Durante toda la transición demográfica, las poblaciones de la mayoría de países del hemisferio norte han crecido en un porcentaje anual que en ningún caso es superior a 5. En el año 2000, pocos países industriales tenían un nivel de fertilidad superior a la tasa de reposición, de modo que la mayoría de ellos se enfrentaban a un declive de su población en los próximos años.



*Figura 2-6 Transiciones demográficas en países industrializados (A) y menos industrializados (B)*

En la transición demográfica, la tasa de mortalidad de un país desciende primero, seguida después de la tasa de natalidad. La transición demográfica de Suecia duró casi doscientos años, y en este país la tasa de natalidad se ha mantenido muy cerca de la de mortalidad. En este período, la población de Suecia aumentó menos de cinco veces. Japón es un ejemplo de un país que ha llevado a cabo la transición en menos de un siglo. Los países menos industrializados a finales del siglo xx han conocido brechas mucho más amplias entre sus tasas de natalidad y mortalidad que ninguna que ha prevalecido nunca en los países ahora industrializados. (Fuentes: N. Keyfitz y W. Flieger; J. Chesnais; ONU; PRB; UK ONS; República de China.)

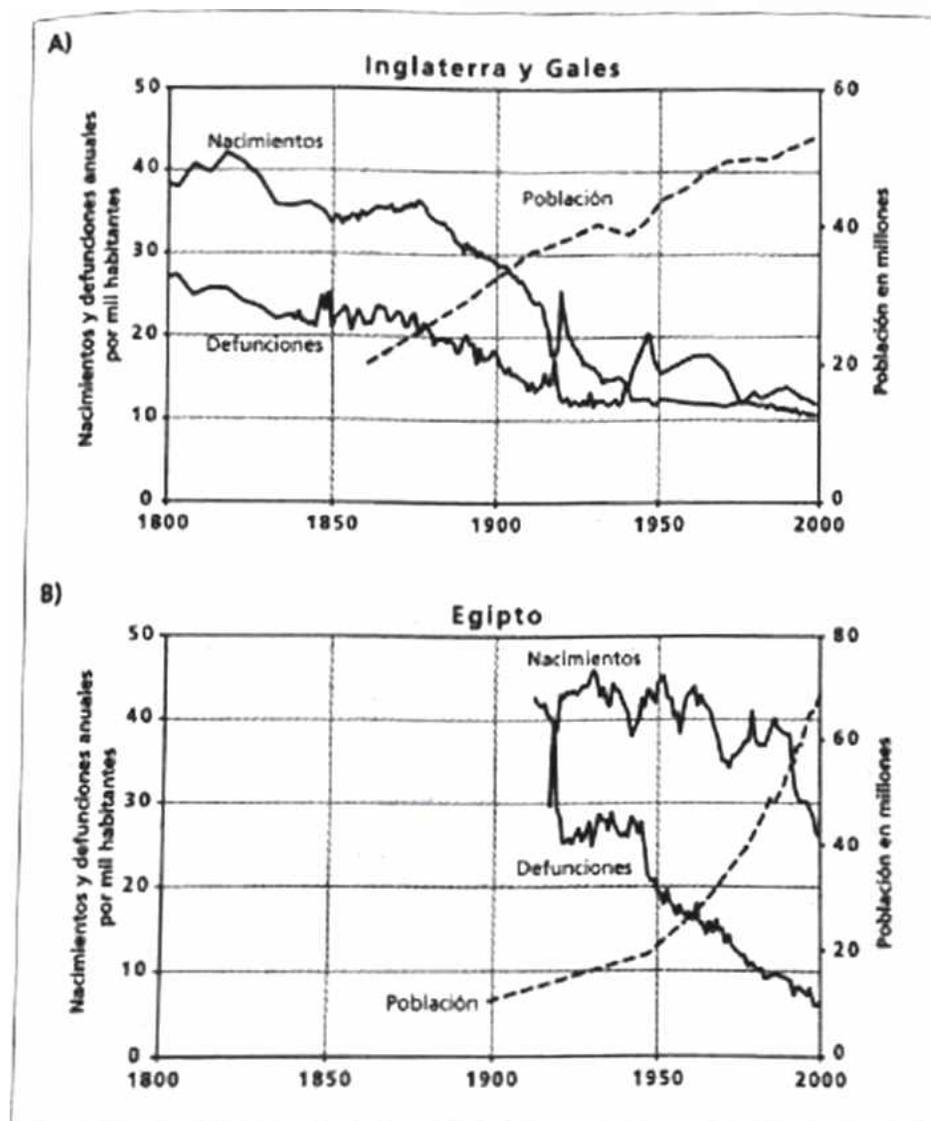


Figura 2-6 Transiciones demográficas en países industrializados (A) y menos industrializados (B)

Los que todavía crecían lo hacían a causa de la inmigración o la inercia demográfica (más jóvenes que entran en la edad de procreación que de adultos que la superan), o por ambas causas.

En el hemisferio sur, donde las tasas de mortalidad han descendido más tarde y con mayor rapidez, se abrió una amplia brecha entre las tasas de natalidad y de mortalidad. Esta parte del mundo ha experimentado unas tasas de crecimiento demográfico mucho mayores que

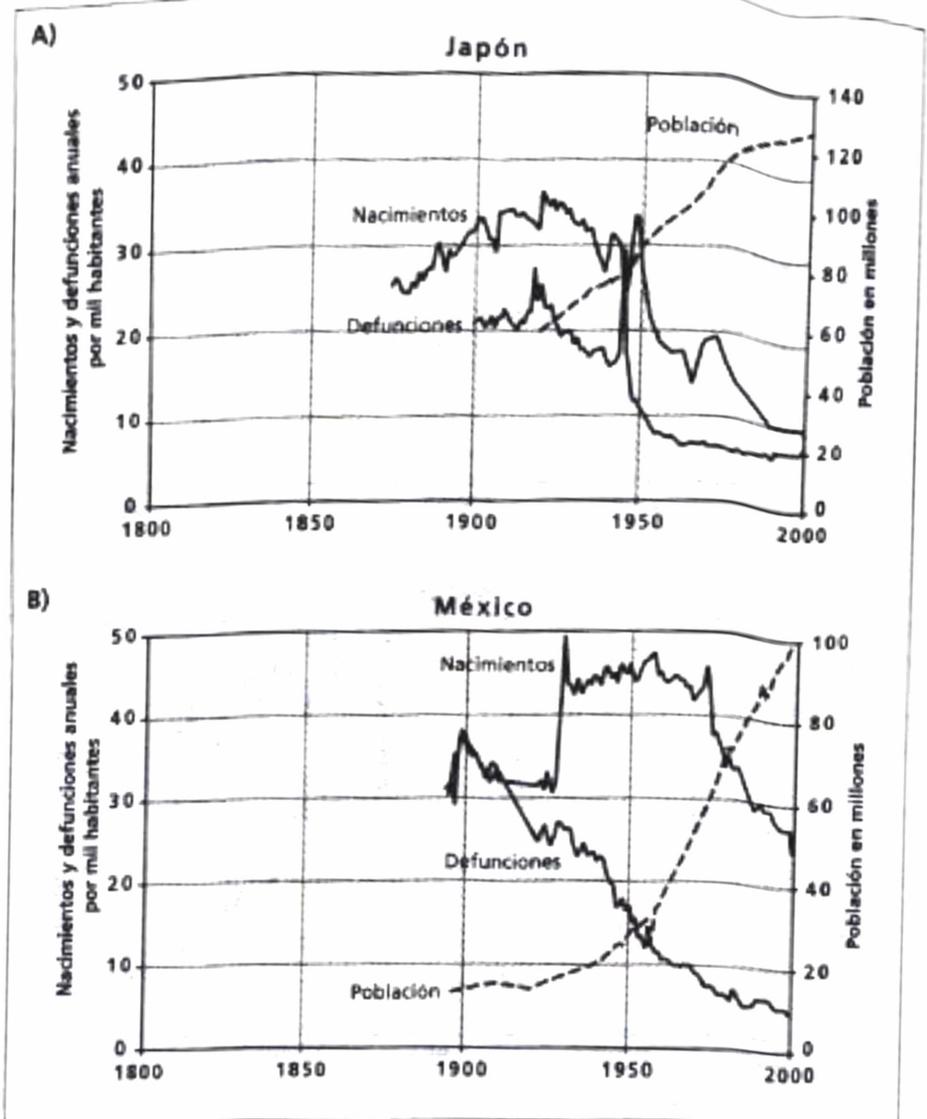


Figura 2-6 Transiciones demográficas en países industrializados (A) y menos industrializados (B)

todas las que ha conocido jamás el hemisferio norte (excepto Norteamérica, que absorbió elevados flujos de inmigración procedente de Europa). Las poblaciones de muchos países del Sur ya se han multiplicado por 10 y siguen creciendo. Sus transiciones demográficas están muy lejos de haber concluido.

Los demógrafos discuten sobre las razones de que exista a todas luces un vínculo entre la transición demo-

gráfica y la industrialización. Los factores subyacentes son más complejos que el mero aumento de la renta. La figura 2-7 muestra, por ejemplo, la correlación entre la renta per cápita (es decir, la renta nacional bruta, o RNB<sup>B</sup>, por persona y año) y las tasas de natalidad en varios países del mundo. Está claro que existe una relación entre rentas elevadas y bajas tasas de natalidad. Pero también es evidente que, particularmente en países de renta baja, existen excepciones sorprendentes. China, por ejemplo, tiene unas tasas de natalidad anormalmente bajas para su nivel de renta. Algunos países de Oriente Próximo y África tienen tasas de natalidad anormalmente altas para sus niveles de renta.

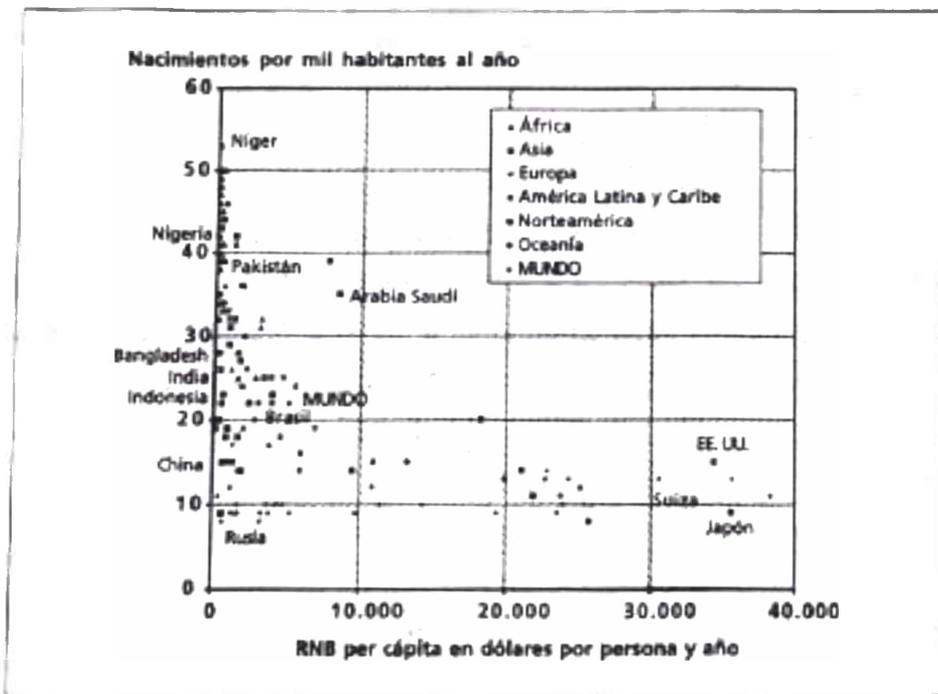


Figura 2-7 Tasas de natalidad y renta nacional bruta per cápita en 2001

A medida que una sociedad se enriquece, la tasa de natalidad de su población tiende a disminuir. Los países más pobres tienen tasas de natalidad que van de 10 a más de 50 nacimientos por mil habitantes al año. Ninguno de los países más ricos tiene una tasa de natalidad superior a 20 por mil habitantes al año. (Fuente: PRB; Banco Mundial.)

Los factores que se considera que influyen *directamente* en el descenso de la tasa de natalidad no son tanto la magnitud de la riqueza de la economía como la medida en que la mejora económica afecta realmente a la vida de todas las familias, y especialmente a la vida de las mujeres. Más importantes que la RNB per cápita, factores como la educación y el empleo (especialmente entre las mujeres), la planificación familiar, una baja mortalidad infantil y una distribución relativamente igualitaria de la renta y las oportunidades<sup>9</sup> son fundamentales a la hora de predecir la evolución futura. China, Sri Lanka, Costa Rica, Singapur, Tailandia, Malasia y otros países han demostrado que cuando la alfabetización, la atención sanitaria básica y la planificación familiar están al alcance de la mayoría de familias, las tasas de natalidad pueden descender incluso con unos niveles de renta modestos.

El modelo World3 incluye muchos factores que empujan a la baja las tasas de natalidad. Suponemos que una economía más rica proporciona una mejor nutrición y atención sanitaria, que a su vez reducen las tasas de mortalidad, y que también mejora la planificación familiar y reduce la mortalidad infantil, que a su vez hacen que baje la tasa de natalidad. Suponemos que la industrialización reduce el tamaño deseado de las familias, a largo plazo y al cabo de cierto lapso de tiempo, al incrementar el coste de la crianza de los hijos y reducir sus ventajas económicas inmediatas para sus progenitores. Suponemos que un aumento de la renta a corto plazo permite a las familias tener más hijos, dentro de los límites del número de niños que desean tener, y un estancamiento de la renta a corto plazo comporta lo contrario<sup>10</sup>.

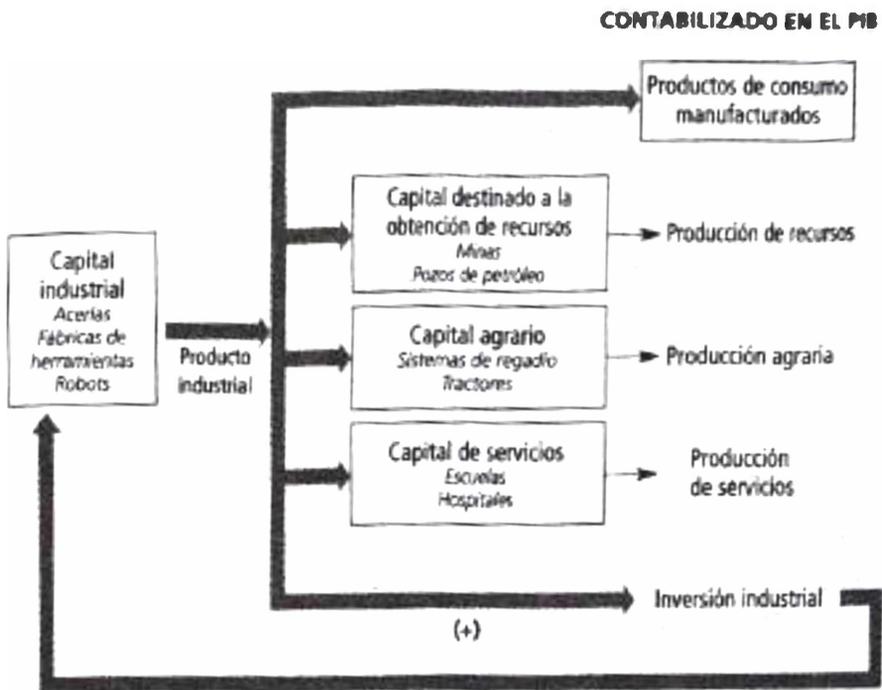
En otras palabras, el modelo asume y suele generar la transición demográfica a largo plazo, modulada por respuestas momentáneas a las fluctuaciones al alza o a la

baja de la renta. La tendencia del modelo al crecimiento exponencial de la población se ve reforzada en un primer momento y después se modera por obra de las presiones, oportunidades, tecnologías y normas de la Revolución Industrial.

En el «mundo real» de los albores del nuevo milenio, la población sigue creciendo exponencialmente a pesar de que la tasa de crecimiento esté decayendo. Las causas de este descenso son más complejas que la mera renta per cápita. El crecimiento económico no garantiza la mejora del bienestar humano, una mayor libertad de elección para las mujeres o unas tasas de natalidad más bajas. Pero sin duda ayuda a alcanzar esos objetivos. Con algunas notables excepciones, las tasas de natalidad más bajas del mundo suelen darse en las economías más ricas. Es por tanto doblemente importante comprender las causas y consecuencias del crecimiento económico en el modelo World3 y en el mundo.

## El crecimiento industrial a escala mundial

En los debates públicos en materia económica hay mucha confusión, en gran parte debida a la incapacidad de distinguir entre el dinero y las cosas reales que suplantata el dinero<sup>11</sup>. Tenemos que establecer cuidadosamente esta distinción en nuestra exposición. La figura 2-8 muestra cómo representamos la economía mundial en World3, cómo hablaremos de ella en este libro y cómo creemos que conviene reflexionar sobre la economía en tiempos de colisión con los límites naturales. Ponemos el acento en la *economía física*, en las cosas reales a las que afectan los límites de la Tierra, en vez de la *economía monetaria*, que es una invención social no constreñida por las leyes físicas del planeta.



*Figura 2-8 Flujos de capital físico en la economía de World3*  
 La producción y la asignación del producto industrial son factores centrales del comportamiento de la economía simulada en World3. El volumen de capital industrial determina qué cantidad de productos industriales puede fabricarse cada año. El producto se asigna a cinco sectores en función de los objetivos y las necesidades de la población. Una parte del capital industrial se consume; otra va a parar al sector de recursos para asegurar la disponibilidad de materias primas; otra parte se asigna a la agricultura para extender las tierras e incrementar su rendimiento; otra parte se invierte en servicios sociales y el resto se destina a la industria para compensar la amortización y seguir incrementando las existencias de capital industrial.

El *capital industrial* abarca aquí los bienes de capital físicos, es decir, las máquinas y fábricas que elaboran productos manufacturados. (Con la intervención, por supuesto, de mano de obra, energía, materiales, tierras, agua, tecnología, finanzas, gestión y los servicios de los ecosistemas naturales y flujos biogeoquímicos del planeta. Volveremos sobre estos cofactores de la producción en el capítulo siguiente.) El flujo de productos reales (bie-

nes de consumo y bienes de capital) generados por el capital industrial lo llamamos *producto industrial*.

Una parte del producto industrial adopta la forma de equipos y edificios para hospitales, escuelas, bancos y comercios. Esto es lo que llamamos *capital de servicios*. El capital de servicios produce su propio flujo de producción que es inmaterial pero tiene un valor real, como la atención sanitaria y la educación.

Otro tipo de producto industrial es el *capital agrícola* —tractores, establos, sistemas de regadío, cosechadoras— que genera la *producción agraria*, principalmente alimentos y fibras.

Otra parte del producto industrial adopta la forma de máquinas perforadoras, pozos de petróleo, equipos de minería, oleoductos, bombas, buques cisterna, refinerías y hornos de fundición. Todo esto es *capital de extracción de recursos*, que genera el flujo de materias primas y energía necesarios que permiten que funcionen todos los demás tipos de capital.

Otra parte del capital industrial entra en la categoría de *productos de consumo*: ropa, coches, radios, neveras, viviendas. La cantidad de productos de consumo por persona es un importante indicador del bienestar material de la población.

Finalmente, una parte se da en forma de *capital industrial*. Esto lo llamamos *inversión*: acerías, generadores eléctricos, tornos y otras máquinas que compensan la amortización y pueden ampliar las existencias de capital industrial, permitiendo que produzca todavía más en el futuro.

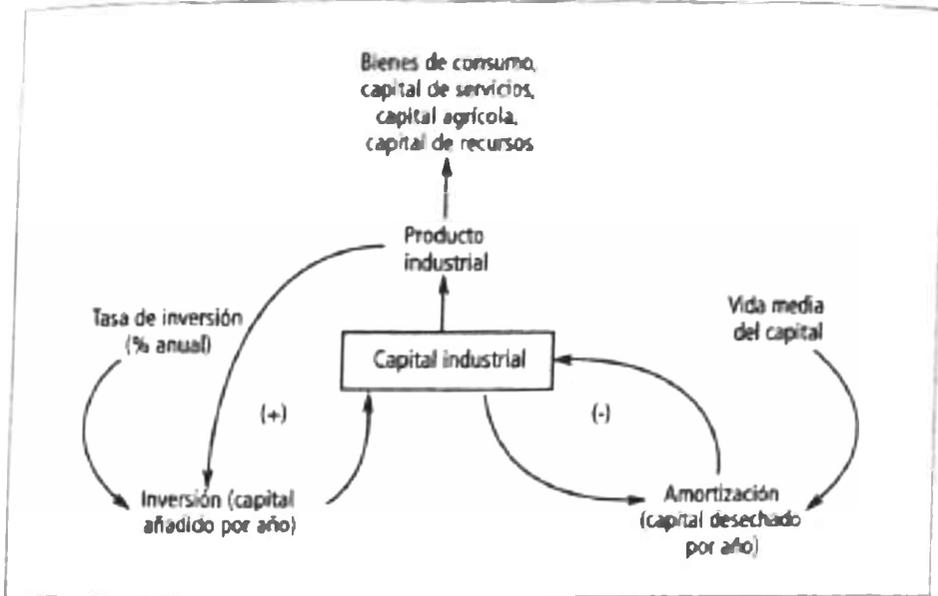
Todo lo que hemos mencionado hasta ahora son bienes físicos, no monetarios. La función del dinero en el «mundo real» consiste en facilitar información sobre el coste y el valor relativos de los bienes (valores asignados por los productores y consumidores que tienen

poder en el mercado). El dinero hace de intermediario y motiva los flujos de capital físico y productos. El valor monetario anual de todas las producciones físicas de bienes y servicios finales que aparece en la figura 2-8 es lo que conforma el PIB, o producto interior bruto.

Haremos referencia al PIB en varias figuras y cuadros, ya que los datos económicos del mundo se expresan principalmente en términos monetarios, no físicos. Pero lo que nos interesa es lo que *representa* el PIB: las existencias reales de capital, bienes industriales, servicios, recursos, productos agrarios y bienes de consumo. Son estos bienes, y no los dólares, los que permiten que la economía y la sociedad funcionen. Estos bienes, y no los dólares, se extraen del planeta y finalmente vuelven al planeta a través de su vertido en el suelo, el aire o el agua.

Ya hemos dicho que el capital industrial puede crecer exponencialmente gracias a su propia autorreproducción. La estructura de realimentación que representa esta autorreproducción es similar a la que derivamos del sistema demográfico.

Una cantidad dada de capital industrial (fábricas, camiones, ordenadores, centrales eléctricas) puede producir cierto volumen de productos manufacturados cada año mientras haya suficiente cantidad de otros insumos necesarios. Cierta porción de la producción de cada año es inversión —telares, motores, cintas transportadoras, acero, cemento— destinada a incrementar las existencias de capital y de este modo ampliar la capacidad de producción en el futuro. Ésta es la «tasa de natalidad» del capital. La proporción que se invierte es variable, del mismo modo que lo es la fertilidad humana, y depende de decisiones, deseos y necesidades. Existen desfases en este ciclo de realimentación positiva, puesto que el plazo de planificación, financiación y construcción de una unidad importante de capital industrial, como una línea de



*Estructura del ciclo de realimentación del capital industrial*

ferrocarril, una central eléctrica o una refinería, puede durar años o incluso decenios.

El capital, al igual que la población, tiene un «ciclo de defunciones» y también un «ciclo de nacimientos». Cuando las máquinas y factorías se desgastan o resultan técnicamente obsoletas, se desguazan y se cierran, reciclan y eliminan. La tasa de amortización del capital es análoga a la tasa de mortalidad en el sistema poblacional. Cuanto más capital existe, tanto más hay que se desgasta cada año, y tanto menos habrá el año siguiente salvo que el influjo de nuevas inversiones sea suficiente para reponer el capital amortizado.

Del mismo modo que las poblaciones experimentan una transición demográfica durante el proceso de industrialización, las existencias de capital de una economía también siguen una pauta ampliamente observada de crecimiento y cambio. Las economías preindustriales son ante todo economías agrarias y de servicios. Cuando empieza a operar el ciclo de crecimiento del capital, crecen todos los sectores económicos, pero durante un tiempo

es el sector industrial el que crece más rápidamente. Después, una vez creada la base industrial, el crecimiento ulterior se da principalmente en el sector de los servicios (véase la figura 2-9). Esta transición está integrada en el modelo World3 como modalidad por defecto del crecimiento económico, a menos que se introduzcan cambios deliberados para probar otras posibilidades<sup>12</sup>.

Las economías muy desarrolladas se denominan a veces economías de servicios, pero de hecho siguen necesitando una base agrícola e industrial importante. Los hospitales, escuelas, bancos, comercios, restaurantes y hoteles forman parte del sector de servicios. Basta observar los camiones que les suministran alimentos, papel, combustible y equipos, o los camiones de basura

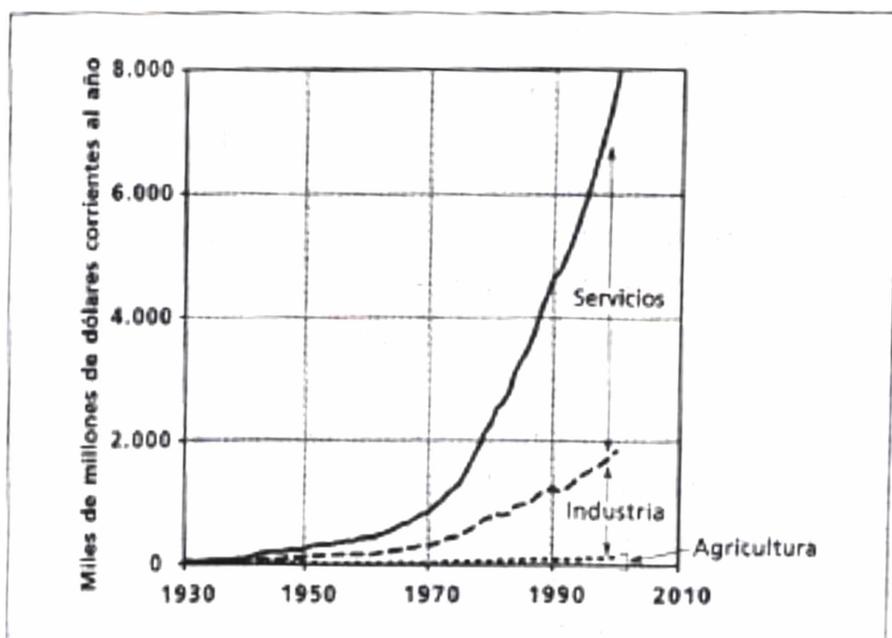


Figura 2-9 Renta nacional bruta de Estados Unidos por sectores

La historia de la distribución del valor de la producción económica de Estados Unidos entre los sectores de servicios, industria y agricultura refleja la transición a una economía de servicios. Nótese que aunque los servicios abarcan la mayor parte de la economía, los sectores industrial y agrario siguen expandiéndose en términos absolutos. (Fuente: U. S. Bureau of Economic Analysis.)

que se llevan sus residuos. Si medimos lo que desciende por sus tubos de desagüe y asciende por sus chimeneas veremos que las empresas del sector de servicios necesitan un caudal constante y pesado de material que va de las fuentes de la Tierra a sus sumideros. Junto con la industria, contribuyen de modo significativo a la huella ecológica de la humanidad.

La siderurgia y la minería pueden hallarse muy lejos de las oficinas de la economía de la información y el tonelaje de materiales que consumen éstas puede que no aumente con tanta rapidez como el valor monetario de lo que producen, pero como refleja la figura 2-9, incluso en una sociedad «postindustrial» la base industrial no disminuye. La información es una mercancía maravillosa, útil e incorpórea, pero suele almacenarse en un ordenador de sobremesa que en 1997 estaba hecho de 25 kilos de plástico, metal, vidrio y silicio; que consumía 150 vatios de electricidad y que generaba en su proceso de fabricación 62,4 kilos de materiales de desecho<sup>13</sup>. Las personas que generan, procesan y utilizan la información no sólo ingieren alimentos, sino que también conducen coches, viven en casas, trabajan en edificios dotados de calefacción y aire acondicionado y que –incluso en la era de la comunicación electrónica– utilizan y desechan montones de papel.

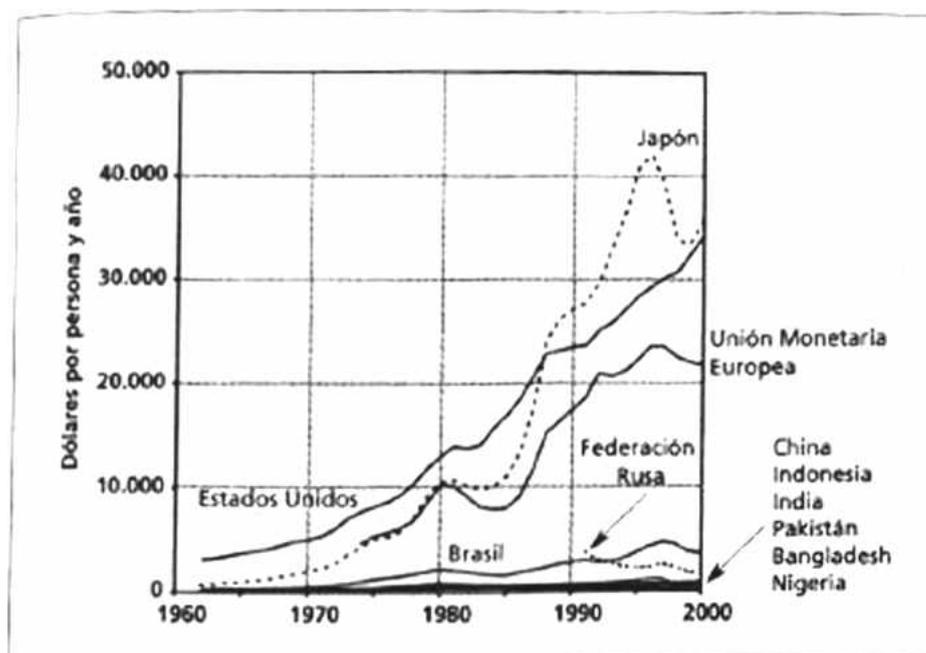
El ciclo positivo que ha originado el crecimiento del capital mundial ha hecho que la industria crezca más rápidamente que la población. De 1930 a 2000, el valor monetario del producto industrial mundial se ha multiplicado por 14 (como muestra la figura 1-2). Si la población se hubiera mantenido constante durante este período, el nivel de vida material también sería ahora 14 veces mayor, pero debido al crecimiento demográfico la producción media per cápita ha aumentado 5 veces. Entre 1975 y 2000, el tamaño de la economía industrial

prácticamente se ha duplicado, mientras que la producción per cápita sólo ha crecido alrededor del 30 %.

### Más población, más pobreza, más población

El crecimiento es necesario para acabar con la pobreza. Esto parece evidente. Pero los numerosos defensores de esta aserción ya no consideran tan evidente el hecho de que el crecimiento en el sistema económico, tal como está estructurado actualmente, acabe con la pobreza. Al contrario, los modos de crecimiento actuales perpetúan la pobreza y ensanchan la brecha entre ricos y pobres. En 1998, más del 45 % de la población mundial tenía que vivir con una renta media de 2 dólares al día o menos. Esta proporción suma más personas pobres que las que había en 1990, incluso después de un decenio que conoció sorprendentes aumentos de ingresos para muchas personas<sup>14</sup>. La multiplicación por 14 de la producción industrial mundial desde 1930 ha enriquecido mucho a algunas personas, pero no ha acabado con la pobreza. No hay ninguna razón para esperar que otro crecimiento por el factor 14 (si fuera posible dentro de los límites planetarios) pudiera acabar con la pobreza, a menos que se reestructurara el sistema mundial para destinar el crecimiento a aquellos que más lo necesitan.

En el sistema vigente, el crecimiento económico suele producirse en los países que ya son ricos y fluye desproporcionadamente a las personas más ricas de esos países. La figura 2-10 muestra las curvas del crecimiento de la RNB per cápita de los 10 países más grandes del mundo (por número de habitantes), además de la Unión Europea. Ilustran cómo decenios de crecimiento



*Figura 2-10 RNB per cápita de los 10 países más poblados del mundo y la Unión Monetaria Europea*

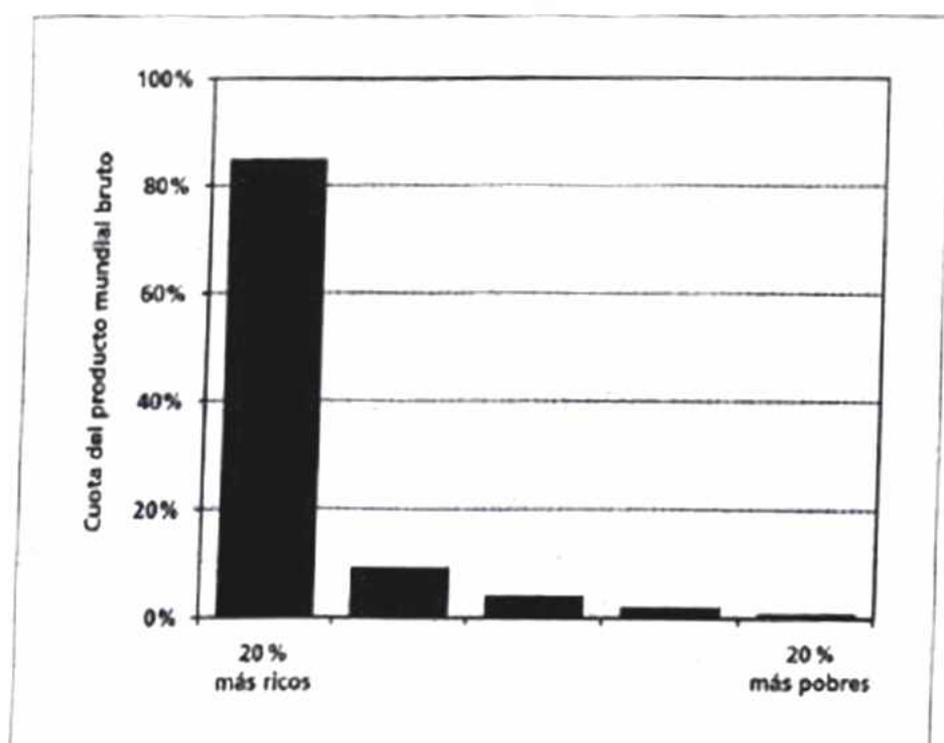
El crecimiento económico se produce ante todo en los países que ya son ricos. Seis países —Indonesia, China, Pakistán, India, Bangladesh y Nigeria— albergan juntos casi la mitad de la población mundial. Su RNB per cápita apenas se despegaba de la abscisa cuando se incluye en un diagrama junto con la RNB per cápita de los países más ricos. (Fuente: Banco Mundial.)

han ensanchado sistemáticamente la brecha entre países ricos y pobres.

De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, en 1960 el 20 % de la población mundial que vivía en los países más ricos tenía una renta per cápita 30 veces superior a la del 20 % que vivía en los países más pobres. En 1995, la proporción entre las rentas medias del 20 % más rico y del 20 % más pobre había aumentado de 30:1 a 82:1. En Brasil, la mitad más pobre de la población percibía el 18 % de la renta nacional en 1960 y sólo el 12 % en 1995. El 10 % más rico de los brasileños percibían el 54 % de la renta nacional en 1960 y el 63 % en 1995<sup>15</sup>. El hogar medio afri-

cano consumía en 1997 un 20 % menos que en 1972<sup>16</sup>. Un siglo de crecimiento económico nos ha dejado un mundo de enormes disparidades entre ricos y pobres. La figura 2-11 refleja dos indicadores de este fenómeno, la cuota del producto nacional bruto y la cuota de consumo de energía por diferentes grupos de renta.

Cuando nosotros, que estudiamos la dinámica de sistemas, vemos una pauta que persiste en muchas partes de un sistema durante largos períodos, suponemos que sus causas radican en la estructura del ciclo de realimentación del sistema. Intensificar o acelerar el funcionamiento del sistema no cambiará la pauta mientras no se revise la estructura. El crecimiento de siempre ha ampliado la brecha entre pobres y ricos. La continui-



*Figura 2-11 Disparidades mundiales*

La distribución mundial de riqueza y oportunidades está extremadamente sesgada. El 20 % más rico de la población mundial controla más del 80 % del producto mundial bruto y consume casi el 60 % de la energía comercial mundial. (Fuente: Banco Mundial.)

dad del crecimiento de siempre nunca cerrará esa brecha. Para ello es necesario cambiar la estructura del sistema, es decir, las cadenas de causas y efectos.

¿Cuál es la estructura que hace que siga ensanchándose la brecha entre ricos y pobres incluso en un período de enorme crecimiento económico? Observamos dos estructuras genéricas en funcionamiento. La primera tiene que ver con mecanismos sociales —algunos comunes a muchas culturas, otros exclusivos de determinadas culturas— que *otorgan sistemáticamente a los privilegiados el poder y los recursos para adquirir todavía más privilegios*. Los ejemplos incluyen desde la discriminación étnica abierta o encubierta hasta las ventajas fiscales para los ricos; desde la inferioridad de la nutrición para los niños de los pobres hasta las mejores escuelas para los hijos de los ricos; desde el empleo del dinero para obtener influencia política, incluso en las democracias, hasta el mero hecho de que los pagos de intereses fluyen sistemáticamente de los que tienen menos dinero del que necesitan a los que tienen más del que precisan.

En términos sistémicos, estas estructuras se denominan ciclos de realimentación de «fortuna para los afortunados»<sup>17</sup>. Son ciclos positivos que facilitan a los afortunados los medios para hacer fortuna. Suelen ser endémicos en toda sociedad que no establece conscientemente estructuras de contrapeso para igualar las condiciones. (Ejemplos de estructuras de contrapeso son, entre otros, las leyes contra la discriminación, tipos impositivos progresivos que aumentan con la renta de cada persona, enseñanza universal y acceso universal a la atención sanitaria, «redes de seguridad» para recoger a quienes se despeñan en los tiempos difíciles, impuestos sobre la riqueza y procesos democráticos que separan la política de la influencia del dinero.)

Ninguno de estos ciclos de «fortuna para los afortunados» está representado explícitamente en el modelo World3. No se trata de un modelo de la dinámica de la renta o la riqueza o del reparto de poder, sino que se centra en la relación agregada entre la economía mundial y los límites del crecimiento<sup>18</sup>. Por consiguiente, supone la continuidad de las pautas de distribución actuales.

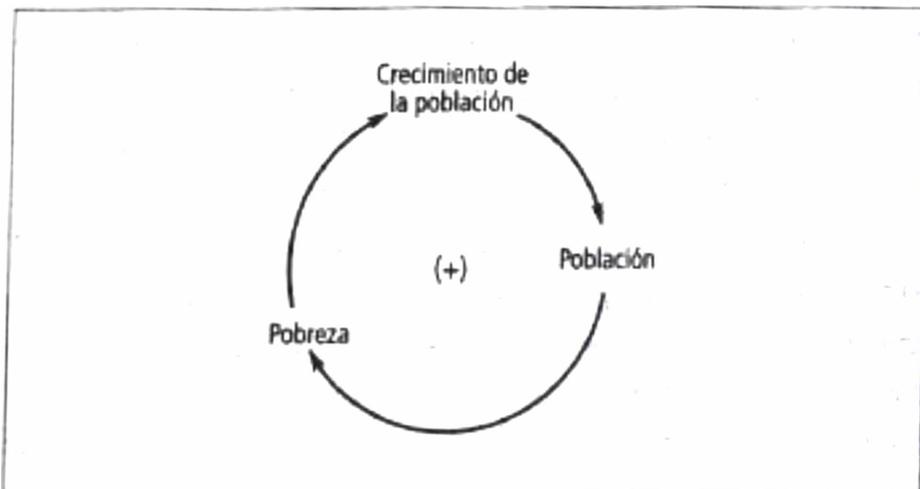
Sin embargo, en World3 existe una estructura que refleja los vínculos entre los sistemas de población y capital que hemos descrito en este capítulo. Esta estructura perpetúa la pobreza, el crecimiento demográfico y la tendencia del sistema mundial a sobrepasar sus límites. Es preciso cambiarla, como demostraremos en próximos capítulos, si queremos alcanzar un mundo sostenible.

Esta estructura que perpetúa la pobreza se deriva del hecho de que a las poblaciones ricas les resulta más fácil ahorrar, invertir y multiplicar su capital que a las pobres. No sólo tienen los ricos más poder para controlar las condiciones del mercado, comprar nuevas tecnologías y reclamar recursos, sino que además varios siglos de crecimiento les han permitido crear grandes existencias de capital que se automultiplican. La mayoría de sus necesidades básicas están cubiertas, de modo que pueden alcanzar elevadas tasas de inversión sin privar a la población presente de bienes esenciales. El bajo crecimiento demográfico permite dedicar una proporción mayor de la producción al logro del crecimiento económico y una parte menor a la satisfacción de las necesidades sanitarias y educativas de una población que se expande rápidamente.

En los países pobres, por el contrario, el crecimiento del capital difícilmente puede mantener el ritmo con el crecimiento de la población. La producción que podría reinvertirse se precisará más probablemente para cons-

truir escuelas y hospitales y para satisfacer las necesidades de consumo de subsistencia. Dado que las necesidades inmediatas dejan una parte muy pequeña de la producción para invertir en la industria, la economía sólo crece lentamente. La transición demográfica se estanca en la fase intermedia, con una gran distancia entre las tasas de natalidad y de mortalidad. Cuando las mujeres no ven ninguna alternativa educativa o económica atractiva a la cría de niños, los hijos son una de las pocas formas de inversión disponibles; de este modo, la población crece más y más sin enriquecerse. Como dice el refrán, «los ricos hacen dinero y los pobres hacen hijos».

La discusión sobre qué flecha del siguiente ciclo de realimentación es más importante puede ser tan apasionada que más de una reunión internacional se ha visto paralizada por ella. ¿Es la pobreza la que hace que crezca la población o es el crecimiento de la población el que origina la pobreza?



### *Pobreza y población*

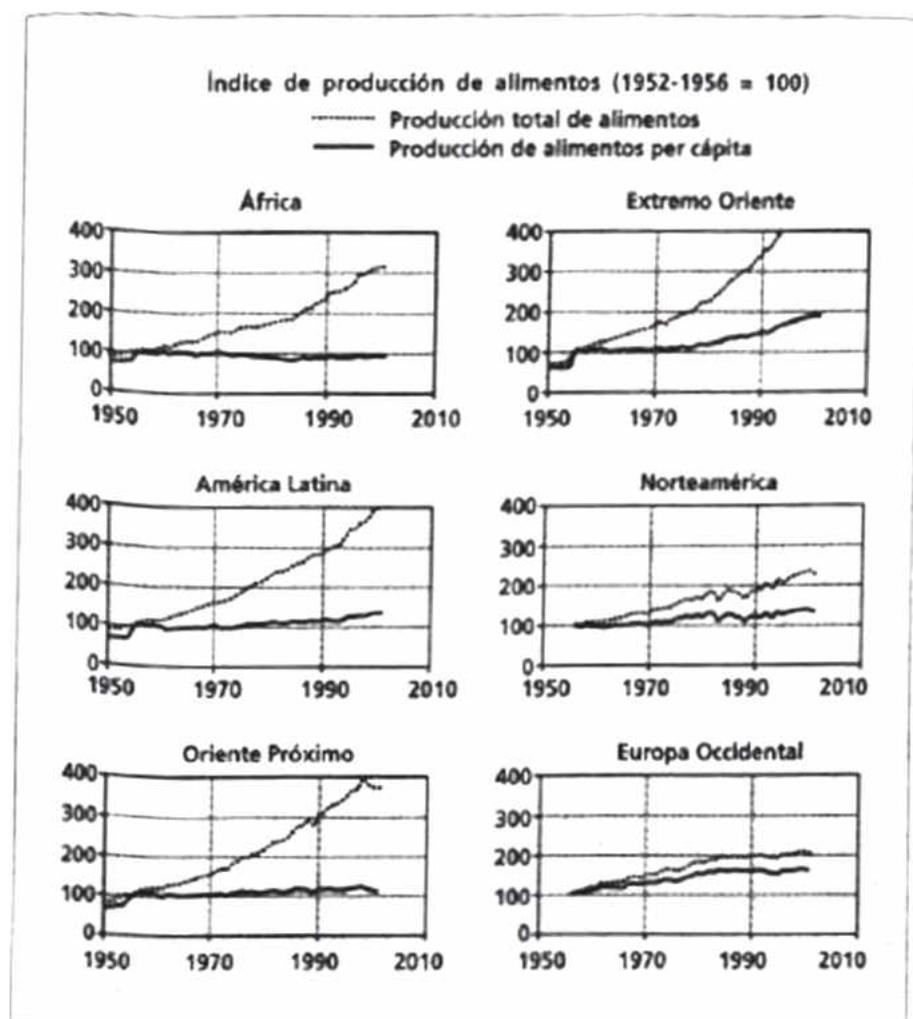
De hecho, todas las partes de este ciclo de realimentación positivo ejercen una gran influencia en el comportamiento de las poblaciones de las zonas más pobres.

Forman una «trampa sistémica», un ciclo de «menos fortuna para los ya desafortunados» que hace que los pobres sigan siendo pobres y que la población crezca. Al desviar la producción de la inversión al consumo, el crecimiento de la población frena el crecimiento del capital. La pobreza, a su vez, perpetúa el crecimiento de la población al mantener a las personas en condiciones en que carecen de educación, atención sanitaria, planificación familiar, de opciones, de poder, de otras vías para progresar que la esperanza de que sus hijos puedan aportar ingresos o ayudar en el trabajo familiar.

La figura 2-12 refleja una consecuencia de esta trampa. La producción de alimentos en todas las regiones del Sur ha crecido de modo importante en los últimos veinte años. En la mayoría de ellas se ha duplicado o triplicado. Pero debido al rápido crecimiento de la población, la producción de alimentos por persona apenas ha aumentado y en África ha descendido de modo constante. Las únicas regiones en que la producción de alimentos ha superado notablemente el crecimiento de la población son Europa y Extremo Oriente.

Los gráficos de la figura 2-12 reflejan una doble tragedia. La primera es humana. Un gran logro agrícola —el enorme aumento de la producción de alimentos— ha sido absorbido en gran medida, no para alimentar suficientemente a las personas, sino para alimentar insuficientemente a más personas. La segunda tragedia es ecológica. El crecimiento de la producción de alimentos se ha conseguido con políticas que han deteriorado las tierras, las aguas, los bosques y los ecosistemas, un coste que dificultará todo futuro aumento de la producción.

Pero todo ciclo de realimentación positivo que deteriora un sistema puede invertirse para favorecerlo. Más pobreza comporta más población, que a su vez comporta más pobreza. Pero menos pobreza comporta la



**Figura 2-12 Producción de alimentos por regiones**

El índice de producción total de alimentos (índice = 100 en 1952-1956) se ha duplicado o triplicado en los últimos cincuenta años en las regiones del mundo en que hay hambruna, pero el índice de producción de alimentos por persona apenas ha variado en esas regiones debido a que la población ha crecido al menos con la misma rapidez. En el caso de África, la producción de alimentos per cápita ha descendido un 9 % entre 1996 y 2001. (Fuente: FAO.)

desaceleración del crecimiento de la población y en consecuencia menos pobreza. Con una inversión suficiente mantenida durante un tiempo necesario, con precios justos de los productos y la mano de obra, con una producción creciente asignada directamente a los pobres, y en especial a la educación y el empleo de las mujeres y a

la planificación familiar, es posible invertir los efectos del ciclo población-pobreza. Las mejoras sociales pueden reducir la tasa de crecimiento de la población. Esto permite invertir más en capital industrial, que produce más bienes y servicios. El mayor consumo de bienes y servicios ayuda a reducir todavía más el crecimiento de la población.

En las regiones del mundo en que se presta mucha atención al bienestar del conjunto de la población, y en particular de los pobres, esta inversión ya es un hecho. Ésta es una de las razones por las que la tasa de crecimiento de la población mundial está descendiendo y avanza la transición demográfica.

Pero en otros lugares, en los que la desigualdad es culturalmente endémica, donde faltan los recursos o la voluntad de invertir en el bienestar público, o donde las quiebras monetarias han comportado la imposición de «ajustes estructurales» que desvían la inversión del sistema educativo y de la atención sanitaria, no se produce ninguna mejora del nivel de vida de amplios sectores de la población. Ancladas en la pobreza y creciendo velozmente, estas poblaciones corren el grave peligro de ver frenado su crecimiento no por el descenso de las tasas de natalidad, sino por el aumento de las tasas de mortalidad. En efecto, se prevé que Zimbabue, Botswana, Namibia, Zambia y Swazilandia alcanzarán una tasa de crecimiento de la población igual a cero a comienzos del siglo XXI por una razón trágica: la muerte de jóvenes adultos y niños a causa del sida<sup>19</sup>.

El crecimiento exponencial de la población y la producción industrial está inserto en la estructura auto-generadora del sistema socioeconómico del «mundo real», pero de un modo complejo que tiende a empujar a algunas partes del mundo a un lento crecimiento demográfico y un rápido crecimiento industrial y a otras

partes a un lento crecimiento industrial y un rápido crecimiento demográfico. Pero en ambos casos la población y el capital físico siguen creciendo.

¿Puede este crecimiento físico, desde un punto de vista realista, mantenerse para siempre? Nuestra respuesta es que no. El crecimiento de la población y del capital incrementa la huella ecológica de la humanidad, la carga que supone la humanidad para el ecosistema planetario, a menos que haya un esfuerzo efectivo de evitar dicho incremento. En principio es posible reducir la huella ecológica de cada unidad de actividad humana (con medios tecnológicos o de otro tipo) con la suficiente rapidez para permitir que tanto la población como el capital industrial siga creciendo. Pero no creemos que eso se logre en la práctica. No cabe duda de que los datos empíricos disponibles de todo el mundo de hoy muestran que no tiene lugar ninguna reducción suficiente. La huella ecológica sigue creciendo (*véase* la figura P-1 en el Prólogo), aunque a un ritmo más lento que el de la economía.

Cuando la huella ecológica ha crecido más allá del nivel sostenible, como ya ha ocurrido, al final tendrá que volver a descender, bien a través de un proceso controlado (por ejemplo, mediante un rápido aumento de la ecoeficiencia), bien por obra de la naturaleza (por ejemplo, debido al descenso del consumo de madera a medida que desaparecen los bosques). Está fuera de toda duda que el crecimiento de la huella ecológica se detendrá; lo único incierto es cuándo y por qué medios lo hará.

El crecimiento de la población se detendrá en lo esencial, bien por un descenso continuado de la tasa de natalidad, bien por el aumento de las defunciones, o por ambas causas a la vez. El crecimiento industrial se detendrá sustancialmente, ya sea debido a la caída de las tasas de inversión, al aumento de la amortización, o por ambas causas a la vez. Si anticipamos estas tenden-

cias podemos ejercer cierto control racional sobre ellas, seleccionando las mejores opciones disponibles. Si hacemos caso omiso de ellas, entonces los sistemas naturales buscarán una salida sin reparar en el bienestar humano.

Las tasas de natalidad y mortalidad y las tasas de inversión y amortización se verán equilibradas por decisión humana o por los efectos de la sobreexplotación de las fuentes y sumideros del planeta. Las curvas de crecimiento exponencial se desacelerarán y experimentarán una inflexión, para luego estabilizarse o descender. El estado de la sociedad humana y del planeta en este momento será catastrófico.

Es a todas luces demasiado fácil calificar las cosas de «buenas» o «malas» y mantener estas categorías para siempre. Durante generaciones, tanto el crecimiento de la población como el del capital se consideraban cosas buenas sin discusión. En un planeta escasamente poblado con recursos abundantes había buenas razones para esta apreciación positiva. Ahora, con una comprensión cada vez más clara de los límites ecológicos, puede ser tentador calificar todo crecimiento de malo.

La tarea de gestión en una época de colisión con los límites exige mayor sutileza, una clasificación más cuidadosa. Algunas personas necesitan desesperadamente más alimentos, cobijo y bienes materiales. Otras, sumidas en otra clase de desesperación, tratan de aprovechar el crecimiento material para satisfacer otras necesidades, que son igual de reales pero inmateriales: necesidades de reconocimiento, autoestima, pertenencia, identidad. Por tanto, no tiene sentido hablar del crecimiento con aprobación absoluta o desaprobación absoluta. En vez de ello es necesario formular preguntas: *¿Crecimiento de qué? ¿Para quién? ¿A qué coste? ¿Pagado por quién? ¿Cuál es la necesidad real y cuál es la vía más directa y eficien-*

*te para satisfacer esa necesidad? ¿Cuánto es suficiente?  
¿Cuáles son las obligaciones comunes?*

Las respuestas a estas preguntas pueden señalar el camino hacia una sociedad suficiente y equitativa. Otras preguntas señalarán el camino hacia una sociedad sostenible. *¿Cuántas personas pueden satisfacer sus necesidades con un caudal productivo dado dentro de una huella ecológica determinada? ¿En qué nivel de consumo material? ¿Durante cuánto tiempo? ¿Hasta qué punto está explotado el sistema físico que sostiene a la población humana, la economía y a todas las demás especies? ¿Qué resistencia tiene este sistema frente a qué tipos y magnitudes de explotación? ¿Cuánto es demasiado?*

Para responder a estas preguntas debemos apartar nuestra mirada de las causas del crecimiento y centrarnos en los límites del crecimiento. Éste es nuestro propósito en el capítulo 3.

## CAPÍTULO 3

## Los límites: fuentes y sumideros

Las tecnologías que hemos adoptado y que nos han permitido mantener constante o reducir el coste en dólares de los recursos han necesitado cantidades cada vez mayores de combustible directo e indirecto... Este lujo se convierte en una necesidad cara, que implica que una proporción creciente de nuestra renta nacional se desvíe a los sectores de procesamiento de recursos a fin de suministrar la misma cantidad de recursos.

COMISIÓN MUNDIAL DE MEDIO AMBIENTE  
Y DESARROLLO, 1987

Nuestra inquietud ante el colapso no se deriva de la creencia de que el mundo está a punto de agotar las reservas de energía y materias primas de la Tierra. Todas las proyecciones elaboradas por World3 demuestran que en el año 2100 el mundo todavía conserva una fracción significativa de los recursos que tenía en 1900. Al analizar las proyecciones de World3, nuestra inquietud se debe más bien al coste creciente de la explotación de las fuentes y sumideros del planeta. Los datos relativos a este coste son insuficientes y la cuestión es objeto de importantes debates. Pero nos permiten concluir que la obtención de fuentes renovables, el agotamiento de materiales no renovables y la saturación de los sumideros se combinan lenta e inexorablemente para incrementar la cantidad de energía y capital que se precisan para sostener la cantidad y la calidad de los flujos de material

que requiere la economía. Estos costes se derivan de una combinación de factores físicos, ambientales y sociales, y al final serán tan altos que ya no podrá sostenerse semejante crecimiento de la industria. Cuando esto suceda, el ciclo de realimentación positivo que produjo la expansión de la economía material cambiará de signo y la economía empezará a contraerse.

No podemos probar esta afirmación. Podemos tratar de hacerla plausible y señalar después la naturaleza de las respuestas constructivas. Para conseguirlo en este capítulo presentamos gran cantidad de información sobre fuentes y sumideros. Resumimos la situación y las perspectivas de diversas fuentes que se necesitarán para sostener el crecimiento económico y demográfico del mundo durante el nuevo siglo. La lista de insumos necesarios es larga y diversa, pero puede dividirse en dos categorías.

La primera categoría incluye las necesidades físicas que sostienen toda actividad biológica e industrial: tierras fértiles, minerales, metales, energía, un clima moderado y los sistemas ecológicos del planeta que absorben los residuos. Estos ingredientes son, en principio, elementos tangibles y contabilizables, como hectáreas de tierra cultivable y bosques, kilómetros cúbicos de agua dulce, toneladas de metales y miles de millones de barriles de petróleo. Pero en la práctica resultan bastante difíciles de cuantificar. Sus cantidades totales son inciertas. Se interfieren entre ellos: algunos pueden sustituir a otros, mientras que al producir unos resulta más difícil producir otros. Las definiciones de *recursos*, *reservas*, *consumo* y *producción* son incoherentes; la ciencia todavía tiene lagunas y los aparatos burocráticos a menudo distorsionan u ocultan las cifras con fines políticos y económicos particulares. Y la información sobre realidades físicas suele expresarse mediante índices economi-

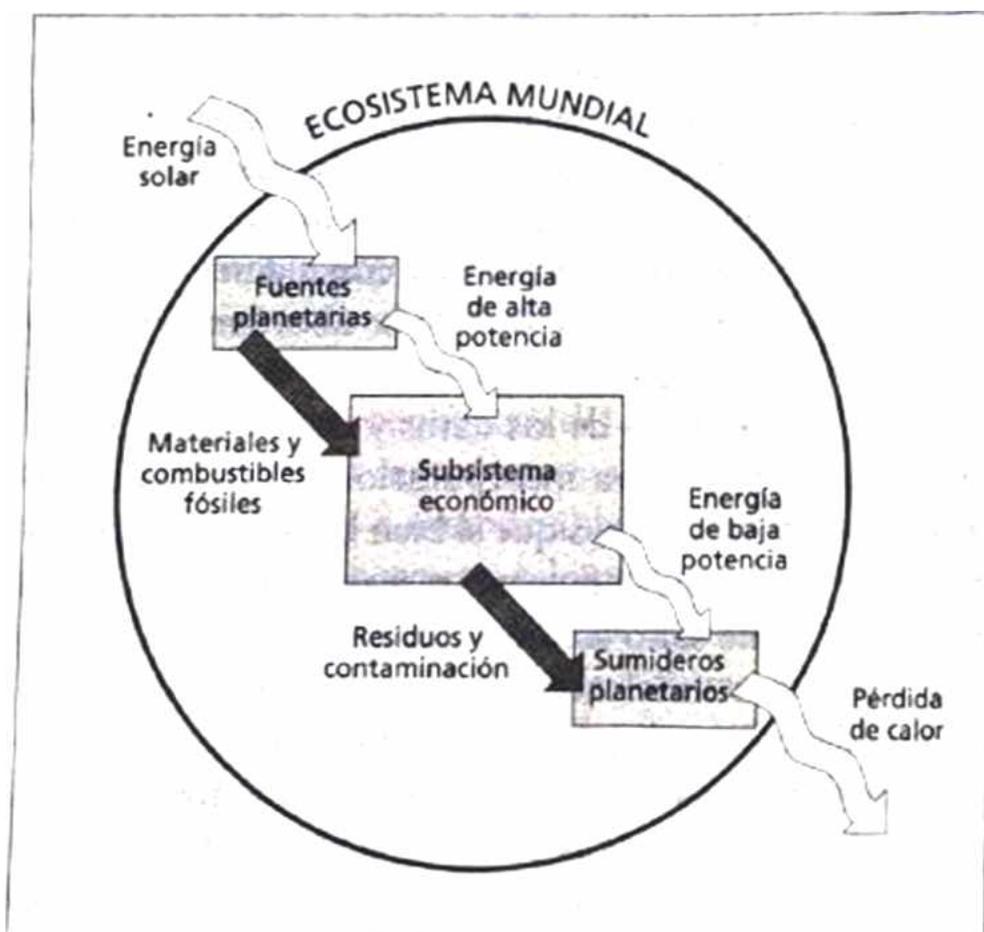
cos, como el precio monetario. Los precios se fijan en los mercados y obedecen a un conjunto de normas que son muy diferentes de las que rigen los recursos físicos. Sin embargo, en este capítulo vamos a centrarnos en estas necesidades físicas.

La segunda categoría de requisitos para el crecimiento consiste en necesidades sociales. Incluso si los sistemas físicos de la Tierra son capaces de sostener a una población mucho más grande y más desarrollada industrialmente, el crecimiento real de la población y de la economía dependerá de factores como la paz y la estabilidad social, la justicia y la seguridad personal, dirigentes honestos y de amplias miras, educación y una mentalidad abierta a las nuevas ideas, la disposición a admitir errores y experimentar y las bases institucionales para el progreso técnico constante y adecuado.

Estos factores sociales son difíciles de evaluar y probablemente imposibles de predecir con alguna precisión útil. Ni en este libro ni en *World3* se abordan explícitamente estos factores sociales de un modo detallado y significativo. Carecemos de los datos y de teorías causales que se requerirían para incorporarlos en nuestro análisis formal. Pero sabemos que si bien la existencia de tierras fértiles, energía suficiente, recursos necesarios y un medio ambiente sano son imprescindibles para el crecimiento, no son suficientes. Aunque físicamente existan en abundancia, su disponibilidad puede verse mermada por problemas sociales. Suponemos, sin embargo, que prevalecerán las mejores condiciones sociales posibles.

Los materiales y la energía utilizados por la población y el capital no vienen de la nada. Los extraemos del planeta. Tampoco desaparecen después de usarlos. Una vez utilizados económicamente, los materiales se reciclan o se convierten en residuos y contaminantes; la energía se disipa en forma de calor inutilizable. Las co-

rrientes de material y energía fluyen de las *fuentes* del planeta a través del *subsistema económico* a los *sumideros* del planeta, adonde van a parar los residuos y contaminantes (figura 3-1). El reciclado y una producción más limpia pueden reducir drásticamente, pero nunca eliminar, los residuos y la contaminación por unidad de consumo. Las personas necesitarán siempre algún alimento, agua, aire limpio, cobijo y muchas clases de materiales para crecer, mantener sus cuerpos sanos, vivir vidas productivas y generar capital y nuevas personas. Las máquinas y los edificios siempre necesitarán aporte



*Figura 3-1 Población y capital en el ecosistema mundial*

La población y el capital son sostenidos por flujos de combustibles y fuentes no renovables del planeta y generan efluentes de calor y residuos que contaminan la atmósfera, el agua y el suelo del planeta. (Fuente: R. Goodland, H. Daly y S. el Serafy.)

de energía, agua, aire y una serie de metales, productos químicos y materiales biológicos para producir bienes y servicios, para ser reparados y para fabricar nuevas máquinas y edificios. El ritmo con el que las fuentes pueden producir y los sumideros absorber estos flujos sin perjudicar a las personas, la economía o los procesos de regeneración y regulación es limitado.

La naturaleza de estos límites es compleja, pues las propias fuentes y sumideros forman parte de un sistema dinámico interrelacionado, mantenido por los ciclos biogeoquímicos del planeta. Existen límites a corto plazo (la cantidad de petróleo refinado y en espera en los tanques de almacenamiento, por ejemplo) y límites a largo plazo (la cantidad de petróleo accesible en el subsuelo). Las fuentes y sumideros pueden interferirse mutuamente y el mismo sistema natural puede servir tanto de fuente como de sumidero. Un terreno, por ejemplo, puede ser una fuente de cultivos alimenticios y un sumidero de lluvia ácida generada por la contaminación atmosférica. Su capacidad para desempeñar cualquiera de estas funciones puede depender de la medida en que sirve a la otra.

El economista Herman Daly ha propuesto tres simples reglas para ayudar a definir los límites sostenibles del caudal productivo de material y energía<sup>1</sup>:

- Para una *fuentes renovable* —suelo, agua, bosques, peces—, la tasa de consumo sostenible no debe ser mayor a la tasa de regeneración de su fuente. (Así, por ejemplo, la pesca es insostenible cuando el ritmo de las capturas es superior a la tasa de crecimiento de la población de peces restante.)
- Para una *fuentes no renovable* —combustible fósil, menas de minerales de alta pureza, aguas freáticas fósiles—, la tasa de consumo sostenible no debe ser

superior a la tasa con que un recurso renovable, utilizado de modo sostenible, puede sustituirla. (Por ejemplo, un tanque de petróleo se consumiría de modo sostenible si parte de los beneficios obtenidos del mismo se invirtiera sistemáticamente en parques eólicos, placas fotovoltaicas y plantaciones de árboles, de manera que cuando el petróleo se haya agotado todavía esté disponible un flujo equivalente de energía renovable.)

- Para un *contaminante*, la tasa de emisión sostenible no debe ser mayor que la tasa con la que este contaminante puede ser reciclado, absorbido o neutralizado en su sumidero. (Por ejemplo, las aguas residuales pueden verterse en una corriente de agua superficial, un lago o un acuífero subterráneo de modo sostenible a un ritmo no mayor al que las bacterias y otros organismos pueden absorber sus nutrientes sin desbordar y desestabilizar a su vez el ecosistema acuático.)

Toda actividad que hace que disminuyan las existencias de recursos renovables, que suba de nivel un sumidero de contaminación o que las existencias de recursos no renovables descendan sin ninguna sustitución renovable a la vista, no puede sostenerse. Pronto o tarde, esta actividad deberá refrenarse. En muchos debates sobre las reglas de Daly —en círculos académicos, empresariales, gubernamentales y cívicos— no hemos oído nunca a nadie ponerlas en tela de juicio. (Tampoco nos hemos encontrado apenas con alguien que tratara seriamente de vivir de conformidad con ellas.) Si existen leyes básicas de la sostenibilidad, dichas reglas tienen que figurar entre ellas. La cuestión no es saber si son correctas, sino si la economía mundial las respeta y qué sucede si no lo hace.

Utilizaremos los tres criterios de Daly para estudiar someramente varias fuentes y sumideros usados en la

economía humana. Empezando por los recursos renovables, preguntamos: *¿Están utilizándose con mayor rapidez que la velocidad a la que se regeneran?* Con respecto a los recursos no renovables, cuyas reservas por definición tienen que disminuir, preguntamos: *¿Con qué rapidez se consumen los materiales de alta calidad? ¿Cómo evoluciona el coste real de la energía y el capital necesarios para suministrarlos?* Finalmente, nos centraremos en los contaminantes y residuos y preguntamos: *¿Son neutralizados con la suficiente rapidez o se acumulan en el medio ambiente?*

Estas preguntas han de contestarse no con el modelo World3 (nada en este capítulo depende de este modelo), sino con los datos globales, en la medida en que existan, fuente por fuente, sumidero por sumidero<sup>2</sup>. En este capítulo sólo mencionaremos algunas pocas de las numerosas interacciones de una fuente o sumidero con otro (por ejemplo, el hecho de cultivar más alimentos absorbe más energía, o de que la contaminación derivada de la producción de más energía puede cambiar el clima y afectar a las cosechas agrícolas).

Los límites que examinamos aquí figuran entre los que actualmente los científicos del mundo conocen bien. No hay garantías de que de hecho sean los más importantes. Nos esperan sorpresas, agradables y desagradables. No cabe duda de que las tecnologías que mencionamos aquí mejorarán en el futuro; no obstante, somos conscientes de que aparecerán nuevos problemas que en estos momentos son absolutamente desconocidos.

Entramos en algunos detalles con respecto al estado y las perspectivas de las necesidades físicas del planeta. Nuestro análisis no permitirá formarnos una idea simple e inequívoca de dónde se halla la humanidad en relación con los límites del crecimiento. Pero nos ayuda-

rá a comprender la realidad de los límites y el efecto de las políticas actuales en ellos. Incluso después de tener en cuenta las actuales lagunas de la comprensión humana de los límites, pensamos que los datos presentados en este capítulo convencerán al lector de la certeza de cuatro conclusiones:

- La economía humana está utilizando actualmente muchos recursos críticos y produciendo residuos a un ritmo que no es sostenible. Se agotan las fuentes. Los sumideros se llenan y en algunos casos se desbordan. La mayoría de los flujos de producción no podrán mantenerse a largo plazo ni siquiera con sus caudales actuales, por no decir si se incrementan. Prevemos que muchos de ellos tocarán techo y luego descenderán en este siglo.
- Estas elevadas tasas de producción no son necesarias. Mediante cambios técnicos, distributivos e institucionales podrían reducirse en gran medida manteniendo al mismo tiempo, e incluso mejorando, la calidad de vida media de la población mundial.
- La carga humana sobre el medio ambiente natural ya ha superado los niveles sostenibles y no puede mantenerse durante más de una generación o dos. Debido a ello ya aparecen muchos efectos negativos en la salud y la economía humanas.
- El coste real de los materiales aumenta.

El concepto de carga humana sobre el medio ambiente es demasiado complejo y difícil de cuantificar. El mejor enfoque actual, que utilizamos aquí, es la noción de huella ecológica. Este concepto se refiere al impacto total de la humanidad en la naturaleza: la suma de todos los efectos de la extracción de recursos, la emisión de contaminantes, el consumo de energía, la destruc-

ción de la biodiversidad, la urbanización y las demás consecuencias del crecimiento físico. Es un concepto difícil de medir, pero a lo largo de la última década se han hecho grandes avances, y no cabe duda de que continuarán.

Un enfoque prometedor, mencionado en el prólogo, es el de convertir todas las demandas humanas sobre el ecosistema en el número equivalente de hectáreas de terreno necesarias para sostener el «servicio ecológico prestado» por tiempo indefinido. Hay un número finito de hectáreas de terreno en la Tierra. Por tanto, este enfoque aporta una respuesta a la pregunta de si la humanidad supera la oferta disponible de recursos. La figura P-1 en el prólogo indica que la respuesta es afirmativa. De acuerdo con este método de medición basado en la huella ecológica, al comienzo del nuevo milenio la humanidad precisaba una extensión 1,2 veces mayor que la cantidad de tierras disponible en el planeta Tierra. En suma, la humanidad se hallaba un 20 % por encima del límite global. Por fortuna, hay muchas maneras de aliviar la situación, de volver a los límites y satisfacer las necesidades y esperanzas humanas de una forma mucho más sostenible. En las páginas que siguen comentaremos muchas de estas vías<sup>1</sup>.

## Fuentes renovables

### ALIMENTOS, TIERRAS, SUELO

La mayor parte de la tierra agrícola de alta calidad ya se dedica a la producción y los costes ambientales de la conversión de los hábitats de los bosques, los pastos y los humedales en tierras cultivables son perfectamente conocidos... Buena parte del suelo que queda es menos productivo y más frágil. [...] Un

análisis de la erosión mundial del suelo indica que, según la región, actualmente se pierde la tierra vegetal a un ritmo 16 a 300 veces más rápido que la velocidad a que puede recuperarse.

WORLD RESOURCES INSTITUTE, 1998

Entre 1950 y 2000, la producción mundial de cereales se ha triplicado con creces, de unas 590 a más de 2.000 millones de toneladas métricas al año. De 1950 a 1975 se había incrementado en promedio un 3,3 % anual, más rápidamente que el 1,9 % anual del crecimiento de la población (figura 3-2). Pero durante las últimas décadas, la tasa de incremento de la producción de cereales se ha desacelerado hasta resultar inferior a la tasa de crecimiento de la población. La producción de cereales per cápita alcanzó su punto máximo hacia 1985 y desde entonces no ha dejado de bajar<sup>4</sup>.

Sin embargo, todavía hay bastantes alimentos, al menos en teoría, para alimentar suficientemente a todo el mundo. La cantidad total de cereales producidos en el mundo alrededor del año 2000 podía mantener en vida a 8.000 millones de personas en el nivel de subsistencia, siempre y cuando se distribuyera equitativamente, no se alimentara con esos cereales a los animales y no se perdiera a causa de las plagas o la putrefacción entre la cosecha y el consumo. Los cereales constituyen más o menos la mitad de la producción agrícola mundial (medida en calorías). Si añadimos la producción anual de tubérculos, hortalizas, frutas, pescado y productos animales criados en los pastos y no con cereales, habría suficiente para dar a la población de comienzos del milenio, que sumaba 6.000 millones, una dieta variada y saludable<sup>5</sup>.

Las pérdidas reales después de la cosecha varían según el tipo de cultivo y el lugar, y oscila entre el 10 y

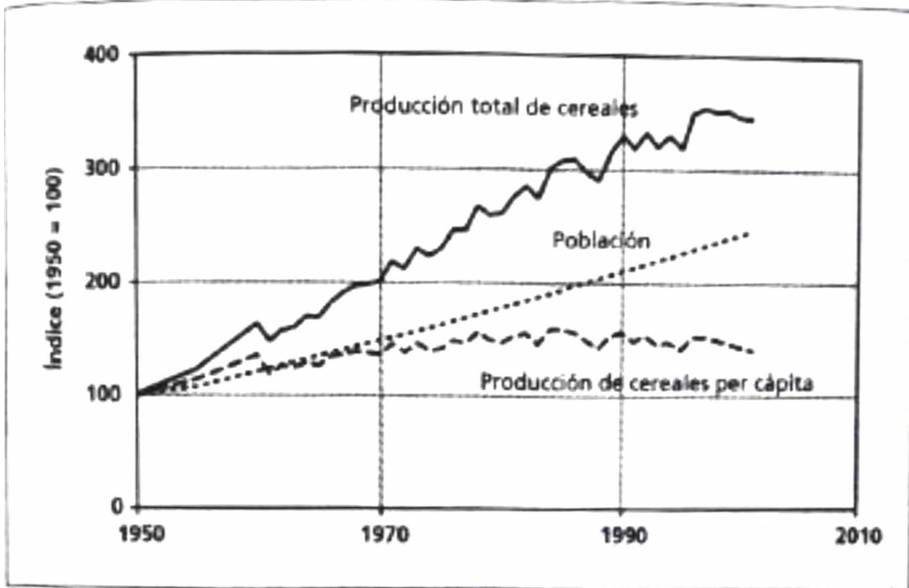


Figura 3-2 Producción mundial de cereales

Los agricultores del mundo produjeron en el año 2000 más de tres veces tantos cereales como en 1950. Sin embargo, debido al crecimiento de la población, la producción per cápita alcanzó un punto máximo a mediados de la década de 1980 y desde entonces viene descendiendo ligeramente. Aun así, la producción de cereales per cápita es actualmente un 40 % superior a la de 1950. (Fuentes: FAO; PRB.)

el 40 %<sup>6</sup>. La distribución de los alimentos está lejos de ser equitativa, y buena parte del cereal se emplea para alimentar animales, y no personas. De este modo, mientras teóricamente hay alimentos suficientes, el hambre persiste. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) calcula que unos 850 millones de personas ingieren crónicamente menos de lo que sus cuerpos necesitan<sup>7</sup>.

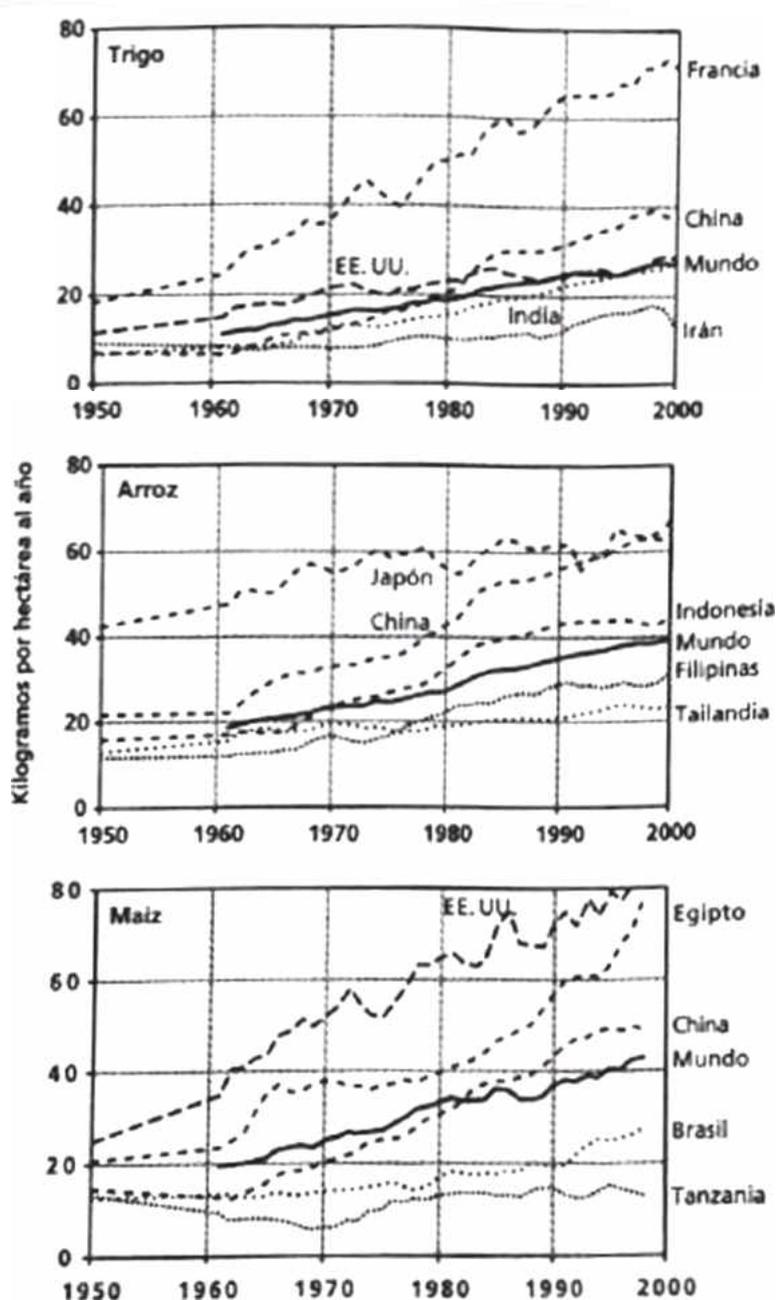
Estas personas hambrientas son sobre todo mujeres y niños. En los países en desarrollo, uno de cada tres niños sufre malnutrición<sup>8</sup>. Unos 200 millones de personas en India están crónicamente hambrientas; más de 200 millones en África, 40 millones en Bangladesh, 15 millones en Afganistán<sup>9</sup>. Más o menos 9 millones de personas mueren cada año por causas relacionadas con el

hambre. Esto equivale a un promedio de 25.000 muertes al día.

Hasta ahora, el número de personas hambrientas se ha mantenido más o menos constante a medida que ha crecido la población. La cifra anual estimada de muertes por inanición ha descendido lentamente. Es un logro sorprendente. En un mundo en que crece la población y los límites apremian, el hambre no se agrava. Pero sigue habiendo bolsas de hambre desesperada y zonas más extensas de malnutrición crónica.

El hambre no persiste a causa de los límites físicos del planeta, o en todo caso todavía no. Sería posible producir más alimentos. Por ejemplo, la figura 3-3 muestra las tendencias del volumen de producción de cereales en varios países y en el mundo. Debido a las diferencias entre suelos y climas, no es de esperar que cada hectárea de terreno rinda tanto como las mejores cosechas conocidas de los lugares más favorables. Pero sin duda sería posible incrementar el rendimiento en muchos terrenos con técnicas bien conocidas y ampliamente utilizadas.

En un estudio exhaustivo de los suelos y climas de 117 países de América Latina, África y Asia, la FAO calculó que solamente 19 de esos países *no* serían capaces de alimentar a sus poblaciones del año 2000 con el producto de sus tierras aunque pudieran aprovechar cada hectárea potencialmente cultivable y obtener los rendimientos más altos técnicamente posibles. Según dicho estudio, si todas las tierras cultivables se dedicaran a la producción de alimentos, si no hubiera pérdidas por erosión, si el clima fuera adecuado y la gestión perfecta, y si no hubiera trabas al uso de los insumos agrícolas, los 117 países examinados podrían multiplicar su producción de alimentos por un factor de 16<sup>o</sup>.



*Figura 3-3 Rendimiento de la producción de cereales*

El rendimiento de la producción de trigo, arroz y maíz es elevado en el mundo industrializado. En algunos países en vías de industrialización, como China, Egipto e Indonesia, crece con suma rapidez. En otros países menos industrializados, el rendimiento sigue siendo muy bajo, aunque cuentan con un notable potencial de mejora. (Para compensar las variaciones anuales del clima, los rendimientos indicados en estos gráficos se han promediado por intervalos trienales.) (Fuente: FAO.)

Desde luego, estos supuestos carecen en gran medida de realismo. Dada la climatología y las prácticas agrícolas actuales, dada la necesidad de utilizar el terreno para fines distintos de la producción de alimentos (por ejemplo, para bosques, pastos, asentamientos humanos, protección de cuencas hidrográficas, defensa de la biodiversidad) y dados los problemas de la filtración de fertilizantes y plaguicidas, los límites prácticos de la producción de alimentos son notablemente más bajos que los límites teóricos. De hecho, como hemos visto, la producción de cereales per cápita ha venido descendiendo desde 1985.

El período posterior a la Segunda Guerra Mundial ha conocido un notable crecimiento de la producción y la productividad agrícolas en el mundo en desarrollo. Mientras que en muchas zonas rurales este crecimiento ha sido aparentemente sostenible, en otras se ha derivado de dos procesos insostenibles: la roza de nuevas tierras de menor potencial productivo o de mayor vulnerabilidad y la intensificación de la producción mermando o destruyendo la base del recurso edáfico<sup>11</sup>.

El límite más patente es el terreno<sup>12</sup>. Los cálculos de la superficie de tierra potencialmente cultivable en el planeta oscilan entre dos y cuatro mil millones de hectáreas, en función de lo que se considere *cultivable*. Realmente se explotan más o menos 1.500 millones de hectáreas, una extensión que se ha mantenido casi constante durante tres decenios. Los aumentos de la producción de alimentos se han derivado casi en su totalidad de los incrementos del rendimiento, no de la expansión neta de los terrenos. Pero esto no significa que la extensión de tierras cultivadas se mantenga inamovible: continuamente se utilizan nuevas tierras de cultivo, mientras que otros terrenos antes cultivados se

pierden debido a la erosión, la salinización, la urbanización y la desertificación. Hasta ahora, las pérdidas han compensado más o menos las nuevas incorporaciones, si no en calidad, al menos en extensión. Puesto que normalmente las tierras mejores se habilitan primero, los suelos que antes eran excelentes se degradan mientras que la producción se traslada a tierras más marginales<sup>13</sup>.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente calculó en 1986 que a lo largo de los últimos mil años los humanos han convertido unos 2.000 millones de hectáreas de tierras cultivables productivas en eriales<sup>14</sup>. Esto es más que la extensión total cultivada actualmente. Unos 100 millones de hectáreas de tierras de regadío se han perdido debido a la salinización, y otros 110 millones experimentan una pérdida de productividad. El ritmo de pérdida de humus se acelera, de 25 millones de toneladas al año antes de la Revolución Industrial a 300 millones de toneladas al año en el curso de los últimos siglos y 760 millones de toneladas al año durante los últimos cincuenta años<sup>15</sup>. Esta pérdida de humus no sólo erosiona la fertilidad del suelo, sino que contribuye asimismo a la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera.

En 1994 se publicó la primera evaluación mundial de la pérdida de suelo basada en estudios comparativos a cargo de varios cientos de expertos regionales. Su conclusión es que el 38 % (562 millones de hectáreas) de la tierra agrícola explotada actualmente se ha degradado (más un 21 % de los pastos permanentes y un 18 % de la superficie forestal)<sup>16</sup>. El grado de degradación es de moderado a grave.

No hemos podido hallar cifras mundiales de conversión de tierras agrícolas en carreteras y asentamientos, pero la pérdida tiene que ser sustancial. Se calcula que la

ciudad de Yakarta se expande sobre tierras cultivables a un ritmo de 20.000 hectáreas al año. Vietnam ha venido perdiendo 20.000 hectáreas al año de arrozales debido a la urbanización. Tailandia convirtió 34.000 hectáreas de terreno agrícola en campos de golf entre 1989 y 1994. China perdió 6,5 millones de hectáreas de tierras cultivables debido a la urbanización entre 1987 y 1992, aunque en ese mismo período convirtió 3,8 millones de hectáreas de bosques y pastos en tierras de cultivo. En Estados Unidos se asfaltan unas 170.000 hectáreas de terreno cultivable al año<sup>17</sup>.

Debido a esta evolución se reducen dos fuentes renovables. La primera es la calidad (profundidad, contenido de humus, fertilidad) de los suelos en las tierras de cultivo. Durante mucho tiempo, esta pérdida puede no repercutir en la producción de alimentos, ya que los nutrientes del suelo pueden sustituirse por nutrientes de los fertilizantes químicos<sup>18</sup>. Los fertilizantes enmascararán los signos del abuso del suelo, pero no por tiempo indefinido. Constituyen a su vez un insumo insostenible en el sistema agrícola, pues retrasan la percepción de los signos que reflejan la fertilidad del suelo, una de las características estructurales que conducen a la extralimitación.

La segunda fuente explotada de forma insostenible es la propia tierra. Si millones de hectáreas se degradan y abandonan mientras la superficie cultivada se mantiene más o menos constante, esto tiene que significar por fuerza que la reserva de tierra potencialmente cultivable (en su mayor parte de carácter forestal, como veremos más adelante en este capítulo) está disminuyendo al tiempo que crece la extensión de los eriales improductivos. El flujo de alimentos que sostiene a la población humana se produce desplazando continuamente los cultivos a nuevos terrenos, dejando atrás suelos exhaustos,

salados, erosionados o asfaltados. Está claro que esta práctica no puede continuar eternamente.

Si la población crece exponencialmente y la extensión de la tierra cultivada se ha mantenido más o menos constante, quiere decir que la superficie cultivada por persona descende. En efecto, ha disminuido de 0,6 hectáreas por persona en 1950 a 0,25 hectáreas por persona en 2000. Sólo ha sido posible seguir alimentando a una población creciente con menos hectáreas por persona porque se ha incrementado el rendimiento. Una hectárea de cultivo de arroz arrojó en promedio 2 toneladas al año en 1960 y 3,6 toneladas en 1995, con rendimientos máximos, en condiciones de parcela experimental, de 10 toneladas. El rendimiento del maíz en Estados Unidos subió en promedio de 5 toneladas por hectárea en 1967 a más de 8 en 1997, logrando los agricultores más productivos, en los mejores años, hasta 20 toneladas.

¿Qué indican todos estos datos acerca de la futura escasez potencial de tierra agrícola? La figura 3-4 (p. 130) ilustra varias proyecciones al respecto para este siglo. Refleja la interrelación entre la tierra cultivada total, el crecimiento de la población, el rendimiento medio y el nivel de dieta.

La franja sombreada indica la cantidad total de tierra cultivable que media entre los 1.500 millones de hectáreas actuales y el límite superior teórico de 4.000 millones de hectáreas. Las tierras de la parte más alta de la franja sombreada serán mucho menos productivas que las de la parte baja. Desde luego, es posible que disminuya el total de tierra cultivada, pero en la figura 3-4 partimos de la premisa de que no se pierden más tierras. En cada proyección suponemos además que la población mundial crecerá de acuerdo con las previsiones medianas de Naciones Unidas.

No cabe duda de que las mejoras del rendimiento tardan más en llegar y son más costosas. En 1999, algunos expertos agrícolas estadounidenses ya mostraban su inquietud ante un «techo de rendimiento»<sup>19</sup>. La erosión, el cambio climático, el coste de los combustibles fósiles, el descenso del nivel de los acuíferos y otros factores también podrían rebajar el rendimiento con respecto a los niveles actuales, pero en la figura 3-4 supondremos que el rendimiento se mantendrá o duplicará en el curso de este siglo.

Es una pauta llamativa. Aumento constante en promedio, pero en lo más alto –lo mejor de lo mejor– no parece que los rendimientos de la producción de maíz hayan variado en veinticinco años. El rendimiento anual medio del maíz sigue creciendo a razón de 90 kg/ha, pero la inversión en la investigación sobre el cultivo de maíz se ha cuadruplicado. Cuando cada paso adelante resulta más difícil, es señal de que la rentabilidad disminuye.

KENNETH S. CASSMAN, 1999

No se me ocurre nada convincente para indicar de dónde vendrá el aumento [del rendimiento] en el próximo medio siglo.

VERNON RUTTAN, 1999

Estos rendimientos máximos de la producción de arroz no han variado en treinta años. Hemos llegado al techo en biomasa, y esto no tiene ninguna respuesta fácil.

ROBERT S. LOOMIS, 1999

En el supuesto de que se mantengan los niveles de rendimiento actuales, la línea A proyecta las hectáreas de tierra necesarias para alimentar a la población en un

nivel equivalente al promedio de Europa Occidental en el año 2000. La línea B muestra las necesidades de tierra para sostener la dieta actual, insuficiente, de la población mundial a lo largo de todo este siglo. Partiendo del supuesto de que se duplique el rendimiento, la línea C proyecta las hectáreas de tierra que se precisarían para alimentar a la población mundial en un nivel equivalente al promedio de Europa Occidental en el año 2000. La línea D muestra, para dicho supuesto, las necesidades de tierra para sostener la dieta actual, insuficiente, de la población mundial durante todo este siglo.

En la figura 3-4 podemos ver con qué rapidez el crecimiento exponencial de la población puede conducir al mundo de la abundancia a la escasez de tierras de labranza.

Pero la figura 3-4 también muestra cuántas respuestas adaptativas podrían existir, en función de la resistencia de la base del recurso y de la flexibilidad técnica y social del género humano. Si no se perdieran más terrenos, si los rendimientos pudieran duplicarse a escala mundial, si se lograra recuperar las tierras degradadas, entonces cada una de las 6.000 millones de personas de hoy tendría alimento suficiente, del mismo modo que las casi 9.000 millones proyectadas para mediados del siglo XXI. Pero si aumenta la erosión, si no pueden mantenerse los caudales de regadío, si la roza o la recuperación de tierras resultan demasiado costosas, si una nueva duplicación del rendimiento medio mundial es demasiado difícil o peligrosa para el medio ambiente y si el crecimiento de la población no se modera de acuerdo con las previsiones de la ONU, la alimentación podrá verse gravemente limitada, no sólo a escala local, sino en todo el mundo, y en un plazo relativamente corto. La escasez parecería repentina, pero no sería más que una continuación de tendencias exponenciales.

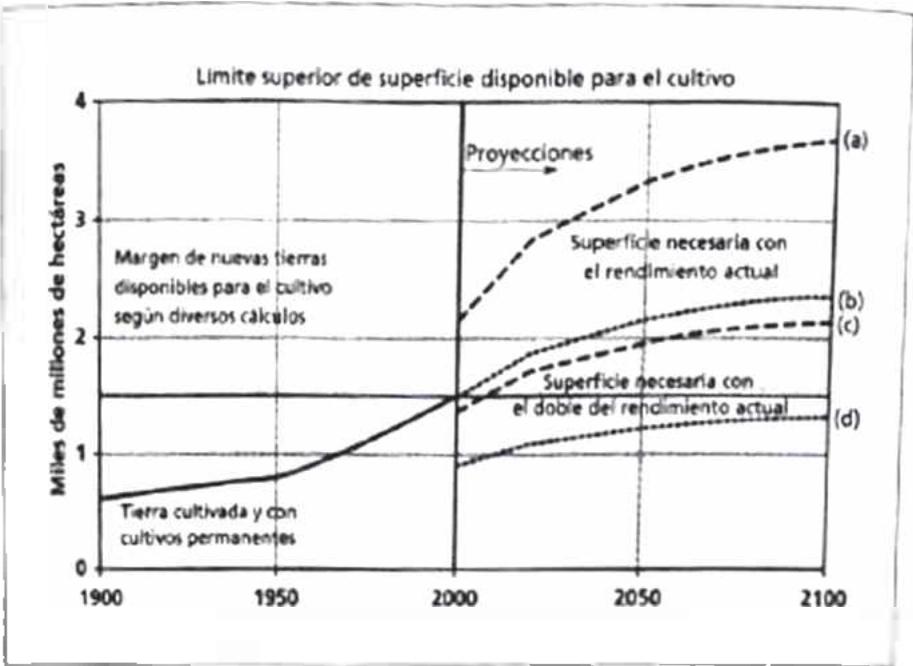


Figura 3-4 Posibles futuros de la tierra agrícola

La extensión de la tierra cultivable en el siglo XXI se situará probablemente entre 1.500 y 4.000 millones de hectáreas, representada por la franja superior sombreada. Se supone en este caso que el crecimiento de la población se ajustará a la proyección mediana de la ONU. Las proyecciones más allá del año 2000 muestran la superficie de tierra necesaria para la producción de alimentos con el rendimiento actual por hectárea y con el doble del rendimiento actual para mantener los actuales niveles de dieta y para lograr una nutrición media mundial equivalente a la de un europeo occidental típico en el año 2000. (Fuentes: ONU, FRB, FAO, G. M. Higgins y cols.)

El uso insostenible de la base de los recursos agrícolas es consecuencia de numerosos factores, incluidos la pobreza y la desesperación, la expansión de los asentamientos humanos, la sobreexplotación de pastos y cultivos, la ignorancia, la incentivación económica de la producción a corto plazo en lugar de la buena administración a largo plazo y gestores que entienden demasiado poco de ecología, especialmente de los subsistemas edáficos.

Existen otros límites de la producción de alimentos

aparte del suelo y las tierras, entre ellos el agua (de la que hablaremos en próximas páginas), la energía y las fuentes y sumideros de los productos agroquímicos<sup>20</sup>. En ciertas partes del mundo, algunos de estos límites ya se han rebasado. Los suelos se erosionan, la irrigación rebaja el nivel de los acuíferos, las escorrentías de los campos de labranza contaminan las aguas de superficie y subterráneas. Por ejemplo, los grandes cuerpos acuáticos del mundo contienen 61 importantes zonas muertas, donde los efluentes nutritivos, principalmente fertilizantes y suelos erosionados, han acabado prácticamente con toda vida acuática. Algunas se mantienen durante todo el año, otras se limitan al verano, después de que las escorrentías de primavera arrastran los residuos de fertilizantes de las tierras de cultivo situadas río arriba. La zona muerta del Mississippi abarca 21.000 kilómetros cuadrados, el equivalente al tamaño del estado de Massachusetts<sup>21</sup>. Las prácticas agrícolas que provocan trastornos ecológicos de tal calibre no son sostenibles. Y tampoco son necesarias.

En muchas regiones no hay erosión del suelo, no se abandonan tierras y los productos químicos no contaminan el suelo y el agua. Los métodos de cultivo que conservan y mejoran los suelos —como los bancales, el arado en curvas de nivel, el compostaje, los cultivos de cobertura, el policultivo y la rotación de cultivos— se conocen y emplean desde hace siglos. Otros métodos particularmente aplicables en los trópicos, como el cultivo en callejones y la agrosilvicultura, demuestran sus ventajas en centros experimentales y explotaciones agrícolas<sup>22</sup>. En tierras de todo tipo, tanto en zonas templadas como tropicales, se obtienen altos rendimientos de forma sostenible sin el empleo a gran escala de fertilizantes y plaguicidas, en muchos casos sin *ningún* fertilizante o plaguicida sintético.

Centremos nuestra atención en la expresión *altos rendimientos*. Es un hecho bien documentado que los agricultores «biológicos» no necesitan ser primitivos o retroceder a los métodos de cultivo y la baja productividad de hace cien años. La mayoría de ellos emplean variedades de alto rendimiento, máquinas que ahorran mano de obra y sofisticados métodos ecológicos de abono y control de plagas. Sus rendimientos suelen ser equivalentes a los de sus vecinos que utilizan productos químicos, pero sus beneficios suelen ser mayores<sup>23</sup>. Si se dedicara siquiera una fracción de la investigación en torno a los insumos químicos y la modificación genética a los métodos de cultivo biológico, la agricultura biológica sería incluso más productiva.

En comparación con los métodos de cultivo convencionales altamente intensivos, las alternativas «biológicas» pueden mejorar la fertilidad del suelo y tienen menos efectos perjudiciales para el medio ambiente. Estas alternativas también pueden dar rendimientos equivalentes a los obtenidos con métodos convencionales<sup>24</sup>.

La agricultura sostenible no sólo es posible, sino que ya se practica en algunos lugares. Millones de agricultores de todo el mundo emplean técnicas agrícolas ecológicamente sanas y descubren que al invertirse la degradación del suelo, el rendimiento sigue aumentando. Los consumidores, al menos en el mundo rico, piden cada vez más alimentos producidos de esta manera y están dispuestos a pagar un precio mayor por ellos. En Estados Unidos y en Europa el mercado de productos biológicos creció en la década de 1990 al ritmo de un 20 al 30 % anual. En 1998, las ventas de alimentos y bebidas procedentes del cultivo biológico en los principales mercados del mundo ascendieron a 13.000 millones de dólares<sup>25</sup>.

¿Por qué no hemos mencionado la promesa de los organismos modificados genéticamente? Porque el veredicto sobre esta tecnología todavía está pendiente; en realidad, es objeto de una profunda controversia. No está claro si la ingeniería genética es necesaria para alimentar al mundo ni si es sostenible. No hay hambre porque haya demasiados pocos alimentos que comprar; hay hambre porque mucha gente no puede permitirse comprar alimentos. Producir mayores cantidades de alimentos de alto coste no les servirá de nada. Y si bien la ingeniería genética podría incrementar los rendimientos, existen muchísimas oportunidades todavía no aprovechadas de incrementarlos –sin manipulaciones genéticas– que son de alta tecnología (y por tanto inaccesibles para el agricultor normal) y ecológicamente arriesgadas. El auge de los cultivos biotecnológicos ya está provocando reacciones contrarias de ecologistas, agricultores y consumidores<sup>26</sup>.

Todo el mundo podría alimentarse de modo más que suficiente con el volumen de alimentos que se producen actualmente. Y sería posible producir todavía más. Se podría hacer con mucha menos contaminación, en una superficie menor, utilizando menos energía fósil, con lo que millones de hectáreas podrían devolverse a la naturaleza o utilizarse para la producción de fibras, forraje o energía. Esto podría hacerse de un modo que compensara suficientemente a los agricultores por alimentar al mundo. Pero hasta ahora ha faltado en gran medida la voluntad política de alcanzar estos resultados. La realidad actual es que en muchas partes del mundo disminuyen las fuentes de alimentos –suelo, terrenos, nutrientes–, del mismo modo que las economías y comunidades agrarias. En estos lugares, dadas las prácticas al uso, la producción agrícola ha superado muchos tipos de límites. A menos que se introduzcan

cambios rápidos –cambios que son perfectamente posibles–, la creciente población humana tendrá que intentar alimentarse con menos agricultores obligados a utilizar una base cada vez menor del recurso agrícola.

#### AGUA

En muchos países, tanto en desarrollo como desarrollados, las modalidades actuales de uso del agua son en muchos casos insostenibles. [...] El mundo se enfrenta a una serie de problemas locales y regionales cada vez más graves en relación con la cantidad y la calidad del agua. [...] Las restricciones del recurso hídrico y la degradación del agua están debilitando las bases de recursos en que se fundamenta la sociedad humana.

#### EVALUACIÓN GENERAL DE LOS RECURSOS DE AGUA DULCE, ONU, 1997

El agua dulce no es un recurso mundial. Tiene carácter regional, pues está disponible en cuencas concretas, de modo que los límites adoptan diferentes formas. En algunas cuencas los límites son estacionales, en función de la capacidad de almacenar agua para los períodos secos. En otros lugares, los límites vienen determinados por los ritmos de recuperación de los acuíferos, la velocidad de fusión de la nieve o la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos forestales. Puesto que el agua no sólo es una fuente, sino también un sumidero, sus usos pueden verse limitados asimismo por el grado de contaminación que sufren río arriba o en el subsuelo.

La naturaleza intrínsecamente regional del recurso acuático no impide que se formulen consideraciones de carácter global sobre él, consideraciones que reflejan una inquietud cada vez más profunda. El agua es el re-

curso menos sustituible y más esencial. Sus limitaciones restringen otros caudales necesarios, como los de alimentos, energía, peces y la flora y fauna silvestres. La extracción de otros caudales productivos –alimentos, minerales y productos forestales– puede limitar todavía más la cantidad o calidad del agua. En un número creciente de cuencas hidrográficas de todo el mundo, los límites ya se han rebasado indiscutiblemente. En algunas de las economías más pobres y más ricas, las extracciones de agua per cápita descienden a causa de las preocupaciones ecológicas, del aumento de costes o de la escasez.

La figura 3-5 es únicamente ilustrativa, pues se trata de un resumen global de muchas cuencas regionales. No obstante, podríamos trazar un gráfico similar para cada región con las mismas características generales: un límite, una serie de factores que pueden ampliar o reducir el límite, la aproximación al límite o en algunos lugares la extralimitación.

La parte superior del gráfico representa el límite físico máximo del uso humano del agua, el caudal total anual de los ríos del mundo (incluida la recarga de todos los acuíferos subterráneos). Ésta es la fuente renovable de la que se extraen prácticamente todos los insumos de agua dulce para la economía humana. Es una cantidad enorme de agua: 40.700 kilómetros cúbicos al año, suficientes para llenar los cinco Grandes Lagos de Norteamérica cada cuatro meses. Parece, en efecto, que es un límite muy lejano, dado que las captaciones de agua actuales por los humanos apenas superan un décimo de este volumen: 4.430 kilómetros cúbicos al año<sup>27</sup>.

En la práctica, sin embargo, toda esta escorrentía de agua dulce no puede aprovecharse. Gran parte es estacional: nada menos que 29.000 kilómetros cúbicos al

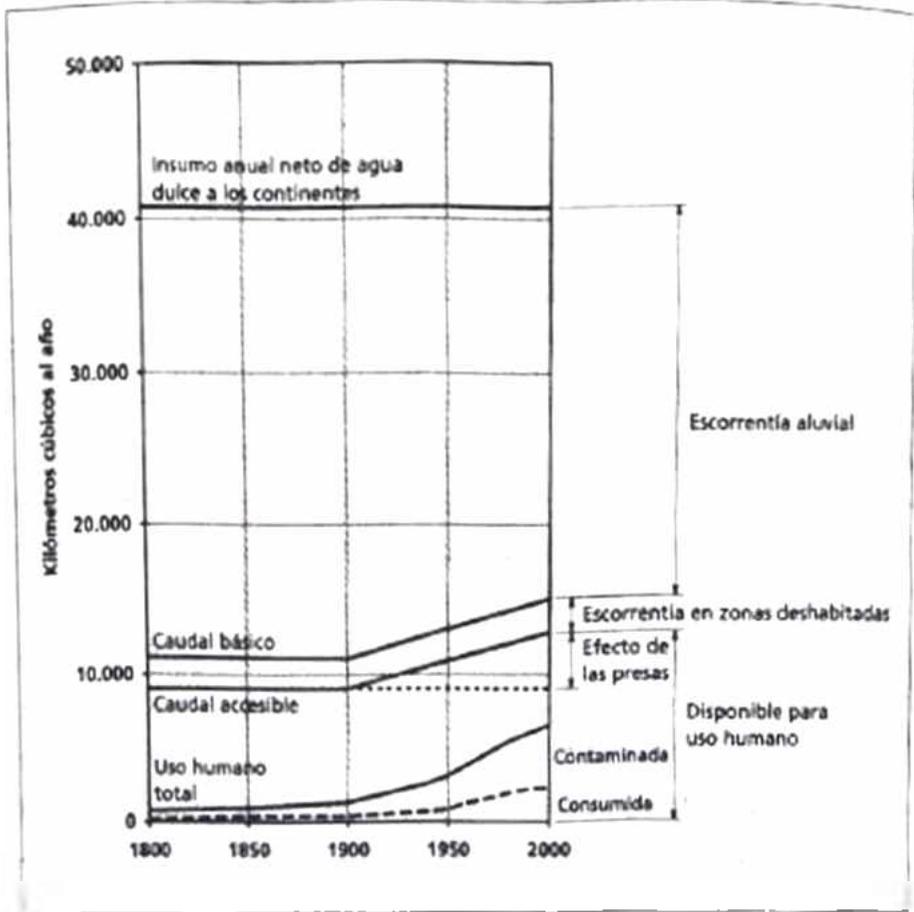


Figura 3-5 Recursos de agua dulce

El gráfico que representa la oferta y uso mundial de agua dulce muestra con qué rapidez el aumento del consumo y la contaminación pueden acercarse al volumen total de agua accesible, y también lo importante que ha sido la construcción de presas para estabilizar la oferta. (Fuentes: P. Gleick; S. L. Postel y cols.; D. J. Bogue; ONU.)

año fluyen al mar por las torrenceras. Por tanto, sólo quedan 11.000 kilómetros cúbicos que constituyen un recurso disponible durante todo el año, y que consisten en la suma de los flujos básicos de recarga de los ríos y acuíferos.

La figura 3-5 muestra que los humanos incrementan este límite de escorrentía construyendo presas para atrapar el agua aluvial. A finales del siglo xx, las presas habían incrementado la escorrentía utilizable en unos 3.500 kilómetros cúbicos anuales<sup>28</sup>. (Las presas inun-

dan tierras, por supuesto, y en muchos casos tierras agrícolas de primera calidad. Y generan electricidad. También incrementan la evaporación de la cuenca fluvial, reduciendo la escorrentía neta y alterando los ecosistemas perifluviales y acuáticos. Pronto o tarde se encenagan y quedan inutilizadas, de modo que dejan de ser una fuente sostenible; generan otro desfase a muy largo plazo —con muchos efectos secundarios positivos y negativos— de las señales procedentes de los límites.)

Existen otras maneras, aparte de las presas, para elevar el límite de agua, como la desalación de agua de mar o el transporte de agua a larga distancia. Estos cambios pueden ser importantes a escala local, pero son actividades de alta intensidad energética y costosas. De momento son demasiado reducidas para poder quedar reflejadas en un gráfico de escala mundial<sup>29</sup>.

No todo el caudal disponible se halla en zonas habitadas. La cuenca del Amazonas representa el 15 % de la escorrentía mundial, pero sólo alberga al 0,4 % de la población del planeta. Los ríos del extremo septentrional de Norteamérica y Eurasia conducen 1.800 kilómetros cúbicos al año en regiones en que vive muy poca gente. La escorrentía estable no fácilmente accesible a los humanos suma unos 2.100 kilómetros cúbicos al año.

Los 11.000 kilómetros cúbicos de caudal sostenible, más 3.500 añadidos por las presas, menos 2.100 que son inaccesibles, dejan 12.400 kilómetros cúbicos al año de caudal sostenible accesible. Éste es el límite superior previsible de la oferta de agua dulce renovable disponible para el uso humano<sup>30</sup>.

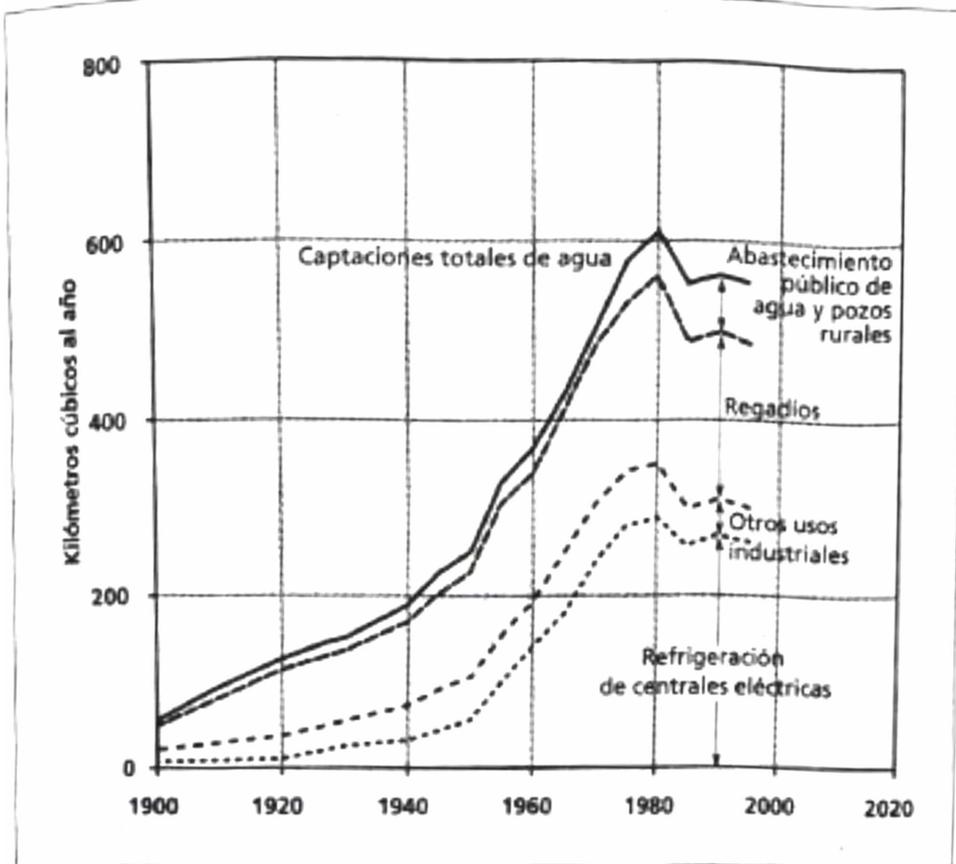
La captación consuntiva humana (agua extraída pero no revertida a los ríos o acuíferos porque se evapora o se incorpora a los cultivos o productos) asciende a 2.290 kilómetros cúbicos al año. Otros 4.490 ki-

lómetros cúbicos se emplean primariamente para diluir y evacuar la contaminación. Estas dos categorías de uso suman 6.780 kilómetros cúbicos al año, justo más de la mitad de la esorrentía total disponible de agua dulce.

¿Significa esto que hay margen para una nueva duplicación del uso de agua? ¿Es probable que se produzca otra duplicación?

Si la demanda media per cápita no variara en absoluto y la población humana creciera hasta 9.000 millones de aquí al año 2050, como prevé actualmente la ONU, los humanos extraerían 10.200 kilómetros cúbicos al año, el 82 % de la esorrentía mundial sostenible de agua dulce. Si no sólo creciera la población, sino también la demanda per cápita, habría graves restricciones globales de agua mucho antes del año 2100. A lo largo del siglo xx, las extracciones de agua aumentaron alrededor de dos veces más rápidamente que la población<sup>31</sup>. Pero con el aumento de la escasez es probable que el consumo per cápita se estabilice e incluso disminuya. La curva de captación ya está empezando a aplanarse notablemente y en algunos lugares incluso a descender. El uso de agua a escala mundial sólo llega a la mitad de lo que se predecía sobre la base de la extrapolación de las curvas exponenciales de hace treinta años<sup>32</sup>.

Después de duplicarse aproximadamente cada veinte años durante el siglo xx, las captaciones de agua en Estados Unidos alcanzaron el punto máximo alrededor de 1980 y desde entonces han descendido más o menos un 10 % (figura 3-6). Las razones de este descenso son numerosas, todas ellas de interés cuando nos preguntamos qué ocurre cuando las economías empiezan a chocar con los límites del agua. El uso industrial ha caído un 40 %, en parte a causa de la exportación de la industria pesada a otras partes del mundo, pero tam-



*Figura 3-6 Uso de agua en Estados Unidos*

Las captaciones de agua en Estados Unidos crecieron desde comienzos del siglo XX hasta la década de 1980 a un ritmo medio del 3 % anual. Desde entonces, han disminuido ligeramente y se han estabilizado. (Fuente: P. Gleick.)

bién en virtud de la normativa sobre la calidad del agua, que ha hecho que el uso eficiente, el reciclado y el tratamiento antes del vertido sea económicamente atractivo o legalmente preceptivo (o ambas cosas a la vez). El uso para la irrigación ha descendido en parte debido al aumento de la eficiencia y también porque municipios en expansión han comprado agua quitándosela a los agricultores (o retirando de este modo tierras de la producción de alimentos). El uso municipal ha aumentado, pero sólo en función del crecimiento de la población. El consumo per cápita ha descendido, particularmente en las zonas áridas del país, donde el aumento del pre-

cio del agua ha favorecido la instalación de sistemas domésticos más eficientes<sup>33</sup>.

Puede que la captación per cápita de agua en Estados Unidos haya descendido, pero sigue siendo muy alta con sus 1.500 metros cúbicos por persona y año. El ciudadano medio del mundo en vías de desarrollo solamente utiliza un tercio de esta cifra; el africano subsahariano medio, tan sólo un décimo<sup>34</sup>. Mil millones de personas siguen careciendo de acceso a agua potable salubre. La mitad de la población humana no dispone de instalaciones sanitarias básicas<sup>35</sup>. Sin duda, su demanda de agua tenderá a subir, y debería hacerlo. Por desgracia, vive en algunos de los lugares del mundo con mayor deficiencia de agua.

Alrededor de un tercio de la población mundial vive en países que experimentan una escasez de agua entre moderada y alta debido en parte al aumento de la demanda de una población creciente y de las actividades humanas. En 2025, nada menos que dos tercios de la población mundial sufrirá escasez de agua. La escasez y la contaminación del agua causan amplios problemas de salud pública, limitando el desarrollo económico y agrícola y dañando una amplia gama de ecosistemas. Pueden poner en peligro la oferta global de alimentos y provocar el estancamiento económico en muchas zonas del mundo<sup>36</sup>.

Los ríos Colorado, Amarillo, Nilo, Ganges, Indo, Chao Phraya, Syr Darya y Amu Darya están tan explotados debido a las captaciones para regadíos y ciudades que sus canales se secan durante una parte o la totalidad del año. En los estados agrícolas indios de Punjab y Haryana, los acuíferos descienden al ritmo de medio metro por año. En el norte de China se sobreexplotan los pozos a razón de 30 kilómetros cúbicos al año (una de las razones por las que se seca el río Amarillo). Del

acuífero del Ogalalla, que riega un quinto de las tierras de regadío de Estados Unidos, se captan en exceso 12 kilómetros cúbicos al año. Su agotamiento ha obligado hasta ahora a reconvertir en seco un millón de hectáreas de tierras de cultivo. En el Valle Central de California, donde se cultivan la mitad de las frutas y hortalizas del país, la sobrecaptación media es de alrededor de un kilómetro cúbico al año. En todo el norte de África y en Oriente Próximo se bombea agua de acuíferos del desierto que reciben muy poca agua de recarga, si es que reciben alguna<sup>17</sup>.

La captación excesiva de aguas freáticas se acelera. El uso insostenible de las aguas subterráneas es común a todos los continentes salvo la Antártida.

PETER GLEICK, *The World's Water 1998-1999*

El bombeo de aguas freáticas a un ritmo mayor que las que pueden recargarse es insostenible. Las actividades humanas que dependen de ella tendrán que reducirse a un nivel que la tasa de recarga renovable pueda sostener o bien, si el bombeo excesivo destruye el acuífero por infiltración de agua salada o hundimiento del terreno, abandonarse por completo. En un principio, estas respuestas a la escasez de agua tienen efectos principalmente locales, pero a medida que se imponen en más y más países, las consecuencias se harán notar a escala internacional. Los primeros síntomas de esto son probablemente los aumentos de precio de los cereales.

Los países que sufren escasez de agua satisfacen a menudo las crecientes necesidades de las ciudades y la industria desviando agua de los regadíos e importando cereales

para compensar las pérdidas de producción resultantes. Puesto que una tonelada de cereales equivale a 1.000 toneladas de agua, importar cereales es el modo más eficiente de importar agua. [...] Aunque los conflictos militares en torno al agua siempre son una posibilidad, la futura competencia por el agua se desarrollará más probablemente en los mercados mundiales de cereales [...] Irán y Egipto [...] importan ahora más trigo que Japón, tradicionalmente el principal país importador del mundo. Las importaciones satisfacen el 40 % o más del consumo total de cereales... en ambos países. [...] Muchos otros países en que escasea el agua también importan buena parte de los cereales. Marruecos importa la mitad de sus cereales. En el caso de Argelia y Arabia Saudí, la cifra supera el 70 %. Yemen importa casi el 80 % de sus cereales e Israel más del 90 %. [...] China se verá pronto forzada a acudir al mercado mundial de cereales<sup>38</sup>.

Las consecuencias para una sociedad que sobrepasa su límite de agua depende de si la sociedad es rica o pobre, de si tiene vecinos con excedentes de agua y de si se lleva bien con dichos vecinos. Los países ricos pueden importar cereales. Las sociedades ricas con vecinos dispuestos, como el sur de California, pueden construir canales, tuberías o estaciones de bombeo para importar agua. (Aunque en este caso algunos de los vecinos empiezan a reclamar su agua.) Las sociedades ricas con grandes reservas de petróleo, como Arabia Saudí, pueden utilizar energía fósil para desalar el agua de mar (mientras duren los combustibles fósiles). Las sociedades ricas sin agua ni petróleo desarrollan tecnologías ingeniosas para aprovechar cada gota de agua con la máxima eficiencia y centran sus economías en las actividades menos intensivas en agua. Algunos países pueden usar la fuerza militar para expropiar o asegurarse el acceso a los recursos hídricos de sus vecinos. Las so-

ciudades carentes de todas esas ventajas tienen que decretar estrictos programas de racionamiento y restricciones o exponerse a hambrunas y/o conflictos internos en torno al agua<sup>39</sup>.

Como ocurre con los alimentos, hay muchas maneras de favorecer la sostenibilidad del uso del agua, no tratando de producir más, sino haciendo un uso mucho más efectivo de menos cantidad. Una breve lista de posibilidades incluye las siguientes<sup>40</sup>:

- Ajustar la calidad del agua a los distintos usos. Por ejemplo, utilizando para las cisternas de los retretes y para regar el césped las aguas grises de los desagües en vez de agua potable.
- Utilizar el riego por goteo, que reduce el consumo entre un 30 y un 70 % e incrementa el rendimiento entre un 20 y un 90 %.
- Instalar grifos, cisternas y lavadoras de caudal reducido. Un hogar medio de Estados Unidos que consume 0,3 metros cúbicos por persona y día podría reducirlo a la mitad utilizando aparatos de uso eficiente del agua, que están disponibles y son asequibles.
- Eliminar las fugas. Es sorprendente cuántas autoridades municipales gastan dinero en aumentar el suministro de agua cuando por una fracción de ese coste podrían obtener la misma cantidad de agua tapando las fugas. Una ciudad media de Estados Unidos pierde alrededor de un cuarto del agua transportada en tubos debido a las fugas.
- Plantar vegetales adaptados a cada clima, por ejemplo no cultivando plantas de alto consumo de agua, como alfalfa o maíz, en el desierto, o decorando el paisaje con plantas autóctonas que no precisan riego.
- Reciclar el agua. Algunas industrias, por ejemplo en

California, donde escasea el agua, han ensayado técnicas eficientes y de bajo coste para recaptar, depurar y reutilizar el agua.

- Captar el agua de lluvia en zonas urbanas. Una cisterna o un sistema colector de los tejados permite acumular y utilizar tanta agua de escorrentía como una presa importante a mucho menor coste.

Una de las mejores maneras de implantar estas buenas prácticas consiste en dejar de subvencionar el agua. Si el precio del agua empezara a incorporar aunque sólo fuera una parte del coste económico, social y ambiental total del suministro de esta agua, automáticamente redundaría en un uso más prudente. Tanto Denver como Nueva York descubrieron que bastó con contabilizar el agua municipal y aplicar una tarifa que aumenta con el caudal de consumo, para que el uso doméstico se redujera entre un 30 y un 40 %.

Y luego está el cambio climático (del que hablaremos más adelante). Si la humanidad deja que progrese, podría alterar el ciclo hidrológico, las corrientes oceánicas, las pautas de precipitación y escorrentía, la eficacia de las presas y sistemas de regadío y otras instalaciones de almacenamiento y suministro de agua en todo el mundo. La sostenibilidad del agua no es posible sin la sostenibilidad del clima, es decir, sin sostenibilidad energética. La humanidad se enfrenta a un sistema único, amplio e interconectado.

#### BOSQUES

Existe una clara tendencia global a la pérdida masiva de zonas forestales. [...] Las tendencias actuales apuntan a una aceleración de la pérdida de zonas forestales, la pérdida de bosques vírgenes residuales y la reducción progresiva de la calidad interna de la masa arbórea. [...] Buena parte de los bosques

que quedan se empobrecen progresivamente y todos están amenazados.

COMISIÓN MUNDIAL DE BOSQUES  
Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 1999

Un bosque permanente es un recurso en sí mismo que desempeña funciones vitales económicamente inconmensurables. Los bosques moderan el clima, controlan las riadas y almacenan el agua contra la sequía. Acolchan los efectos erosivos de la lluvia, acumulan y retienen el suelo en las laderas y mantienen libres de cieno los ríos y las costas marítimas, los canales de regadío y los pantanos. Albergan y sostienen muchas especies vivas. Se calcula que las selvas tropicales por sí solas, que apenas cubren el 7 % de la superficie terrestre, hospedan por lo menos al 50 % de las especies de la Tierra. Muchas de esas especies, desde los cañaverales hasta los hongos, pasando por las fuentes de medicamentos, colorantes y alimentos, tienen valor comercial y no pueden existir sin los árboles protectores que conforman su hábitat.

Los bosques absorben y retienen una gran cantidad de carbono, contribuyendo a equilibrar el nivel de carbono en la atmósfera y de este modo paliar el efecto invernadero y el calentamiento del planeta. Finalmente, y no es ni de lejos un factor menor, los bosques naturales son bellos, lugares apetecibles para el recreo y la recuperación del alma humana.

Antes del advenimiento de la agricultura humana había entre 6.000 y 7.000 millones de hectáreas de bosques en la Tierra. Actualmente sólo quedan 3.900 millones, si incluimos unos 200 millones de hectáreas de plantaciones arbóreas. Más de la mitad de la pérdida de los bosques naturales del mundo se ha producido a partir de 1950. Entre 1990 y 2000, la superficie cubierta por

bosques naturales disminuyó en 160 millones de hectáreas o alrededor de un 4 %<sup>41</sup>. La mayor parte de esta pérdida se produjo en los trópicos: la destrucción de los bosques templados tuvo lugar mucho antes de 1990, en el período de industrialización de Europa y Norteamérica.

La pérdida de masa forestal es un signo evidente de insostenibilidad, en tanto de una base de recursos renovables. Pero como sucede a menudo, la indudable tendencia mundial oculta complejas diferencias locales.

Hay que distinguir entre dos medidas del recurso forestal: la extensión y la calidad. Hay una gran diferencia entre una hectárea de bosque virgen con árboles de centenares de años de edad y un bosque talado que empieza a rebrotar y que no tendrá ningún árbol económicamente aprovechable hasta dentro de cincuenta años, con el agravante de que tal vez nunca vuelva a recuperar la diversidad biológica del bosque primario. No obstante, los datos de muchos países sobre la superficie forestal no distinguen entre ambas categorías.

La calidad de los bosques es mucho más difícil de medir que la superficie forestal. Los datos menos controvertidos sobre la calidad están efectivamente relacionados con la extensión; se trata de las estadísticas sobre la envergadura de bosques que nunca han sido talados (llamados bosques primarios, vírgenes o antiguos). No cabe ninguna duda de que estos valiosos bosques están viendo mermada su calidad a marchas forzadas.

Sólo un quinto (1.300 millones de hectáreas) de la cubierta arbolada original de la Tierra se conserva en amplias extensiones de bosques naturales relativamente vírgenes<sup>42</sup>. La mitad está formada por el bosque boreal de Rusia, Canadá y Alaska; buena parte del resto corresponde a la selva tropical de la Amazonia. Amplias extensiones están amenazadas por la explotación silvícola, la minería, la tala con fines agrícolas y otras acti-

vidades humanas. Tan sólo unos 300 millones de hectáreas están formalmente protegidas (y una parte de esta protección sólo está en el papel; en muchos de estos bosques se practica sistemáticamente la tala ilegal de árboles o la caza furtiva de animales salvajes).

Estados Unidos (salvo Alaska) ha perdido el 95 % de su superficie forestal original. En Europa no queda esencialmente ningún bosque primario. China ha perdido tres cuartos de sus bosques y casi todos sus bosques vírgenes (figura 3-7). Los bosques (secundarios) explotados pero repoblados de zonas templadas crecen ligeramente en extensión, pero muchos de ellos experimentan una pérdida de nutrientes del suelo, de variedad de

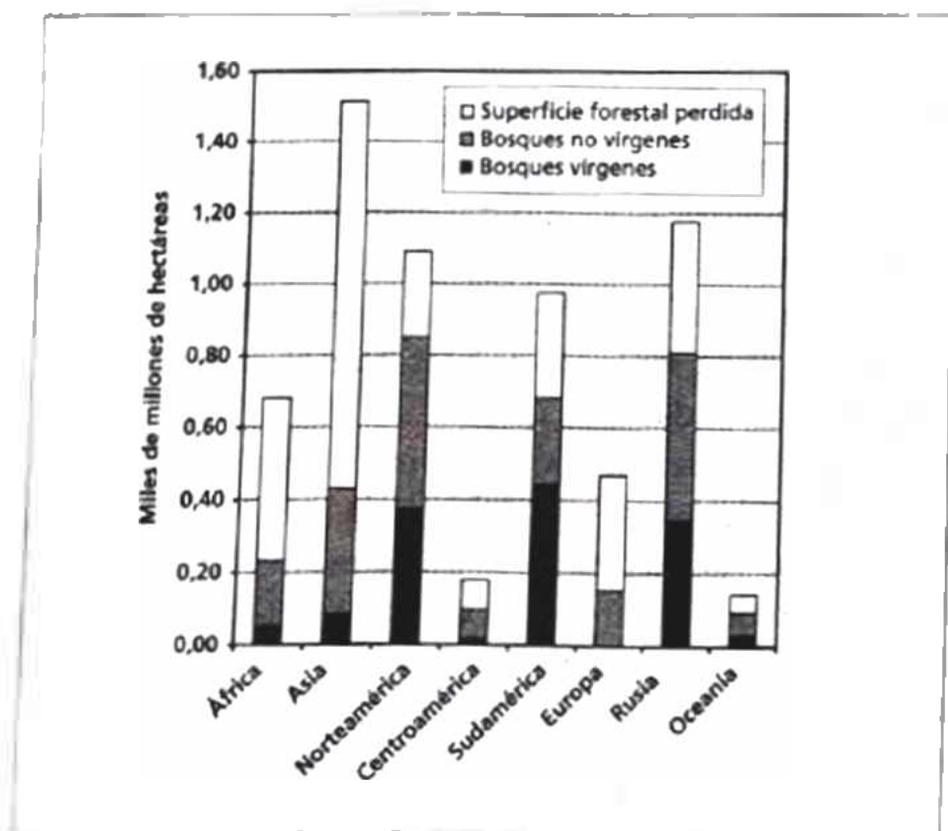


Figura 3-7 Bosques vírgenes

Tan sólo una pequeña fracción de la superficie arbolada original terrestre se mantenía en 1997 en forma de bosques «vírgenes» intactos. (Fuente: WRI.)

especies, de tamaño de los árboles, de calidad de la madera y de tasa de crecimiento; no se gestionan de forma sostenible.

Menos de la mitad de los bosques naturales que quedan se hallan en zonas templadas (1.600 millones de hectáreas); el resto está en los trópicos (2.100 millones de hectáreas). Entre 1990 y 2000, la extensión de los bosques naturales en la zona templada sólo disminuyó ligeramente, unos 9 millones de hectáreas, lo que equivale a una pérdida de alrededor del 0,6 % durante esa década. La mitad de esos bosques naturales se convirtieron en plantaciones de árboles de explotación intensiva para la producción de papel o madera. Además se reforestó una superficie equivalente.

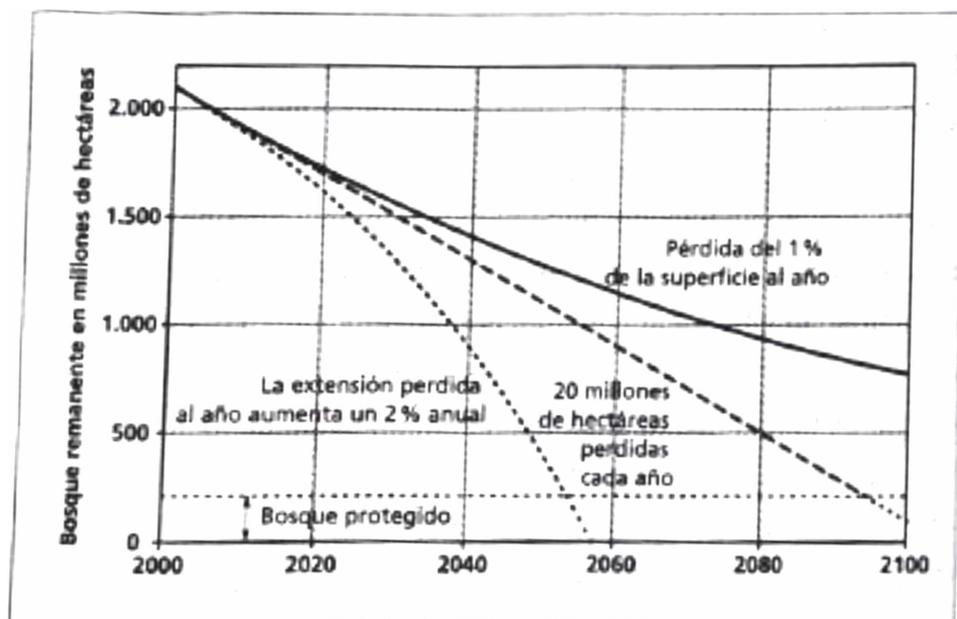
Mientras que la zona de bosques templados es básicamente estable, la extensión de la selva tropical cae en picado. La FAO informa de que de 1990 a 2000 más de 150 millones de hectáreas de las selvas tropicales naturales que quedan en el mundo —una extensión similar a la de México— se reconvirtieron a otros usos. Por tanto, durante la década de 1990 las pérdidas se estiman en alrededor de 15 millones de hectáreas al año, o del 7 % durante la década.

Ésta es la cifra oficial, pero nadie está seguro de la velocidad a la que se está talando la selva tropical. Las estadísticas varían de año en año y están en entredicho. Este hecho de por sí —que la tasa de pérdida del recurso no esté clara— es una de las causas estructurales de la extralimitación.

El primer intento serio de evaluar las tasas de deforestación de la selva tropical, realizado por la FAO en 1980, dio una cifra de 11,4 millones de hectáreas perdidas al año. A mediados de la década de 1980, la tasa estimada había ascendido a más de 20 millones de hectáreas al año. Después de algunos cambios de política, particu-

larmente en Brasil, la tasa de pérdida había descendido aparentemente en 1990 a unos 14 millones de hectáreas al año. Una nueva evaluación de la FAO en 1999 cifró la tasa anual de pérdida forestal, prácticamente en su totalidad en los trópicos, en 11,3 millones de hectáreas. Y como ya hemos señalado antes, al final de la década el cálculo definitivo dio una cifra de 15,2 millones de hectáreas al año.

Esta cifra sólo incluye la conversión permanente en otras formas de uso del terreno (principalmente cultivos y pastos; en segundo lugar, carreteras y asentamientos).



*Figura 3-8 Algunas posibles evoluciones de la deforestación tropical*

Las estimaciones de la pérdida futura de selvas tropicales dependen de los supuestos relativos a las tendencias demográficas, jurídicas y económicas. En este gráfico aparecen tres proyecciones. Si la tasa de pérdida de 20 millones de hectáreas al año, típica de la década de 1990, sigue aumentando al ritmo del 2 % anual, el bosque no protegido desaparecerá en 2054. Si la tasa de pérdida se mantiene constante en 20 millones de hectáreas al año, el bosque no protegido desaparecerá alrededor del año 2094. Si la tasa de pérdida es del 1 % de los bosques no protegidos restantes cada año, la masa forestal se reducirá a la mitad cada 72 años.

*No incluye la silvicultura* (puesto que un bosque explotado sigue siendo un bosque). Y tampoco incluye los incendios, que quemaron 2 millones de hectáreas en Brasil, 2 millones de hectáreas en Indonesia y 1,5 millones de hectáreas en México y Centroamérica en 1997-1998. (Las tierras quemadas siguen clasificándose en la categoría de bosques.) Si añadimos el ritmo al que la superficie calificada de selva tropical pierde los árboles, la suma total supera sin duda los 15 millones de hectáreas al año y podría acercarse al 1 % de la superficie arbolada al año.

Pese a la incertidumbre de los datos, los números aproximados nos dan una idea del destino probable de la selva tropical natural si no cambia el sistema actual. La figura 3-8 parte de la extensión total estimada de la selva tropical en el año 2000, que es de 2.100 millones de hectáreas. Suponemos que la tasa de pérdida actual es de 20 millones de hectáreas al año, que es superior al cálculo oficial de la FAO para tener en cuenta los incendios, la explotación insostenible y la infravaloración de los informes. La línea horizontal del gráfico representa el límite de la tala de bosques si el 10 % de las selvas tropicales actuales se mantiene bajo protección. (Éste es más o menos el porcentaje de la selva tropical que actualmente goza de alguna forma de protección<sup>41</sup>.)

*Si el ritmo de tala se mantiene constante* en 20 millones de hectáreas al año, el bosque primario no protegido desaparecerá en 95 años. Esta posibilidad está representada por la línea continua de la figura 3-8. Refleja la situación en que las fuerzas causantes de la destrucción de los bosques no se reforzará ni se debilitará a lo largo de este siglo.

*Si el ritmo de tala se incrementa exponencialmente*, pongamos que al mismo ritmo con que crece la pobla-

ción de los países tropicales (aproximadamente un 2 % anual), el bosque no protegido desaparecerá totalmente en unos cincuenta años. Esta curva refleja la situación en que alguna combinación del crecimiento demográfico y de la expansión de la industria silvícola forzará el crecimiento exponencial de la tasa de pérdida de los bosques.

*Si el ritmo de tala se mantiene en un porcentaje constante del bosque remanente* (pongamos que se tala un 1 % al año), la tala disminuirá ligeramente cada año en comparación con el año anterior, ya que cada año habrá menos bosques. Si esto continúa, la mitad de la extensión de la selva tropical desaparecerá en 72 años. Esta curva refleja la situación en que cada tala hace que la siguiente sea menos probable, tal vez por el hecho de que primero se talan los bosques más cercanos y más valiosos.

Es probable que el futuro real sea una combinación de todas estas posibilidades. A medida que el crecimiento demográfico y económico reclame más productos forestales y tierras despejadas, la creciente lejanía y la calidad decreciente harán que aumente el coste de la explotación de los bosques. Al mismo tiempo, es probable que aumenten las presiones ambientales y políticas a favor de la protección de los bosques remanentes y de la conversión de la producción de madera en plantaciones de alto rendimiento. Cualquiera que sea la solución de estas tendencias contradictorias, un resultado parece inevitable: el flujo actual de productos de las selvas vírgenes tropicales —que fueron plantadas y cultivadas por la naturaleza sin coste alguno para la economía humana y que han tenido tiempo para que crecieran árboles de gran tamaño y alto valor— es insostenible.

Los suelos, climas y ecosistemas tropicales son muy distintos de los de las zonas templadas. Ricas en especies, las selvas tropicales crecen con mayor rapidez, pero también son más vulnerables. No está claro si pueden sobrevivir a una sola tala o un incendio sin una grave degradación del suelo y del ecosistema. Mientras están realizándose experimentos para hallar un método de explotación selectiva de las selvas tropicales o por franjas para permitir la regeneración, la mayoría de prácticas silvícolas actuales tratan la selva tropical, en particular las especies de árboles más valiosas, como un recurso no renovable<sup>44</sup>.

Las razones de la pérdida de la selva tropical varían de un país a otro. Entre las fuerzas motrices hay que incluir a las multinacionales madereras y papeleras que intentan aumentar las ventas; a gobiernos que potencian las exportaciones para pagar la deuda externa; a ganaderos y agricultores que convierten los bosques en tierras de cultivo o pasto y a poblaciones sin tierra que buscan desesperadamente leña para quemar o una parcela de terreno para cultivar alimentos. Estos agentes actúan a menudo de forma concertada, con los gobiernos que atraen a las multinacionales —que se llevan la madera— y los pobres que penetran por las vías abiertas en busca de un lugar donde asentarse.

Existe otra fuerza motriz del uso insostenible de los bosques tanto en las zonas templadas como tropicales. En un mundo en que desaparece la madera de alta calidad, un único árbol viejo puede valer 10.000 dólares o más. Este valor despierta enormes tentaciones. La venta a saldo de recursos forestales de propiedad pública en beneficio del bolsillo privado, el tráfico clandestino de permisos de tala, la contabilidad fraudulenta, la falsificación de certificados sobre las especies o los volúmenes o extensiones taladas, la laxitud en la obser-

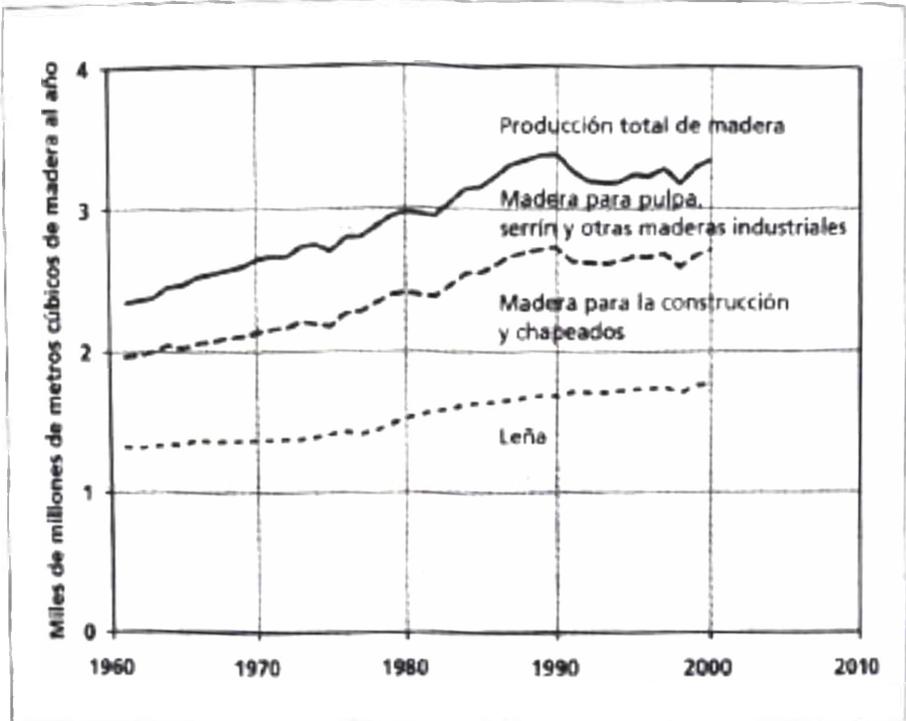
vancia de las normas, los tratos entre amigos, las comisiones bajo mano son prácticas que no sólo se dan en las zonas tropicales.

La Comisión ha detectado que el problema que más fácilmente se percibe en el sector forestal —el más común y el más patente—, pero el menos controvertido... es la existencia de prácticas corruptas<sup>45</sup>.

Los bosques decrecen incluso en los países tropicales menos corruptos y más sensibilizados, pero no es fácil saber a qué ritmo. En la edición de 1992 de este libro publicamos unos mapas de la pérdida forestal en un pequeño país, Costa Rica. Con el propósito de actualizar las cifras nos pusimos en contacto con el Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible de la Universidad de Costa Rica para enterarnos tan sólo de que los datos relativos a años anteriores habían tenido que revisarse a medida que se tuvo acceso a técnicas de medición mejores.

La creciente demanda de productos forestales no hace si no agravar el problema del declive de los bosques. Entre 1950 y 1966, el consumo mundial de papel se multiplicó por seis. La FAO prevé que aumentará de 280 a 400 millones de toneladas para el año 2010<sup>46</sup>. En Estados Unidos, el habitante medio utiliza 330 kilogramos de papel al año. En los demás países industriales, el habitante medio usa 160 kilogramos; en el mundo en vías de desarrollo, apenas 17. Aunque el reciclado de papel aumenta, el consumo de madera virgen para la fabricación de pulpa sigue creciendo al ritmo del 1 al 2 % anual.

El consumo total de madera para todos los usos —construcción, papel y leña— no deja de crecer, aunque la tasa de crecimiento se desacelera (figura 3-9). Una



*Figura 3-9 Consumo mundial de madera*

El consumo de madera sigue creciendo, aunque a un ritmo más bajo. Aproximadamente la mitad de la madera extraída de los bosques de todo el mundo se utiliza como combustible. (Fuente: FAO.)

explicación de la disminución de la tasa de crecimiento en la década de 1990 parece hallarse en el declive de las economías asiáticas y rusa. Por tanto, la moderación del consumo de madera acaso sólo se trata de un fenómeno pasajero. Si cada uno de los habitantes del planeta consumiera tanta madera para todos los fines como el ciudadano medio de hoy de los países industriales, el consumo total de madera se duplicaría con creces<sup>17</sup>.

Sin embargo, también hay tendencias que apuntan a una reducción de la demanda de madera, como el reciclado y un uso más eficiente de los productos forestales. Si se refuerzan estas tendencias, el mundo podría satisfacer fácilmente sus necesidades de productos de madera con un caudal mucho menor procedente de los bosques. Por ejemplo:

- *Reciclado de papel.* Cerca de la mitad del papel producido en Estados Unidos procede de papel reciclado; en Japón, la proporción supera el 50 %, y en los Países Bajos el 96 %. En todo el mundo, el 41 % del papel y el cartón son reciclados<sup>41</sup>. Si todo el mundo emulara a los Países Bajos, la tasa de reciclado del papel podría duplicarse con creces.
- *Eficiencia de los aserraderos.* Los aserraderos modernos convierten del 40 al 50 % de los troncos que entran en madera comercial (y los residuos en combustible, papel o tableros de virutas aglomeradas). Los aserraderos menos eficientes, especialmente en el mundo en vías de desarrollo, sólo aprovechan del 25 al 30 % de cada tronco. Si pudieran modernizarse estos aserraderos ineficientes sería posible producir el doble de madera por cada árbol talado<sup>42</sup>.
- *Eficiencia del combustible.* Más de la mitad de la madera talada de los bosques se emplea para cocinar y con fines de calefacción, así como para pequeñas industrias (fabricación de ladrillos, elaboración de cerveza, secado de tabaco) en los países pobres, a menudo en estufas de leña extremadamente ineficientes o en fuegos abiertos. Con estufas más eficientes o combustibles alternativos se podrían satisfacer las necesidades humanas con un consumo mucho menor de madera de los bosques, menos contaminación atmosférica y menos mano de obra para recoger la leña.
- *Uso eficiente del papel.* La mitad de la producción mundial de papel y cartón se emplea para embalajes y publicidad. El hogar medio de Estados Unidos recibe 550 unidades de «correo basura» no solicitado al año, que en su mayor parte se tira a la basura sin haberlo leído. A pesar de la era electrónica, o quizá a causa de ella, el consumo per cápita de papel en Estados Unidos se ha duplicado entre 1965 y 1995. El

correo basura y los embalajes excesivos podrían eliminarse; también podrían perfeccionarse las impresoras láser y los faxes de una sola cara y muchas otras tecnologías que producen grandes cantidades de residuos.

- *Repercusión del coste total en el precio.* Habría que abogar por la supresión de los subsidios públicos directos o indirectos que recibe la explotación forestal, así como establecer impuestos sobre la explotación maderera que reflejaran el valor perdido de los bosques vivos, de modo que los precios de los productos de la madera reflejaran mejor su coste real.

Probablemente, avances como estos en los países industriales permitirían reducir el flujo de madera procedente de los bosques —y el flujo de residuos en el otro extremo— por lo menos a la mitad, sin apenas ninguna merma de su calidad de vida.

Al mismo tiempo, las fibras aprovechables del bosque podrían producirse con mucho menos perjuicio. Una opción sería sustituir la tala general, especialmente en laderas muy inclinadas, por una tala selectiva o por franjas. Dejando franjas sin talar en las orillas de los ríos se reduciría la erosión y se protegerían los ecosistemas acuáticos de la luz solar dañina. Algunos árboles muertos, todavía en pie o caídos, podrían dejarse para que sirvieran de hábitat.

Existe un movimiento creciente a favor del «certificado verde», que permite a los consumidores discernir los productos forestales elaborados con prácticas cuidadosas de tala y gestión de los bosques. A finales de 2002, el Consejo de Cuidado de los Bosques había certificado un total de 30 millones de hectáreas de bosques «gestionados de modo sostenible». Aunque todavía reducida, esta cifra crece rápidamente, demostrando el poder del

mercado, en este caso el poder de la demanda de los consumidores de madera certificada.

Las plantaciones forestales de alto rendimiento podrían ampliarse en tierras ya rozadas o marginales. Estas plantaciones pueden llegar a producir cantidades sorprendentes de madera por hectárea, liberando los bosques naturales de las presiones silvícolas.

Para citar un ejemplo extremo, las plantaciones de bosque tropical de mayor rendimiento son capaces de producir (durante un tiempo, al menos) nada menos que 100 metros cúbicos de madera por hectárea y año. Esto supera en un 40 % la tasa de crecimiento media de los bosques naturales de zonas templadas, que producen alrededor de 2,5 metros cúbicos por hectárea y año. Con este elevado rendimiento de las plantaciones se precisarían tan sólo 34 millones de hectáreas (una extensión similar a la de Malasia) para satisfacer la actual demanda mundial de pulpa de papel virgen, madera para la construcción y leña. Si la productividad sólo alcanzara la mitad de aquella cifra, es decir, los 50 metros cúbicos por hectárea y año, se precisarían 68 millones de hectáreas (la extensión de Somalia) para satisfacer la demanda mundial actual. Sin duda, mantener la tremenda productividad de las plantaciones de bosque tropical de un modo sostenible exigiría una evolución más «biológica» del cultivo de plantaciones: mezcla o rotación de especies y uso de métodos de fertilización y control de plagas más naturales y menos destructivos para el medio ambiente que los empleados actualmente.

Existen muchas maneras de reducir las tasas de tala de bosques por debajo de los límites sostenibles. Ninguna de las medidas necesarias es imposible. Cada una de ellas se practica en alguna parte del mundo, aunque no en el mundo en su conjunto. Así que los bosques siguen menguando.

Aunque en los últimos años ha aumentado la conciencia pública sobre los efectos de la deforestación mundial, no por ello se ha reducido apreciablemente la tasa de deforestación<sup>50</sup>.

#### ESPECIES Y SERVICIOS DEL ECOSISTEMA

El Índice del Planeta Vivo es un indicador del estado del ecosistema natural del mundo. Está [...] relacionado con la abundancia de bosques, agua dulce y especies marinas. El índice experimentó en conjunto un declive de alrededor del 37 % entre 1970 y 2000.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE, 2002

El suelo, el agua y el bosque son fuentes evidentes de las que dependen los humanos para asegurar los caudales productivos que sostienen la vida y la economía. Existe otro conjunto de fuentes que son por lo menos igual de importantes pero mucho menos evidentes, puesto que la economía humana nunca les ha atribuido un valor monetario. Son las especies naturales no comerciales, los ecosistemas que forman y las funciones de apoyo que desempeñan, pues capturan, movilizan y reciclan la energía y los materiales necesarios para la vida.

El término de nuevo cuño que se emplea para designar las valiosas aportaciones cotidianas de estas fuentes bióticas es el de *servicios del ecosistema*. Estos servicios incluyen:

- Depuración del aire y del agua.
- Absorción y almacenamiento de agua; mitigación de sequías y riadas.
- Descomposición, desintoxicación y secuestro de residuos.
- Regeneración de nutrientes del suelo; formación de la estructura edáfica.

- Polinización.
- Control de plagas.
- Diseminación de semillas y nutrientes.
- Moderación de vientos y temperaturas extremas; estabilización parcial del clima.
- Abastecimiento de una gran variedad de productos agrícolas, farmacéuticos e industriales.
- Evolución y mantenimiento de la reserva de genes bióticos y de la biodiversidad que lleva a cabo las funciones anteriores.
- Aprendizaje de estrategias de supervivencia, resistencia, evolución y diversificación probadas durante 3.000 millones de años.
- Inspiración estética, espiritual e intelectual sin parangón<sup>51</sup>.

Aunque el valor de estos servicios es incalculable, ha habido quienes han tratado de medirlo. Todos los intentos de valorar los servicios naturales en términos monetarios dan cifras del orden de los billones de dólares al año, mucho más que el valor monetario de la producción anual de la economía humana<sup>52</sup>.

La medición del World Wide Fund (WWF) citada anteriormente implica que el mundo ha perdido una fracción significativa de los servicios de los ecosistemas durante los últimos treinta años. Claro que esto es muy difícil documentar en términos cuantitativos. El enfoque más común, aunque no muy revelador, es tratar de contar el número de especies y su tasa de extinción.

Sorprendentemente, esto es imposible de realizar. Los científicos no saben ni por aproximación cuántas especies existen: se calcula que la cifra se sitúa entre 3 y 30 millones<sup>53</sup>, de las que solo alrededor de 1,5 millones han sido nombradas y clasificadas. Suelen ser las especies grandes y muy visibles: las plantas verdes, los ma-

míferos, las aves, los peces y los reptiles. La ciencia sabe mucho menos de la miríada de especies de insectos y todavía menos de los microbios.

Puesto que nadie sabe con exactitud cuántas especies existen, tampoco nadie puede saber cuántas se están perdiendo. Pero no cabe la menor duda de que el número de especies decrece rápidamente. La mayoría de biólogos no vacilan en proclamar que estamos asistiendo a una «extinción masiva»<sup>34</sup>. Los ecologistas afirman que nunca ha habido una extinción de este calibre desde los sucesos que provocaron la desaparición de los dinosaurios al final del cretácico hace 65 millones de años.

Llegan a esta conclusión sobre todo al observar la rapidez con que desaparecen los hábitats. Por ejemplo:

- Madagascar es un tesoro biótico; sus bosques orientales albergan 12.000 especies vegetales conocidas y 190.000 especies animales conocidas, de las que un 60 % no se encuentran en ninguna otra parte del planeta. Más del 90 % de estos bosques han sido talados, principalmente con fines agrícolas.
- El oeste de Ecuador llegó a albergar entre 8.000 y 10.000 especies vegetales, aproximadamente la mitad de ellas endémicas. Desde 1960, casi todos los bosques del occidente ecuatoriano se han convertido en plantaciones de bananas, pozos de petróleo y asentamientos humanos.

La mayoría de extinciones se producen, como es lógico, allí donde se hallan la mayoría de las especies. Se trata principalmente de los bosques tropicales, los arrecifes coralinos y los humedales. Al menos el 30 % de los arrecifes de coral de todo el mundo se hallan en estado crítico y el 95 % de los que fueron inspeccionados en 1997 en todo el mundo mostraban signos evidentes

de degradación y pérdida de especies<sup>55</sup>. Los humedales están todavía más amenazados. Son lugares de intensa actividad biológica, incluida la cría de muchas especies de peces. Tan sólo el 6 % de la superficie de la Tierra está cubierto por humedales, o lo estaba. Alrededor de la mitad de los humedales se han perdido debido a operaciones de dragado, terraplenado, drenaje y canalización... sin contemplar la degradación a causa de la contaminación.

El cálculo de la tasa de extinción empieza con mediciones de la pérdida de hábitats, que son bastante precisas. Prosigue suponiendo cuántas especies pudo haber en los hábitats que se han perdido; estos supuestos son por fuerza imprecisos. Después se supone una relación entre pérdida de hábitats y pérdida de especies. La regla empírica es que el 50 % de las especies se conservan incluso si ha desaparecido el 90 % del hábitat.

Estos cálculos son bastante controvertidos<sup>56</sup>. Pero como ocurre con otras cifras con las que estamos intentando lidiar en este capítulo, la tendencia general está clara. Con respecto a los grandes animales, que están bastante bien estudiados, los científicos calculan ahora que el 24 % de las 4.700 especies de mamíferos, el 30 % aproximadamente de las 25.000 especies de peces y el 12 % de las casi 10.000 especies de aves que hay en el mundo se hallan en peligro de extinción<sup>57</sup>. Lo mismo cabe decir de 34.000 de las 270.000 especies conocidas de plantas<sup>58</sup>. Las tasas de extinción estimadas son actualmente mil veces mayores que las que habría sin el impacto humano<sup>59</sup>.

La pérdida de especies no es un modo satisfactorio de medir la sostenibilidad de la biosfera, pues nadie sabe dónde están los límites. ¿Cuántas especies, y cuáles de ellas, pueden eliminarse de un ecosistema antes de que éste se colapse? Se ha comparado la situación

con la imagen de alguien que está volando en un avión y retira uno por uno los remaches que mantienen unidas las partes del aparato, preguntándose cuántos remaches podrá eliminar antes de que el avión deje de volar. Al menos, en un aeroplano los remaches no están conectados entre sí. En los ecosistemas, las especies sí lo están. Si una desaparece, puede llevarse consigo a otras en una larga cadena de reacciones.

Dada la dificultad para medir la tasa de disminución del número de especies que hay sobre el planeta, el WWF, en su *Índice del Planeta Vivo*, ha optado por un método diferente de cuantificación del declive de la riqueza biológica. En lugar de medir la mengua del número de especies, el WWF hace un seguimiento del tamaño de la población de un gran número de especies distintas. Estas tendencias se promedian después para obtener una estimación cuantitativa de la evolución en el tiempo de la población de una especie «típica». Este método le ha permitido concluir que la población «media» de las especies ha disminuido más de un tercio desde 1970<sup>60</sup>. En otras palabras, el número de animales, plantas y peces está en franco declive. Sin duda, la fuente de servicios del ecosistema se utiliza de modo insostenible. Esta cuestión ya se planteó enérgicamente en un llamamiento de 1992, «Advertencia de científicos del mundo a la humanidad», suscrito por cerca de mil setecientos destacados científicos de todo el mundo, entre ellos la mayoría de los premios Nobel en ciencias.

La manipulación masiva a que sometemos la red interdependiente de la vida en el planeta —combinado con el daño ambiental infligido por la deforestación, la pérdida de especies y el cambio climático— podría desencadenar amplios efectos adversos, incluso colapsos impredecibles de sistemas biológicos críticos cuyas interacciones y cuya di-

námica sólo comprendemos imperfectamente. La incertidumbre en torno a la amplitud de estos efectos no puede ser una excusa para la complacencia o la demora en hacer frente a las amenazas<sup>61</sup>.

## Fuentes no renovables

### COMBUSTIBLES FÓSILES

Nuestro análisis del descubrimiento y la producción de yacimientos petrolíferos en todo el mundo indica que en el curso del próximo decenio la oferta de petróleo convencional será incapaz de mantener el paso con la demanda. [...] El descubrimiento mundial [de petróleo] alcanzó su punto máximo a comienzos de la década de 1960 y desde entonces no ha dejado de descender. [...] Hay una cantidad determinada de petróleo crudo en el mundo y la industria ha descubierto ya alrededor del 90 % del mismo.

COLIN J. CAMPBELL  
Y JEAN H. LAHERRÈRE, 1998

Hoy por hoy apenas nadie se preocupa por la oferta de petróleo a corto plazo. [...] Sin embargo, los recursos de petróleo del planeta son finitos y la producción mundial acabará tocando techo y después empezará a decaer... Más cálculos convencionales indican que la producción mundial todavía tardará una década o dos en tocar techo, en algún momento entre 2010 y 2025.

WORLD RESOURCES, 1997

Los optimistas y los pesimistas difieren en unas pocas décadas a la hora de prever la fecha en que la producción de petróleo tocará techo. Pero existe un consenso sustancial en que el petróleo es el más limitado de los combustibles fósiles importantes y su producción mun-

dial alcanzará el punto máximo en algún momento durante la primera mitad de este siglo. El consumo anual de energía en la economía humana ha crecido en promedio un 3,5 % al año entre 1950 y 2000. El consumo mundial de energía ha aumentado desigual pero inexorablemente a través de las guerras, recesiones, fluctuaciones de precios y cambios tecnológicos (figura 3-10). La mayor parte de esta energía se utiliza en el mundo industrializado. El habitante medio de Europa Occidental consume 5,5 veces más energía comercial<sup>62</sup> que el africano medio. El norteamericano medio utiliza nueve veces más que el habitante medio de India<sup>63</sup>. Pero

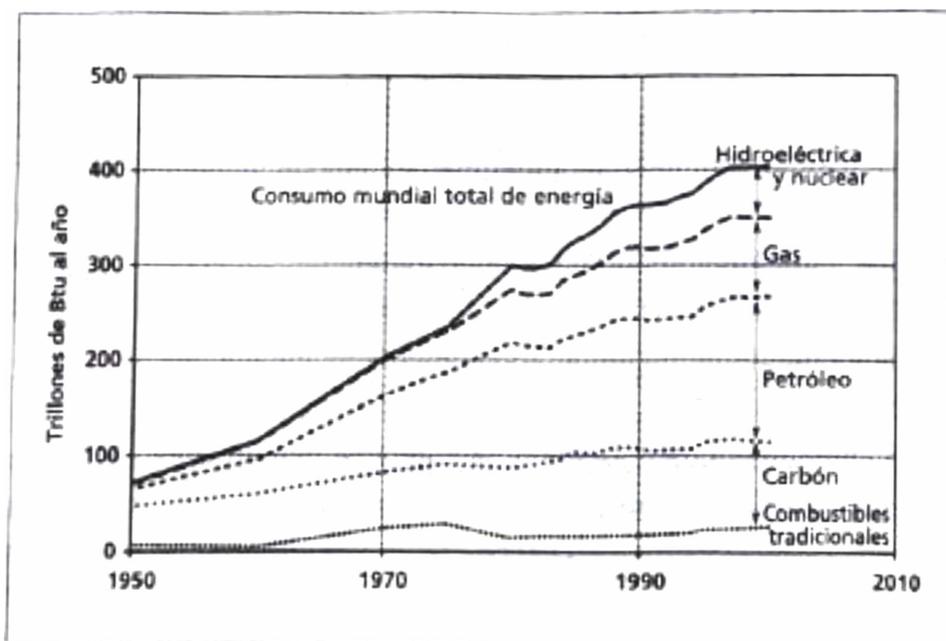


Figura 3-10 Consumo mundial de energía

El consumo mundial de energía se duplicó tres veces entre 1950 y 2000. Los combustibles fósiles siguen dominando la oferta de energía primaria: la cuota del carbón alcanzó el máximo en 1920, cuando abarcaba más del 70 % de todos los combustibles utilizados; la cuota del petróleo culminó a comienzos de la década de 1980 con un poco más del 40 %. Se prevé que el gas natural, que es menos contaminante que el carbón y el petróleo, acaparará en el futuro una cuota más importante del consumo mundial de energía. (Fuentes: ONU; DoE de EE. UU.)

se trata de energía comercial, de la que muchos tienen que prescindir:

Más de un cuarto de la población mundial no tiene acceso a la electricidad y dos quintos todavía recurren a la biomasa tradicional para satisfacer sus necesidades energéticas básicas. Aunque el número de personas que carecen de electricidad disminuirá en los próximos decenios, según las proyecciones en 2030 todavía habrá 1.400 millones de personas sin electricidad. Y el hecho es que crecerá el número de habitantes que emplearán leña y residuos vegetales y animales como principal combustible para la cocina y la calefacción<sup>64</sup>.

La mayoría de los analistas prevén que el consumo mundial de energía seguirá creciendo. La proyección de «referencia» presentada por la Agencia Internacional de la Energía en su *World Energy Outlook 2002*, anteriormente citado, describe un incremento de dos tercios del consumo mundial de energía primaria de 2000 a 2030. E incluso la proyección «alternativa» (más ecológica) implica un incremento de más del 50 % del consumo mundial de energía durante este período de treinta años. Un análisis detallado de la Agencia de Energía de Dinamarca calcula que para satisfacer las necesidades energéticas básicas de 9.200 millones de personas —que bien puede ser el número de habitantes del planeta en 2050— se precisarán seis veces más energía (de uso final) que la suministrada en todo el mundo en 2000<sup>65</sup>.

Más del 80 % del consumo de energía comercial del año 2000 procede de combustibles fósiles no renovables: petróleo, gas natural y carbón. Las reservas subterráneas de estos combustibles fósiles menguan continuamente e inexorablemente. Para determinar si se trata de un problema de sostenibilidad en el ámbito de la fuente de este flujo (más adelante nos ocuparemos del ámbito del su-

midero), hemos de preguntarnos con qué rapidez se agotan estas fuentes y si se desarrollan sustitutos renovables con la rapidez suficiente para compensar su declive.

Existe una gran confusión en torno a este asunto, incluida la cuestión de si estos combustibles intrínsecamente no renovables están agotándose de hecho o no. La confusión se debe a que se presta atención a la señal equivocada. *Recurso* es un concepto referido a la cantidad total de un material existente en la corteza terrestre; *reserva* es un concepto que designa la cantidad del material que ha sido descubierto o que se infiere que existe y que puede utilizarse en virtud de supuestos razonables sobre la tecnología y el precio. Los recursos disminuyen inexorablemente a medida que se consumen, aunque el volumen de las reservas puede aumentar a medida que avanzan los descubrimientos, aumentan los precios y mejora la tecnología. Ha habido una tendencia a sacar conclusiones sobre los recursos en función de observaciones de las reservas.

Entre 1970 y 2000, la economía mundial quemó 700.000 millones de barriles de petróleo, 87.000 millones de toneladas de carbón y 51 billones de metros cúbicos de gas natural. Durante ese mismo período de treinta años, sin embargo, se descubrieron nuevos yacimientos de petróleo, carbón y gas (y otros antiguos se recalibraron al alza). Debido a ello, la proporción de las reservas conocidas con respecto a la producción<sup>66</sup> —el número de años que durarán las reservas conocidas y explotables si la producción continúa al ritmo actual— aumentó efectivamente, como refleja el cuadro 3-1.

Este incremento de la proporción entre reservas y producción se produjo a pesar del aumento significativo del consumo de gas (de alrededor del 130 % entre 1970 y 2000), de petróleo (de alrededor del 60 %) y de carbón (de alrededor del 145 %). Pero ¿significa este incre-

mento que había más combustibles fósiles en el subsuelo para alimentar la economía humana en 2000 que los que había en 1970?

No, por supuesto que no. Después de tres decenios de explotación había 700.000 millones *menos* de barriles de petróleo, 87.000 millones *menos* de toneladas de carbón y 51 billones *menos* de metros cúbicos de gas natural. Los combustibles fósiles son fuentes no renovables. Una vez quemados, se transforman en dióxido de carbono, vapor de agua, dióxido de azufre y una serie de otras sustancias, que no vuelven a combinarse, dentro de una escala de tiempo significativa para la humanidad, para formar de nuevo combustibles fósiles. Más bien son residuos y materias contaminantes que penetran en los sumideros planetarios.

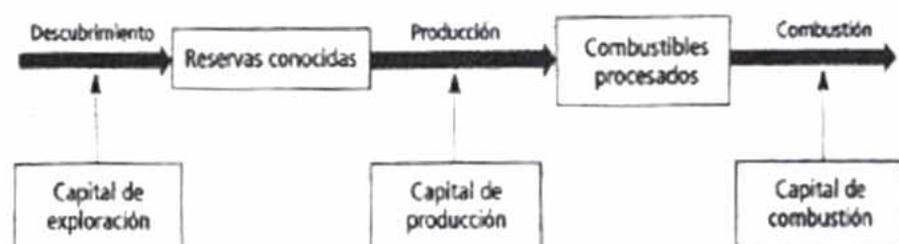
CUADRO 3-1  
PRODUCCIÓN ANUAL, PROPORCIONES ENTRE RESERVAS  
Y PRODUCCIÓN (R/P) Y EXPECTATIVAS DE VIDA  
DE LOS RECURSOS DE PETRÓLEO, GAS Y CARBÓN

	1970 Producción (anual)	1970 R/P (años)	2000 Producción (anual)	2000 R/P (años)	Expectativas de vida del recurso (años)
Petróleo	17.000 millones de barriles	32	28.000 millones de barriles	37	50-80
Gas	3,8 billones de metros cúbicos	39	8,8 billones de metros cúbicos	65	160-310
Carbón	2.200 millones de toneladas	2.300	5.000 millones de toneladas	217	Muy larga

Las estimaciones de recursos son por definición la suma de las «reservas detectadas» y los «recursos convencionales que quedan por

descubrir». Un recurso dividido entre la producción de 2000 indica la expectativa de vida de este recurso en 2000. La cifra de las reservas de carbón de 1970 no se puede comparar con la de 2000 debido al cambio de definición de «reservas». El carbón era y sigue siendo el combustible fósil más abundante. (Fuentes: U.S. Bureau of Mines; DoE de EE. UU.)

Quienes piensan que los nuevos descubrimientos de los últimos treinta años indican que no hay límites a la vista para los combustibles fósiles, sólo tienen en cuenta una parte del sistema energético:

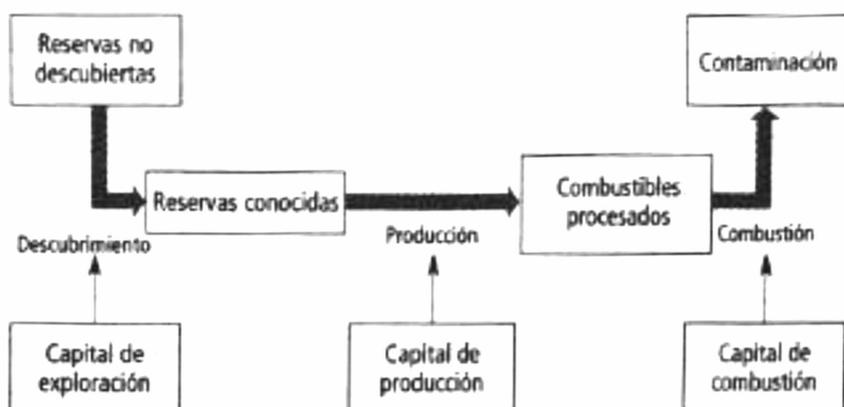


*De reservas conocidas a combustibles procesados*

El proceso de *descubrimiento* utiliza *capital de exploración* (equipos de perforación, aviones, satélites, un conjunto sofisticado de resonadores y sondas) para encontrar depósitos de combustibles sólidos en el subsuelo y de este modo incrementar las *reservas conocidas* que han sido descubiertas pero todavía no extraídas. El proceso de *producción* extrae las reservas del subsuelo utilizando *capital de producción* (equipos de perforación, bombeo, refinado y transporte) y las suministra a los lugares en que se almacena el combustible procesado. Entonces, el *capital de combustión* (hornos, automóviles, generadores eléctricos) queman los *combustibles procesados*, generando calor útil<sup>67</sup>.

Mientras la tasa de descubrimiento sea superior a la tasa de producción, el volumen de reservas conocidas

seguirá creciendo. Pero el diagrama anterior sólo muestra una parte del sistema. Un diagrama más completo incluiría también las fuentes y los sumideros de los combustibles fósiles:



*De reservas no descubiertas a contaminación*

A medida que la *producción* reduce el volumen de las *reservas conocidas*, la humanidad invierte en exploración para reponerlas. Pero cada descubrimiento procede de las existencias definitivas de combustibles fósiles que hay en la Tierra, que no es posible reponer. El volumen de las *reservas no descubiertas* puede ser muy grande, pero es finito y no renovable.

En el otro extremo del flujo, la combustión produce contaminación, que va a parar al sumidero final: los procesos biogeoquímicos del planeta, que reciclan las materias contaminantes, las tornan inocuas o se intoxican o degradan a causa de ellas. En cualquier otra fase del flujo de los combustibles fósiles —desde el descubrimiento hasta la producción, el refinado, el transporte y el almacenamiento— se emiten asimismo materias contaminantes de diversos tipos. Aunque las impresionantes mejoras de la ecoeficiencia a lo largo del último decenio han reducido las emisiones contaminantes de las instalaciones bien gestionadas, la producción de energía si-

que siendo una fuente importante de contaminación de las aguas freáticas en Estados Unidos.

Nadie sabe realmente qué extremo del flujo de los combustibles fósiles resultará más limitador, si la fuente o el sumidero. Hace treinta años, en vísperas de las fuertes subidas de precios del petróleo por parte de la OPEP, el extremo fuente parecía ser el cuello de botella evidente. Hoy en día, la atención se centra mucho más en el cambio climático y por tanto el extremo sumidero parece ser más constrictivo. Existe una cantidad tan ingente de carbón que creemos que su uso vendrá limitado por el sumidero atmosférico del dióxido de carbono. El petróleo puede chocar con sus límites en ambos extremos. Su combustión genera gases de efecto invernadero u otras materias contaminantes y sin duda será el primer combustible fósil que se agote en la fuente. Actualmente, muchos consideran que el gas es la fuente que puede sostener la producción de energía hasta que se llegue a una generalización de fuentes de energía sostenibles. Pero tradicionalmente la sociedad ha necesitado medio siglo para recorrer la transición de una fuente de energía dominante a otra. Mientras tanto, el mundo puede sufrir una pérdida de bienestar: bien a causa del cambio climático, bien debido a las limitaciones del uso de combustibles fósiles.

Los volúmenes calculados de las reservas no descubiertas de petróleo y gas varían en gran medida y nunca se conocerán con certeza absoluta, pero en el cuadro 3-1 (*véase* p. 167) hemos incluido una conjunto de cantidades estimadas. Estos volúmenes estimados figuran en forma de amplios intervalos entre dos valores debido a la incertidumbre intrínseca, y a su vez demuestran que los recursos de petróleo remanentes (es decir, la suma de las reservas conocidas y las no descubiertas) podrían durar de 50 a 80 años con las tasas de

extracción del año 2000, mientras que el gas natural podría durar de 160 a 310 años. El carbón es todavía más abundante. El coste del acceso al recurso aumentará por supuesto a medida que se agote el mismo. Y el coste político puede incrementar todavía más el coste de producción: en 2000, el 30 % de la producción mundial de petróleo procedía de Oriente Próximo y el 11 % de la antigua URSS; juntas, estas dos regiones abarcan dos tercios de todas las reservas de petróleo conocidas.

El agotamiento del petróleo no aparecerá en forma de parada en seco, de cierre repentino del grifo. Más bien se manifestará a modo de un continuo descenso de la rentabilidad de la inversión en exploración, de creciente concentración de las reservas remanentes en unos pocos países y finalmente de declive gradual de la producción mundial total después de tocar techo. El ejemplo de Estados Unidos es un caso típico. Su inmensa riqueza original de petróleo se ha disipado en más de la mitad. El descubrimiento de nuevos yacimientos alcanzó el apogeo en las décadas de 1940 y 1950; su producción nacional de petróleo llegó al punto máximo alrededor de 1970; su consumo de petróleo depende cada vez más de las importaciones (*véase* la figura 3-11).

Lo mismo está a punto de ocurrir a escala mundial. La figura 3-12 muestra dos proyecciones de la producción mundial de petróleo, basadas en supuestos sobre los recursos similares a los del cuadro 3-1. La expectativa es que el consumo de petróleo nunca aumentará mucho por encima de los niveles actuales, y después, al cabo de varios decenios, disminuirá progresivamente hasta finales del siglo XXI. Estas proyecciones vienen corroboradas por el hecho de que las tasas de descubrimiento a escala mundial ya alcanzaron su punto máximo en la década de 1960 y de que actualmente se explotan ya recursos cada

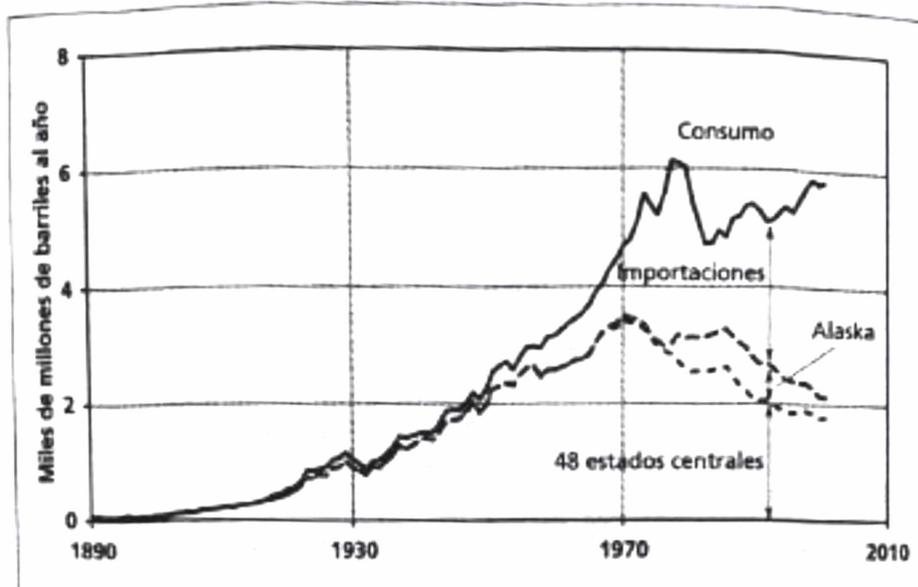


Figura 3-11 Producción y consumo de petróleo en Estados Unidos

La producción nacional de petróleo en Estados Unidos alcanzó el punto máximo en la década de 1970, y desde entonces la producción en los 48 estados centrales ha descendido un 40 %. Ni siquiera los nuevos descubrimientos en Alaska han compensado este declive. (Fuente: API; AIE/DoE.)

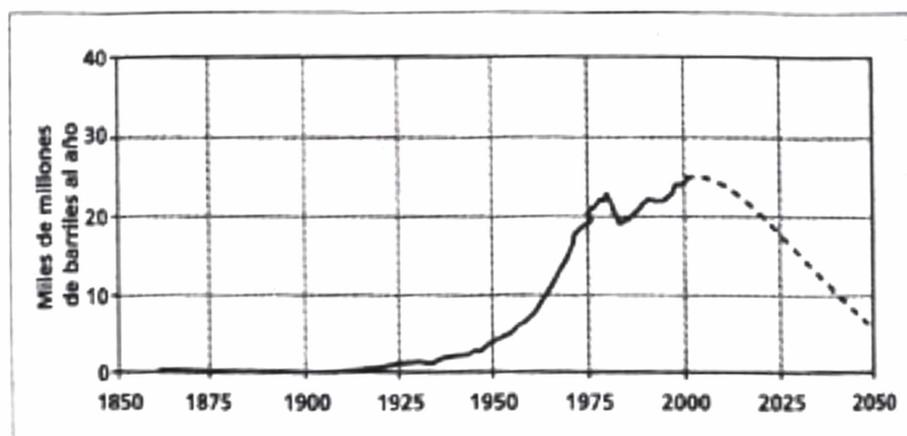


Figura 3-12 Proyecciones de la producción mundial de petróleo  
La línea continua muestra la producción mundial de petróleo hasta el año 2000. Se han empleado los métodos del geólogo M. King Gubert para estimar la producción futura más probable. La línea discontinua de la derecha refleja la tasa de producción probable si el volumen de petróleo finalmente susceptible de ser descubierto es de 1,8 billones de barriles (área bajo la curva inferior). (Fuente: K. S. Deffeyes.)

vez más inaccesibles –y por tanto más caros–, no sólo en Alaska, sino también en las aguas profundas del océano Ártico o en la lejana Siberia.

El gas natural es un sustituto lógico del petróleo en muchas aplicaciones. Entre todos los combustibles fósiles, el gas natural es el que emite menos contaminación –incluido el gas de efecto invernadero,  $\text{CO}_2$ – por unidad de energía y por tanto hay un interés significativo por que sustituya rápidamente al carbón y al petróleo. Esto acelerará el agotamiento de los recursos de gas en una medida que sorprenderá a quienes no aprecian plenamente la dinámica del crecimiento exponencial. Las figuras 3-13 y 3-14 muestran por qué.

En el año 2000, la relación mundial entre reservas y producción de gas natural era de 65 años, lo que significa que si las reservas actualmente conocidas siguieran utilizándose con la tasa de consumo de 2000, durarían hasta 2065. Esta simple extrapolación será desmentida por dos fenómenos: uno es que se descubrirán nuevas reservas, el otro es que el consumo de gas crecerá por encima de la tasa de 2000.

Por tanto, es mejor partir de las estimaciones de los recursos de gas remanentes (es decir, la suma de las reservas actuales y las todavía no descubiertas). Supongamos, a modo de ejemplo ilustrativo, que los recursos de gas resulten al final suficientes para abastecer al mundo con la tasa de consumo de 2000 durante 260 años. Esta cifra se sitúa más o menos en la mitad del margen estimado de 160 a 310 años que figura en el cuadro 3-1. Si la tasa de consumo de 2000 permaneciera constante, los recursos de gas descenderían linealmente, como refleja la diagonal de la figura 3-13, y durarían 260 años. Pero si el consumo de gas sigue creciendo como lo ha hecho desde 1970 a un ritmo de alrededor del 2,8 % anual, el recurso heredado para un período

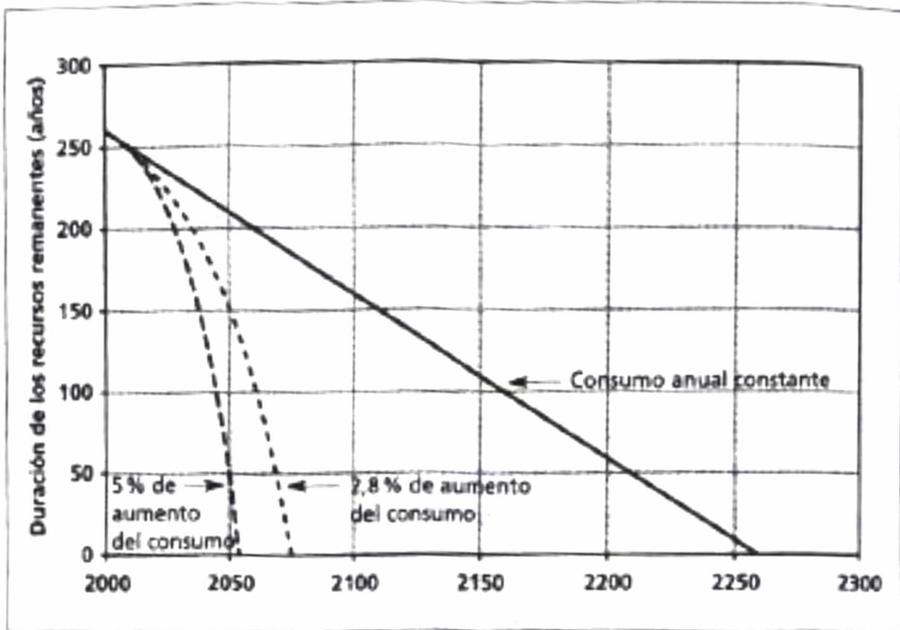


Figura 3-13 Algunas posibles trayectorias del agotamiento del gas natural en el mundo

Si los «recursos finalmente recuperables» que quedan de gas natural permiten abastecer a la humanidad durante 260 años con la tasa de consumo del año 2000, este nivel de consumo puede mantenerse hasta 2260. Pero la escasez de petróleo, combinada con los problemas ambientales del carbón, podría acelerar el uso de gas durante las próximas décadas. Si el consumo de gas creciera con su tasa actual del 2,8 %, la base estimada del recurso se agotaría en 2075. Con una tasa de crecimiento del 5 % anual, el recurso mundial de gas desaparecería en 2054.

de 260 años caería en picado de forma exponencial, como indica la curva más gruesa de la figura 3-13. En vez de agotarse en el año 2260, lo haría en 2075; en vez de durar 260 años, sólo duraría 75 años.

Si para frenar el cambio climático y evitar el agotamiento del petróleo el mundo recurre al gas natural para cubrir la demanda energética soportada actualmente por el carbón y el petróleo, la tasa de crecimiento podría ser bastante más rápida que el 2,8 % anual. Si fuera del 5 % anual, el «abastecimiento de 260 años» se agotaría al cabo de 54 años.

La figura 3-14 muestra cómo tendrían que aumentar los descubrimientos para permitir un crecimiento constante del consumo de gas natural al ritmo del 2,8 % anual. Con arreglo a las matemáticas del crecimiento exponencial, el volumen de gas descubierto y extraído tendría que duplicarse cada 25 años.

El problema no es que el mundo esté a punto de quedarse sin gas natural. Los notables recursos que quedan serán esenciales como combustible de transición mientras se generaliza el uso de fuentes de energía más sostenibles. El problema es que los combustibles fósiles son asombrosamente limitados, sobre todo si su consumo

Producido antes de 2000	2000–2025	2050–2075
2025–2050		
<p>Habría que descubrir y producir este volumen de gas entre los años 2075 y 2100 si el consumo mundial de gas sigue creciendo con la tasa actual del 2,8 % anual.</p>		

*Figura 3-14 Descubrimientos de gas necesarios para mantener el crecimiento*

Si la tasa de crecimiento del consumo de gas natural se mantiene en el 2,8 % anual, cada veinticinco años habrá que descubrir un nuevo volumen de gas equivalente al de los descubrimientos anteriores.

crece exponencialmente, y no deberían despilfarrarse. En la escala temporal de la historia de la humanidad, la era de los combustibles fósiles no será más que un breve lapso.

Puesto que existen sustitutos renovables de los combustibles fósiles, no necesariamente tendrá que haber escasez global de energía. Dos opciones energéticas disponibles son sostenibles en la fuente, ecológicamente soportables, técnicamente viables y cada vez más económicas. Una de ellas, el aumento de la *eficiencia*, puede ponerse en práctica rápidamente. La otra, las energías renovables de *base solar*, sólo necesitarán un poco más de tiempo. Algunos dirán que la energía nuclear forma parte del pequeño grupo de soluciones potenciales del problema energético del mundo. No compartimos esta idea debido a los problemas irresueltos del procesado de los residuos y porque las otras dos soluciones son mucho más factibles. Son más rápidas, baratas, seguras y mucho más fáciles de desarrollar en las naciones más pobres.

La eficiencia energética implica producir los mismos servicios energéticos finales —luz, calor, aire acondicionado, transporte de pasajeros y mercancías, bombeo de agua, accionamiento de motores—, pero utilizando menos energía para ello. Implica mantener o mejorar la calidad de vida material, normalmente a menor coste: no sólo de la energía, sino también menos contaminación, menos consumo de las fuentes energéticas nacionales, menos conflictos en torno a la ubicación de las plantas y, en muchos países, menos deuda externa y menos costes militares para asegurar el acceso o controlar los recursos extranjeros.

Las tecnologías eficientes —desde la mejora del aislamiento hasta el desarrollo de motores más ahorradores— mejoran tan rápidamente que cada año hay que revisar

a la baja las estimaciones de la energía necesaria para cumplir cualquier tarea dada. Una bombilla fluorescente compacta dará la misma cantidad de luz que una bombilla incandescente pero consumirá tan sólo un cuarto de electricidad. El aislamiento de las superventanas de todos los edificios de Estados Unidos permitiría ahorrar el doble de la energía que este país extrae del petróleo de Alaska. Por lo menos diez empresas automovilísticas han construido prototipos de coches que recorren de 20 a 60 kilómetros con un litro de gasolina, y los planteamientos técnicos más avanzados ya apuntan a 70 kilómetros por litro. Contrariamente a la creencia popular, estos coches eficientes superan todas las pruebas de seguridad y el coste de fabricación de algunos de ellos no será mayor que el de los modelos actuales<sup>68</sup>.

Los cálculos de la cantidad de energía que se podría ahorrar gracias a la eficiencia dependen de las inclinaciones técnicas y políticas de las personas que los inspiran. En el extremo conservador del abanico parece ser cierto que la economía estadounidense podría hacer todo lo que hace, con las tecnologías actualmente disponibles y a un coste igual o inferior al actual, consumiendo la mitad de energía. Esto situaría a Estados Unidos en el mismo nivel de eficiencia que Europa Occidental<sup>69</sup> y reduciría el drenaje mundial de petróleo en un 14 %, el de carbón en un 14 % y el de gas en un 15 %. En Europa Oriental y en el mundo menos industrializado son posibles mejoras similares o incluso mayores de la eficiencia.

Los optimistas dicen que esto no es más que el comienzo. Creen que Europa Occidental y Japón, que ya son las zonas del mundo energéticamente más eficientes, podrían multiplicar sus eficiencias por 2 o 4 con tecnologías ya disponibles o fácilmente previsibles en un plazo de veinte años. Una eficiencia de este calibre permiti-

ría abastecer la mayor parte o la totalidad de la energía mundial desde fuentes renovables de origen solar: sol, viento, hidroelectricidad y biomasa. El Sol vierte cada día 10.000 veces más energía sobre la Tierra que la que consumen actualmente los seres humanos<sup>70</sup>.

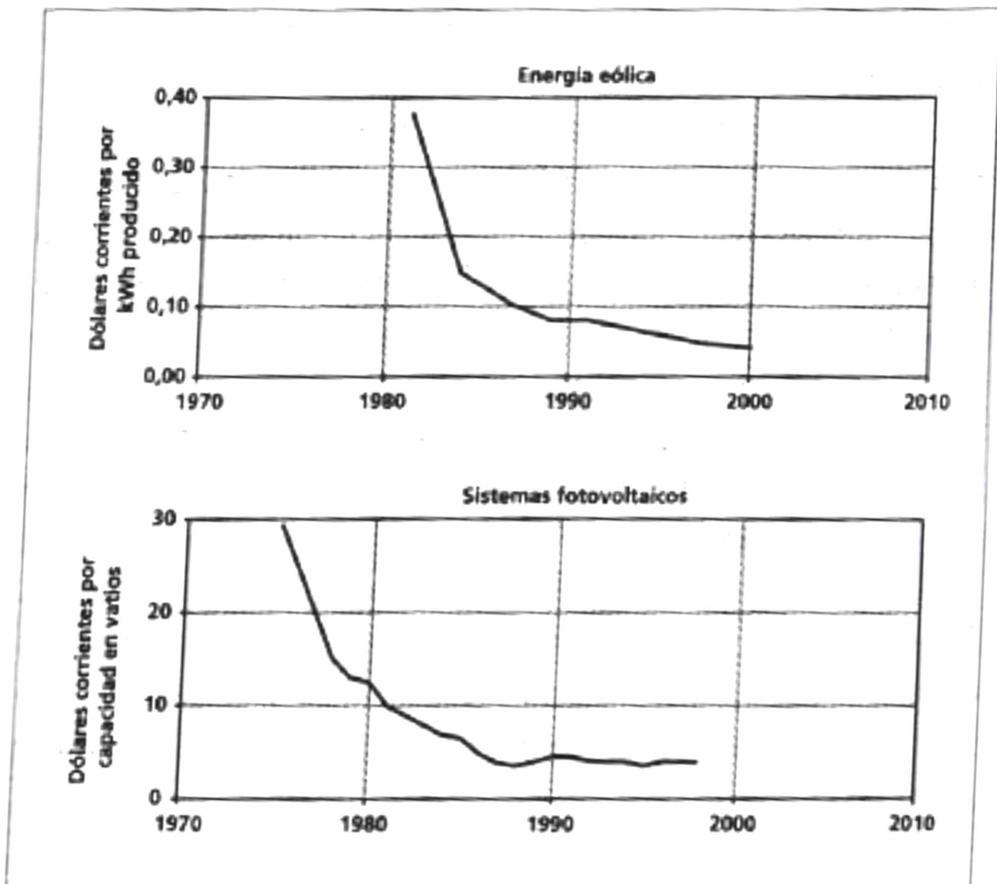
Los avances técnicos en materia de captación de la energía solar han sido más lentos que los del aumento de la eficiencia, pero aun así han sido constantes. Los costes de la energía solar fotovoltaica y eólica han descendido a pasos agigantados durante los últimos veinte años (figura 3-15). En 1970, la electricidad fotovoltaica se generaba con un coste de inversión de 120 dólares estadounidenses por vatio. En el año 2000, el coste había descendido a 3,5 dólares por vatio<sup>71</sup>. En los países menos industrializados, la electricidad fotovoltaica ya es la opción más rentable para las aldeas y los proyectos de regadío que no pueden soportar el coste de la inversión necesaria para conectarse a una red eléctrica distante.

Con el coste actual, la energía eólica tiene un potencial de crecimiento muy rápido. A finales de 2002, la capacidad mundial instalada de energía eólica superaba los 31.000 megavatios, que equivalen a más de treinta reactores nucleares. Esto supone un aumento de la capacidad del 28 % desde finales de 2001 y un crecimiento del 400 % en los cinco años transcurridos desde finales de 1997<sup>72</sup>. Un cambio de tal magnitud puede favorecer toda clase de especulaciones sobre el futuro de la energía.

Creo que estamos viviendo los últimos días de la compañía petrolera tradicional. [...] La economía del propio mundo cambia cuando uno aparca el coche y utiliza entonces la célula de combustible para generar electricidad para su hogar. La red eléctrica de todo un país empieza a parecerse más a Internet que a un bastidor. En efecto, si todos los au-

tomóviles que circulan en Estados Unidos tuvieran células de combustible, tendríamos una capacidad eléctrica cinco veces superior a la base instalada actualmente<sup>73</sup>.

Las fuentes de energía renovables no son inocuas para el medio ambiente y tampoco son ilimitadas. Los parques eólicos ocupan terreno y precisan carreteras de acceso. Algunos tipos de paneles solares contienen materiales tóxicos. Las presas hidroeléctricas inundan tierras y desecan los ríos de curso libre. La energía de biomasa sólo es tan sostenible como las prácticas agrícolas



*Figura 3-15 Coste de la electricidad eólica y fotovoltaica*

Entre 1980 y 2000, el coste de la electricidad generada por los parques eólicos y sistemas fotovoltaicos descendió vertiginosamente. La electricidad eólica empieza a ser competitiva con respecto a las nuevas centrales eléctricas que usan combustible fósil. (Fuentes: AWEA; EIA/DoE.)

y silvícolas que producen la biomasa. Algunas fuentes solares están atenuadas y son intermitentes y precisan amplias zonas de captación y complejos mecanismos de almacenamiento<sup>74</sup>, y todas ellas requieren capital físico y una gestión cuidadosa. Las fuentes de energía renovables también tienen limitada la tasa de producción; pueden fluir para siempre, pero sólo con un caudal fijo. No soportan una población indefinidamente numerosa y un aumento rápido del capital instalado. Pero pueden suministrar la base energética para la sociedad sostenible del futuro. Existen en abundancia, están extendidas y son variadas. Sus flujos de contaminación asociados son más bajos y generalmente menos dañinos que los de la energía fósil o nuclear.

Si se desarrollaran las fuentes más sostenibles y menos contaminantes y se emplearan con un alto grado de eficiencia, podrían satisfacer las necesidades del género humano sin traspasar los límites. No hace falta nada más que voluntad política, algunos avances tecnológicos y un modesto cambio social.

Puesto que por lo visto las reservas de gas (no descubiertas) son relativamente amplias, parece –al comienzo del nuevo milenio– que las principales limitaciones del uso de energía se hallan en el lado de los sumideros. Más adelante, en este mismo capítulo, se comentará la cuestión del cambio climático causado por las emisiones de dióxido de carbono originadas por el consumo de energía.

#### MATERIALES

La extracción o recogida de recursos naturales primarios exige a menudo transportar o procesar grandes cantidades de materiales que pueden alterar o dañar el medio ambiente aunque carezcan de valor económico. Por ejemplo, para obtener acceso a yacimientos de metales, minerales o filones de carbón [...]

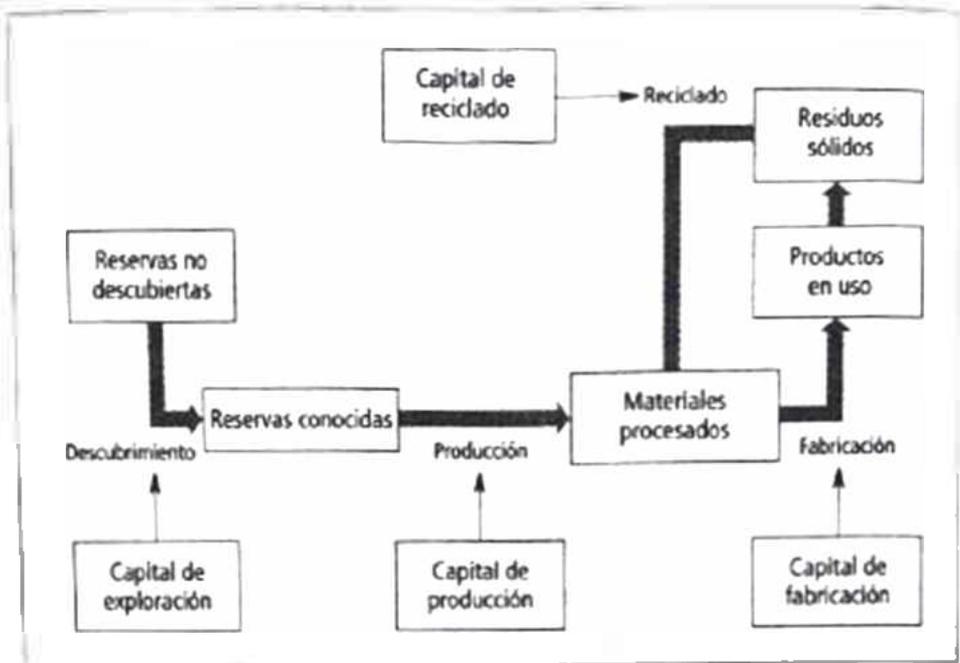
hay que mover ingentes cantidades de materiales o terrenos de recubrimiento. Muchas menas en crudo tienen que procesarse o concentrarse antes de convertirse en mercancías comerciales, dejando grandes volúmenes de residuos de proceso que hay que desechar. [...] Todos estos flujos forman parte de la actividad económica de un país, pero la mayoría de ellos nunca entran en la economía monetaria. [...] La contabilidad económica no suele incluirlos. Las estadísticas resultantes subestiman la dependencia de una economía industrial de los recursos naturales.

WORLD RESOURCES INSTITUTE, 1997

Tan sólo el 8 % de la población mundial posee un automóvil. Centenares de millones de personas habitan en viviendas inadecuadas o carecen de techo, por no hablar de frigoríficos o televisores. Si va a haber más habitantes en el mundo y si éstos han de contar con más o mejores viviendas, servicios sanitarios, educación, coches, frigoríficos, televisores, necesitarán acero, hormigón, cobre, aluminio, plástico y muchos otros materiales.

El flujo de materiales que va de la tierra, pasa por la economía y vuelve a la tierra puede ilustrarse mediante un diagrama de la misma manera que el de los combustibles fósiles, pero con una excepción: a diferencia de estos últimos, los materiales como los metales y el vidrio no se transforman en gases de combustión después de su uso. O bien se acumulan en alguna parte en forma de residuos sólidos, o bien se recuperan y reciclan o se trituran, pulverizan, lixivian, vaporizan o dispersan de alguna manera en los suelos, las aguas o el aire.

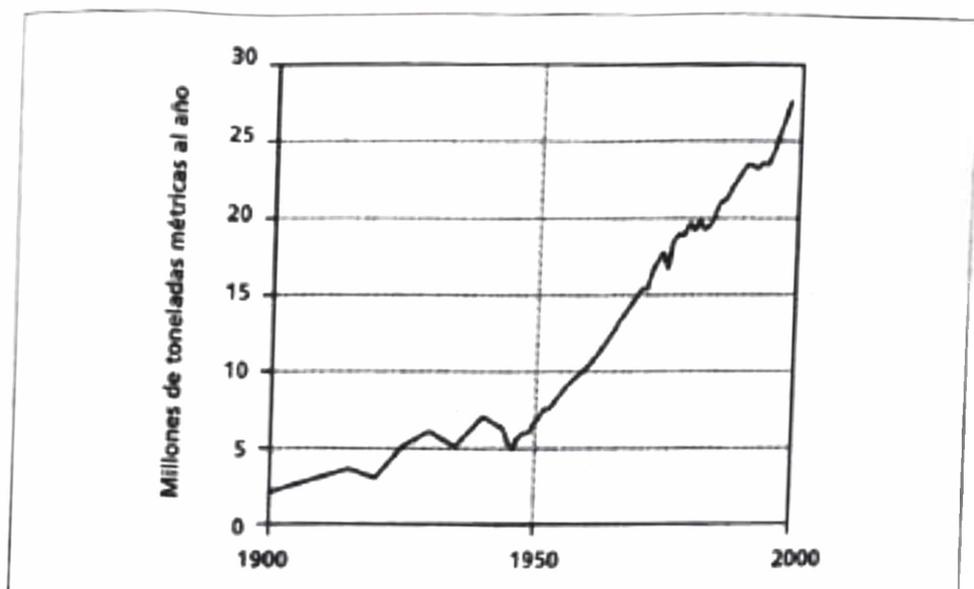
La figura 3-16 (véase p. 183) muestra la historia del consumo global de cinco importantes metales entre los años 1900 y 2000. Los datos de consumo reflejan un crecimiento del mismo superior al cuádruplo de 1950 a 2000.



### *Reservas de reciclado desconocidas*

La cantidad de cobre, níquel, estaño y otros metales asociados que pueden usar incluso las personas acomodadas cada año es limitada. Este límite es alto, sin embargo, al menos si nos atenemos al estilo de vida estadounidense. En el caso de la mayoría de los metales, el uso medio de una persona en el mundo industrializado es de 8 a 10 veces superior al de los habitantes del mundo no industrializado. Si todos los miembros de una población mundial de finalmente 9.000 millones de personas consumieran la misma cantidad de materiales que el ciudadano estadounidense medio de finales del siglo xx, habría que incrementar la producción mundial de acero cinco veces, la de cobre ocho veces y la de aluminio nueve veces.

La mayoría de las personas sienten intuitivamente que semejantes flujos de materiales no son posibles ni necesarios. No son posibles debido a los límites de las fuentes y los sumideros del planeta. A lo largo de todo el camino que va de la fuente al sumidero, el procesado,



*Figura 3-16 Consumo mundial de cinco importantes metales*  
El consumo de cobre, plomo, cinc, estaño y níquel creció rápidamente durante el siglo xx. (Fuentes: Klein Goldewijk y Battjes; U. S. Bureau of Mines; USGS; U. S. CRB.)

fabricación, manipulación y uso de los materiales deja regueros de contaminación. No son necesarios porque el caudal de producción de materiales por persona en los países ricos de finales del siglo xx, al igual que los de sus alimentos, agua, madera y energía, es derrochador. Se podría sostener un buen nivel de vida con una menor capacidad de destrucción del planeta.

Hay indicios de que el mundo está aprendiendo la lección. La figura 3-17 muestra la historia reciente de la producción mundial de acero. Algo ocurrió a mediados de la década de 1970 que interrumpió lo que fue una suave tendencia al crecimiento exponencial. Existen varias teorías para explicar esta reducción de la tasa de crecimiento. Todas ellas parecen parcialmente correctas.

- La nueva tendencia a la «desmaterialización» ha sido impulsada por incentivos económicos y la posibilidad técnica de hacer más con menos.



Figura 3-17 Consumo mundial de acero

El consumo de acero sigue una curva de crecimiento en forma de S. (Fuentes: Klein Goldewijk and Battjes; U. S. Bureau of Mines; USGS; U. S. CRB.)

- Las fuertes subidas del precio del petróleo en 1973 y de nuevo en 1979 hicieron que aumentaran drásticamente los precios de los metales cuya producción requiere mucha energía, reforzando así los incentivos al ahorro de energía y materiales en todas las aplicaciones.
- Esos mismos precios más elevados, además de las leyes de protección ambiental y los problemas de vertido de residuos sólidos, favorecieron el reciclado de los materiales.
- Todas estas presiones aceleraron una revolución tecnológica. Los metales fueron sustituidos por plásticos, cerámicas y otros materiales. Los productos metálicos —automóviles, latas de bebidas y muchos más— se hicieron más ligeros.
- En la economía estancada de la década de 1980, los sectores de la industria pesada fueron los que estaban más deprimidos, por lo que la demanda de metales de base se redujo desproporcionadamente<sup>75</sup>.

Aunque las razones económicas del menor crecimiento del consumo de materiales puede ser temporal, los cambios tecnológicos serán probablemente permanentes, al igual que las presiones ambientales a favor de la reducción de los flujos de materiales. Es interesante comprobar que los precios de los materiales han seguido bajando durante los últimos decenios, un indicador de que la oferta ha crecido más que la demanda<sup>76</sup>.

Las comunidades pobres siempre han recuperado y reciclado los materiales debido a la escasez de fuentes. Las comunidades ricas vuelven a aprender ahora a reciclar debido a la escasez de sumideros. En este proceso, el reciclado deja de ser una actividad de gran intensidad de mano de obra para convertirse en una actividad de gran intensidad de capital y energía: volteadores, trituradores y cedazos de compost mecanizados, digestores, mezcladoras de lodos, máquinas receptoras (que devuelven el depósito pagado por las botellas retornables) y empresas de gestión que elaboran planes de recuperación de residuos para industrias y municipios.

Los fabricantes con visión de futuro diseñan productos —desde coches hasta teteras— pensando en su desmontaje final y su reciclado. Un automóvil BMW nuevo, por ejemplo, tiene una carrocería de plástico diseñada para facilitar el reciclado. Cada vez más piezas de plástico llevan grabado el tipo de resina de que están hechas y cada vez es más habitual mezclar menos tipos diferentes con el fin de facilitar una posterior separación y reutilización.

Los pequeños cambios que se multiplican muchas veces pueden marcar una gran diferencia. Tras la invención en 1976 de la lengüeta de apertura de las latas de aluminio para bebidas, la lengüeta no se separaba ya de la lata y, por tanto, en vez de acabar en la basura retornaba al proceso de reciclado. Alrededor del comienzo del nuevo milenio, los habitantes de Estados Unidos

utilizaban unos 105.000 millones de latas de aluminio al año, de las que se reciclaba un 55 %. Esto significa que *cada año* el reciclado de esas pequeñas lengüetas permitió ahorrar 16.000 toneladas de aluminio y unos 200 millones de kilovatios-hora de electricidad<sup>77</sup>.

La separación y el reciclado de los materiales después de su uso son un paso hacia la sostenibilidad. Empiezan a mover los materiales a través de la economía humana de la misma manera en que se mueven a través de la naturaleza: en circuitos cerrados. En la naturaleza, los residuos de un proceso se convierten en insumos de otro proceso. Sectores enteros de los ecosistemas, particularmente en el suelo, operan para desensamblar los materiales de desecho de la naturaleza, separarlos en elementos utilizables y reconducirlos después de nuevo a las criaturas vivas. La economía humana moderna también desarrolla, por fin, un sector de reciclado<sup>78</sup>.

Pero el reciclado de la basura sólo abarca el extremo final y menos problemático del flujo de materiales. Una regla empírica dice que cada tonelada de basura en el extremo final del flujo ha implicado también la generación de 5 toneladas de residuos en la fase de fabricación y 20 toneladas de residuos en el lugar de extracción inicial del recurso (minas, pozos de bombeo, aserraderos, explotaciones agrícolas)<sup>79</sup>. La mejor manera de reducir estos flujos de residuos consiste en incrementar el período de vida útil de los productos y reducir los flujos de materiales en la fuente.

La prolongación de la vida útil mediante la mejora del diseño, la reparación y la reutilización (como por ejemplo lavando los vasos usados en lugar de emplear vasos desechables) es más efectiva que el reciclado, ya que no precisa operaciones de compresión, molturación, mezcla, depuración y refabricación de materiales reciclados. Si se duplica la vida útil media de cualquier

producto se reducirá a la mitad el consumo de energía, la generación de residuos y la contaminación, así como el agotamiento final de los materiales utilizados para fabricarlo. Pero para sacar conclusiones definitivas sobre la manera de minimizar la huella ecológica es preciso realizar un exhaustivo análisis del ciclo de vida, que a menudo da resultados asombrosos.

La reducción en la fuente implica encontrar la manera de realizar el mismo trabajo utilizando menos material. Es el equivalente a la eficiencia energética, y las posibilidades son enormes. En 1970, un automóvil típico de Estados Unidos pesaba más de tres toneladas, casi en su totalidad compuesto de metales. Hoy en día, el coche medio es mucho más ligero y en gran parte se compone de plástico. Los circuitos electrónicos se insertan en diminutos chips de silicio en lugar de los pesados núcleos ferromagnéticos. Una pequeña memoria portátil que cabe en el bolsillo puede almacenar tanta información como 200.000 páginas impresas. Una fibra capilar de vidrio ultrapuro puede transmitir tantas conversaciones telefónicas como centenares de alambres de cobre y además con una mejor calidad de sonido.

En lugar de las altas temperaturas, las altas presiones, los productos químicos agresivos y la fuerza bruta que han caracterizado los procesos de fabricación desde el comienzo de la Revolución Industrial, los científicos empiezan a entender cómo hacer uso de la inteligencia de las máquinas moleculares y la programación genética. Los avances en nanotecnología y biotecnología permiten a la industria llevar a cabo reacciones químicas de la misma forma en que lo hace la naturaleza, ajustando cuidadosamente una molécula a otra.

Las posibilidades del reciclado, una mayor eficiencia, una vida útil prolongada de los productos y una reducción de las fuentes en el mundo de los materiales

son apasionantes. Sin embargo, a escala mundial todavía no han reducido el vasto flujo de materiales a través de la economía. En el mejor de los casos han desacelerado su tasa de crecimiento. Y aún hay miles de millones de personas que desean tener un automóvil y un frigorífico. Aunque la mayoría de las personas son ahora más conscientes de los límites de los sumideros que de los límites de las fuentes de los caudales de material, el crecimiento continuo de la demanda de materiales también chocará finalmente con los límites de las fuentes. Muchos de los materiales más útiles para la sociedad humana se presentan muy raramente en forma concentrada en la corteza terrestre. Su explotación devenga costes crecientes, medidos en energía, capital, impacto ambiental y quiebra social.

El geólogo Earl Cook ha mostrado gráficamente hasta qué punto están inusualmente concentradas y qué raras son la mayoría de las menas minerales<sup>60</sup>. La tecnología ha mejorado mucho desde que Cook realizó su análisis hace casi tres decenios. Pero las implicaciones generales de su estudio siguen siendo válidas. Algunos minerales, como el hierro y el aluminio, son muy abundantes. No se verán limitados por las fuentes y pueden extraerse en muchas zonas. Otros, como el plomo, el estaño, la plata y el cinc, son mucho más limitados. En su caso, el agotamiento es una perspectiva más inminente.

Los datos sobre reservas y recursos publicados en un estudio reciente acerca de la industria minera mundial por el Instituto Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo (IIED) nos dan una idea de la escasez relativa de los materiales. En el cuadro 3-2 se resumen los datos relativos a ocho metales importantes. Con un crecimiento anual del 2 % (una tasa alta para algunos materiales y baja para otros, pero no un mal promedio), las reservas

CUADRO 3-2  
EXPECTATIVAS DE VIDA DE LAS RESERVAS IDENTIFICADAS  
DE OCHO METALES

Metal	Producción anual 1997-1999 en promedio	Crecimiento anual de la producción 1975-1999 en promedio	Reservas identificadas en 1999	Expectativa de vida de las reservas identificadas con un crecimiento anual de la producción del 2 %	Base del recurso	Expectativa de vida de la base del recurso con un crecimiento anual de la producción del 2 %
	(millones [10 <sup>6</sup> ] de toneladas métricas al año)	(porcentaje anual)	(miles de millones [10 <sup>3</sup> ] de toneladas métricas al año)	(años)	(billones [10 <sup>11</sup> ] de toneladas métricas al año)	(años)
Aluminio	124	2,9	25	81	2.000.000	1.070
Cobre	12	3,4	0,34	22	1.500	740
Hierro	560	0,5	74.000	65	1.400.000	890
Plomo	3,1	-0,5	0,064	17	290	610
Níquel	1,1	1,6	0,046	30	2,1	530
Plata	0,016	3,0	0,0028	15	1,8	730
Estaño	0,21	-0,5	0,008	28	40,8	760
Cinc	0,8	1,9	0,19	20	2.200	780

Este cuadro ilustra la enorme brecha existente entre las reservas identificadas y la base del recurso. Hoy en día se conocen las reservas identificadas y se espera que puedan extraerse con la tecnología disponible y a precios actuales. La base del recurso es la cantidad total estimada presente en la corteza terrestre. La humanidad nunca será capaz de explotar toda la base de los recursos; no obstante, los cambios de precio, el desarrollo de la tecnología así como los nuevos descubrimientos incrementarán sin duda las reservas identificadas. (Fuente: MMSD.)

actuales soportarían la producción durante períodos que van de 15 a 80 años. Está claro que la tecnología mejorará y los precios subirán, mientras los productores exploran nuevas zonas y descubren nuevos materiales extraíbles. De modo que estas estimaciones de la duración de los recursos son bajas. Pero ¿cuán bajas? Los cálculos de la abundancia en la corteza terrestre apuntan a unos períodos productivos de 500 a 1.000 años. La disponibilidad real se sitúa en algún punto intermedio. El volumen de recursos que pueden adscribirse a las reservas depende del coste de la energía y del capital, ya que los productores tienen que hacer frente a los costes sociales y ambientales de sus actividades.

El estudio del IIED apuntó al papel potencial que los sumideros pueden llegar a desempeñar en la limitación del uso de los materiales.

Aunque las tendencias de la producción y uso de minerales y de la base estimada de los recursos han aliviado la inquietud en torno al «agotamiento» de los minerales del mundo, los límites potenciales que pueden imponer los factores ambientales y sociales sobre la disponibilidad de los minerales son objeto de creciente atención. Entre los fenómenos que pueden limitar la disponibilidad de los minerales figuran los siguientes:

- La disponibilidad de energía o los efectos ambientales del uso de energía a medida que aumenta la cantidad de energía por unidad de producción con menas de menor concentración.
- La disponibilidad de agua para la producción de minerales o los impactos ambientales del uso de cantidades crecientes de agua con menas de menor concentración.
- Las preferencias de la sociedad por utilizar el terreno para fines distintos de la producción minera, bien en pro de la diversidad biológica y la protección de la vida

salvaje intacta, bien por su significado cultural, la agricultura o la seguridad alimentaria.

- Intolerancia comunitaria ante los efectos de la industria minera.
- Cambios de las pautas de consumo.
- Límites de los ecosistemas frente a la acumulación de productos o subproductos minerales (especialmente metales) en la atmósfera, el agua, el suelo o la vegetación<sup>81</sup>.

La figura 3-18 muestra cómo avanza el proceso de agotamiento de los minerales, como ocurre en el caso del descenso gradual de la concentración de las menas cupríferas. La figura 3-19 refleja la consecuencia de la disminución de la concentración de las menas. A medi-

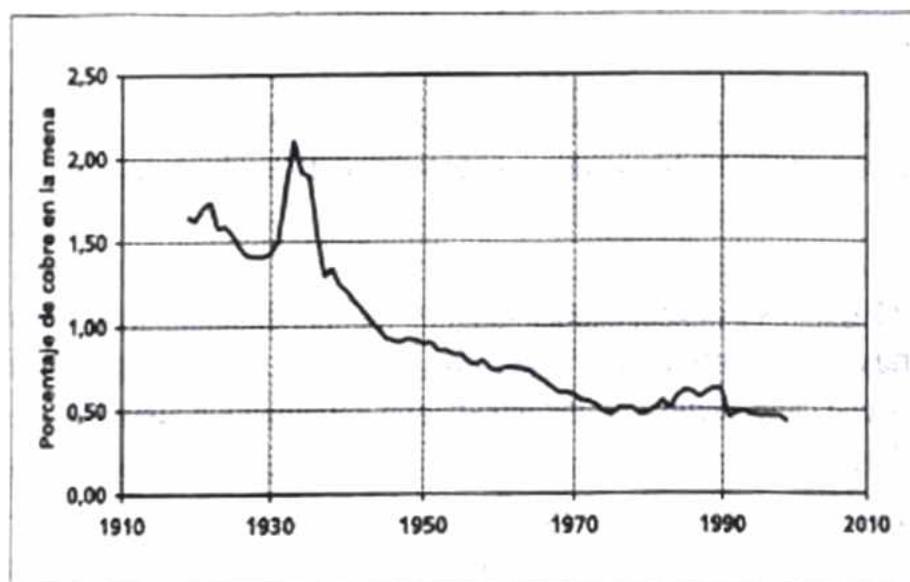
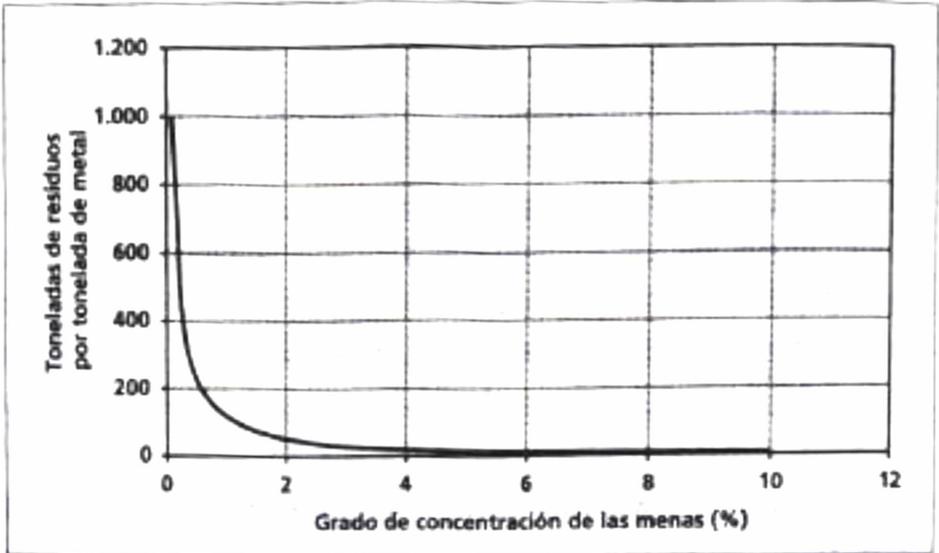


Figura 3-18 Pérdida de calidad de las menas cupríferas extraídas en Estados Unidos

Antes de 1910 se extraían en Estados Unidos menas con un contenido medio de cobre del 2 al 2,5 %. Desde entonces se ha producido un descenso persistente del grado medio. El pico de los años treinta y el ligero aumento de los años ochenta se debieron a sendas crisis económicas que provocaron el cierre de minas marginales y sólo permitieron mantener operativas las que extraían menas más ricas. (Fuentes: U. S. Bureau of Mines; USGS.)



*Figura 3-19 El agotamiento de las menas minerales incrementa enormemente los residuos mineros generados en su extracción*

A medida que el grado medio de las menas disminuye debido al agotamiento de más del 8 % al 3 %, se produce un aumento apenas perceptible del volumen de residuos mineros generados por tonelada del metal producido. Por debajo del 3 %, la cantidad de residuos por tonelada aumenta rápidamente. Al final, el coste de gestión de los residuos superará el valor del metal producido.

da que decae la cantidad de metal utilizable en las menas, el volumen de roca que hay que extraer, moler y tratar por tonelada de producto aumenta a una velocidad asombrosa. Cuando el grado medio de las menas cupríferas extraídas en Butte, Montana (Estados Unidos), descendió del 30 al 0,5 %, las escorias generadas por tonelada de cobre aumentaron de 3 a 200 toneladas. Esta curva ascendente de los residuos viene acompañada de una curva ascendente de la energía necesaria para producir cada tonelada del material final. El agotamiento de las menas metalíferas acelera la tasa de agotamiento de los combustibles fósiles e incrementa la carga que han de soportar los sumideros del planeta.

## Sumideros de contaminación y residuos

Durante los últimos decenios, la humanidad se ha convertido en una nueva fuerza de la naturaleza. Alteramos los sistemas físicos, químicos y biológicos de nuevas maneras, a ritmos más rápidos y en las escalas espaciales más amplias jamás registradas en la Tierra. Los humanos se han embarcado sin saberlo en un vasto experimento con nuestro planeta. El resultado de este experimento es una incógnita, pero tiene profundas implicaciones para toda la vida existente en la Tierra.

JANE LUBCHENCO, 1998

En la época de la Conferencia de Estocolmo sobre el Medio Ambiente, celebrada en 1972, sólo diez países tenían ministerios o agencias de medio ambiente. Actualmente son pocos los países que no cuentan con una burocracia ambiental. Ha aparecido en escena una profusión de programas educativos sobre el medio ambiente, junto con numerosos grupos especializados que defienden diversas causas ecológicas. El historial de logros de estas instituciones de protección del medio ambiente relativamente nuevas es variopinto. Sería falso concluir que el mundo ha resuelto sus problemas de contaminación o que no ha habido ningún progreso.

Los mayores éxitos se han producido en relación con determinadas toxinas que son claramente dañinas para la salud humana y que pueden individualizarse y simplemente prohibirse. La figura 3-20 muestra, por ejemplo, cómo la prohibición del plomo en la gasolina en Estados Unidos ha permitido reducir las concentraciones de este mineral en la sangre humana. Los niveles de otras materias contaminantes en determinados lugares, como el ce-

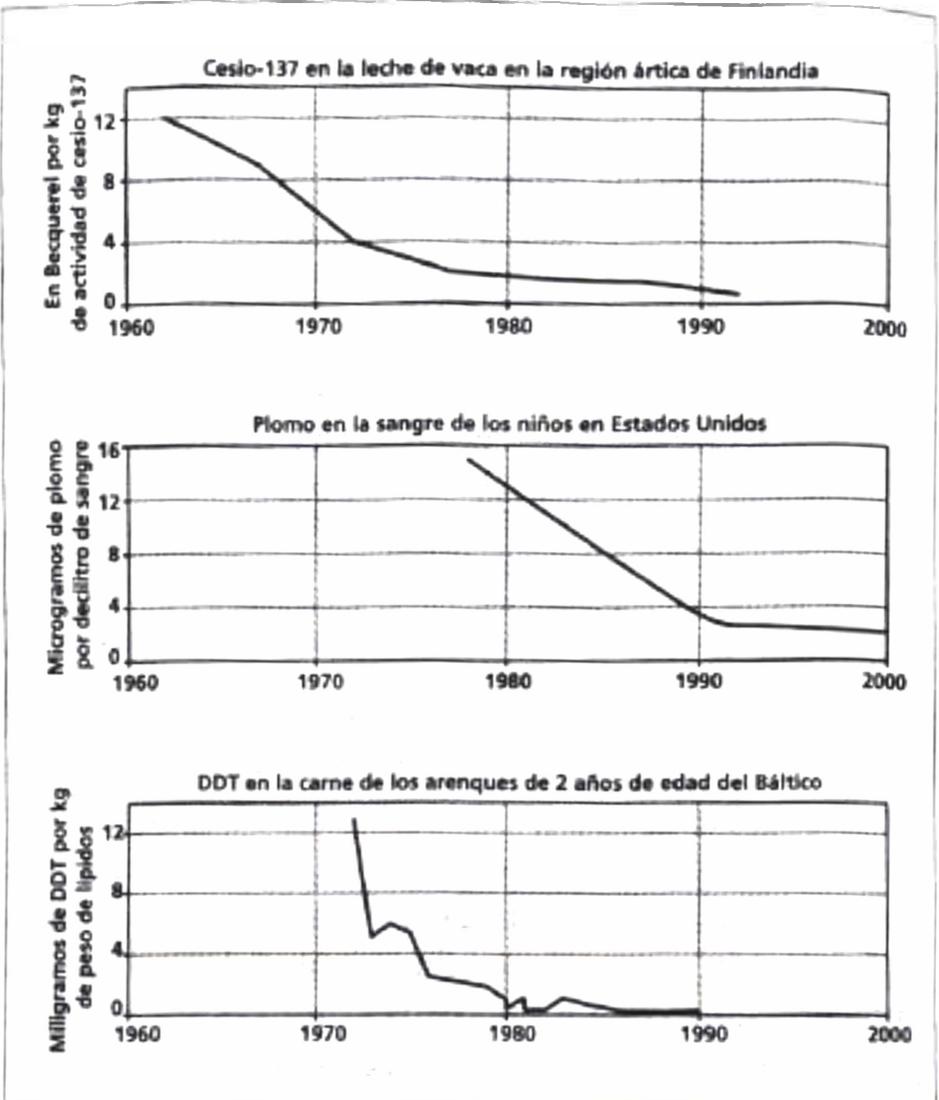


Figura 3-20 Reducción progresiva de la contaminación humana y ambiental

Los niveles de algunas materias contaminantes han descendido a lo largo de los últimos decenios en ciertos lugares. Las mejoras más notables se deben a la prohibición directa de sustancias tóxicas como el plomo en la gasolina y el plaguicida DDT, así como a la suspensión de las pruebas nucleares en la atmósfera. (Fuentes: Instituto Sueco de Investigación Ambiental; AMAP; EPA.)

sio-137 en Finlandia y el DDT en los países bálticos, también han descendido en los últimos decenios.

En los países industrializados, después de denodados esfuerzos y notables gastos, se ha logrado reducir par-

cialmente algunas de las materias contaminantes del agua y del aire más comunes, aunque no todas. La figura 3-21 muestra que en los países del G7<sup>82</sup> las emisiones de dióxido de azufre han disminuido casi un 40 % mediante la instalación de depuradores en las chimeneas y el uso de combustibles de bajo contenido de azufre. El dióxido de carbono y el óxido de nitrógeno son difíciles de depurar químicamente; se han mantenido más o menos constantes durante años a pesar del crecimiento económico, sobre todo gracias a las mejoras de la eficiencia energética.

La historia de las materias contaminantes en el Rin

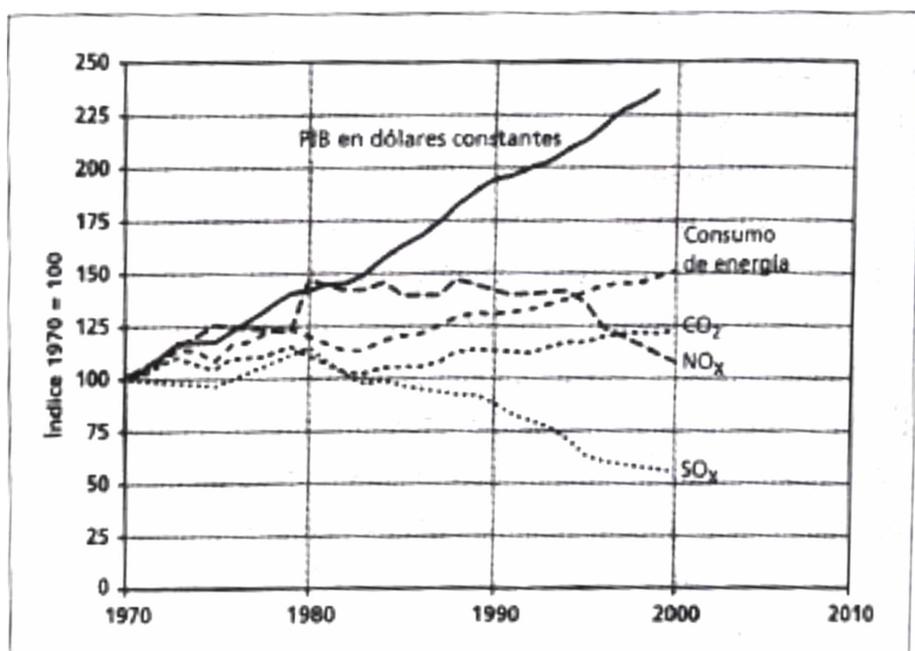


Figura 3-21 Tendencias de las emisiones de determinadas materias contaminantes del aire

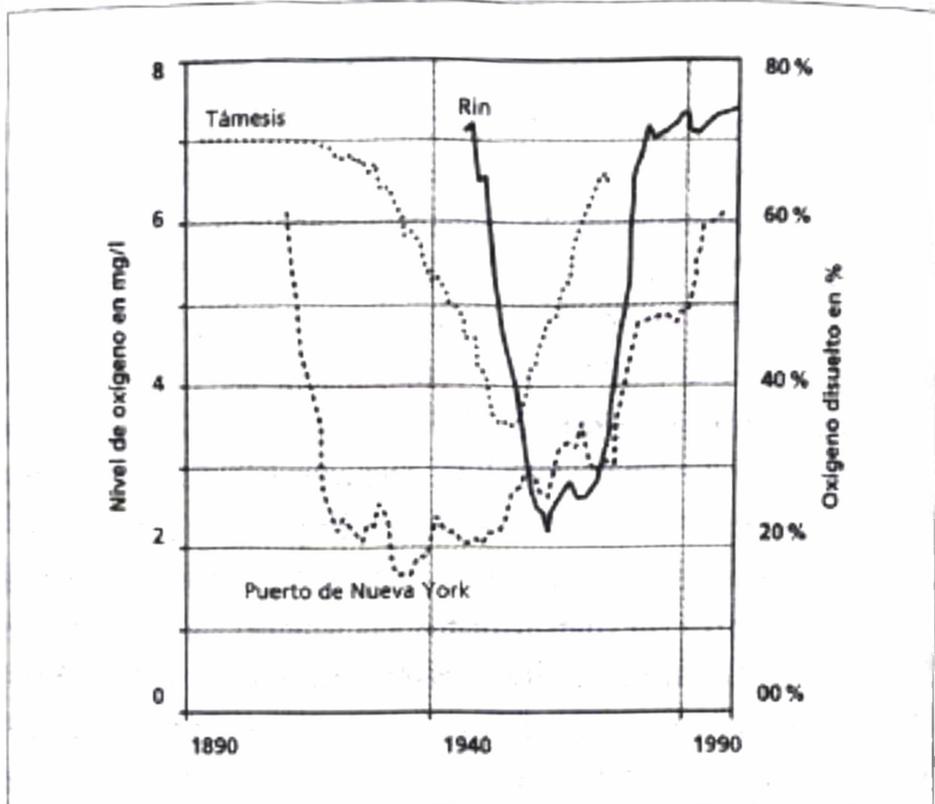
Los países industrializados han realizado esfuerzos significativos por mejorar la eficiencia energética y el control de las emisiones. A pesar de que sus economías (de acuerdo con el PIB) se han duplicado desde 1970, sus emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> se han mantenido casi constantes (sobre todo gracias a la eficiencia energética) y las de óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) han disminuido un 40 % (en virtud de la eficiencia energética y de tecnologías activas de depuración). (Fuentes: Banco Mundial; OCDE; WRI.)

es un excelente ejemplo ilustrativo de los triunfos y las decepciones en el intento de controlar la contaminación del agua. Después de la Segunda Guerra Mundial, los crecientes niveles de contaminación privaron progresivamente al Rin del oxígeno necesario para la vida fluvial. El contenido de oxígeno tocó fondo alrededor de 1970 en niveles que impedían toda forma de vida, pero para 1980 había mejorado en buena medida sobre todo gracias a fuertes inversiones en sistemas de tratamiento de aguas residuales. Las plantas depuradoras, sin embargo, no eliminaban los metales pesados tóxicos, como el mercurio y el cadmio, y su concentración no empezó a declinar hasta que los países ribereños del Rin acordaron normas cada vez más estrictas contra la contaminación. Gracias a ello, para el año 2000 los metales pesados habían sido eliminados en gran medida del agua del río. Pero todavía se infiltran en los sedimentos del lecho, y puesto que no se descomponen químicamente, siguen mostrando niveles altos, particularmente en el delta del Rin. Los niveles de cloro también se han mantenido en cotas elevadas. Los países situados río abajo no han hallado todavía la manera de presionar efectivamente sobre la principal fuente de cloro: las minas de sal de Alsacia, aunque puede que éstas finalmente se clausuren. La contaminación de nitrógeno causada por los efluentes de fertilizantes de la agricultura también sigue siendo alta. Debido a que sus fuentes están demasiado dispersas para juntarlas en un sistema de tratamiento de los efluentes, la única manera de reducirla pasa por cambiar las prácticas agrícolas en toda la cuenca del Rin. Aun así, hubo motivos para celebrar, en 1996, la reaparición del primer salmón en el valle de Baden-Baden, en el Alto Rin, tras una ausencia de sesenta años<sup>83</sup>.

De modo similar, otros países industrializados han realizado importantes inversiones con vistas a mejorar la

calidad del agua en grandes ríos y cauces de agua. Gracias a la inversión de decenas de miles de millones de dólares en plantas de tratamiento de residuos, los antiguos pozos negros han recobrado una calidad suficiente para el retorno del salmón. El ejemplo más conocido es probablemente el del Támesis. Pero incluso el agua del puerto de Nueva York se ha vuelto más limpia desde 1970 (figura 3-22)<sup>84</sup>. La circunstancia de que el agua esté más limpia significa, de hecho, que las emisiones por unidad de actividad han disminuido más rápidamente que el crecimiento bastante importante de los niveles de actividad humana. La huella ecológica en los cauces de agua ha disminuido. Lo mismo cabe decir de la calidad del aire en los países industrializados. Mediante la combinación de una normativa estricta, la inversión en filtros y el uso de tecnologías de producción más limpias, los niveles de contaminación atmosférica (por ejemplo, de partículas en suspensión, dióxido de azufre, monóxido de carbono y plomo) han descendido enormemente en el Reino Unido y Estados Unidos a lo largo de los últimos decenios. Incluso se ha logrado reducir los niveles de materias contaminantes más difíciles de tratar, como el dióxido de nitrógeno o el ozono troposférico<sup>85</sup>. También en estos casos, esto se ha conseguido a pesar de un crecimiento significativo de actividades como la generación eléctrica, la calefacción y el transporte de pasajeros y mercancías. Incluso ha habido avances en la eliminación de toxinas modernas, entre ellas el PCB, el DDT y otros plaguicidas<sup>86</sup>. Pero en estos casos el buen resultado está más localizado y el cuadro completo es más diverso, pues muchas de estas sustancias persistentes y bioacumulativas se propagan por todo el planeta y se acumulan en la grasa corporal de poblaciones distantes.

Éstos son los logros de los países ricos que tienen dine-



*Figura 3-22 Niveles de oxígeno en aguas contaminadas*

La contaminación orgánica puede reducir los niveles de oxígeno necesarios para la vida en los ríos. Desde las décadas de 1960 y 1970, las grandes inversiones en sistemas de tratamiento de aguas residuales permitieron mejorar los niveles de oxígeno en el Rin, el Támesis y el puerto de Nueva York. (Fuentes: A. Goudie; P. Kristensen y H. Ole Hansen; OCDE; DEP.)

ro para invertir en la reducción de la contaminación. Los peores niveles de contaminación del aire y del agua del mundo se encuentran actualmente en Europa Oriental y en las economías emergentes, donde es sencillamente inimaginable que se inviertan miles de millones de dólares en la reducción de la contaminación. Este hecho adquirió notoriedad mundial en 2001 cuando una neblina oscureció los cielos del sudeste asiático durante semanas.

Ésta es la situación con respecto a las materias contaminantes más obvias, las que las personas experimentan directamente y por tanto las que llaman la atención

política. También se abordan cada vez más los contaminantes visibles del agua y del aire, con bastante éxito, dada la atención que se presta hoy día a la mejora de la ecoeficiencia por parte de las multinacionales más avanzadas desde el punto de vista ambiental. Sin embargo, esta atención debe hacerse permanente para contrarrestar el continuo aumento de la actividad humana.

Las materias contaminantes menos fáciles de tratar, al menos hasta ahora, son los residuos nucleares, los residuos peligrosos y los residuos que amenazan los procesos biogeoquímicos, como los gases de efecto invernadero. Desde el punto de vista químico son los más difíciles de secuestrar o neutralizar; desde el punto de vista fisiológico son los más difíciles de detectar con nuestros sentidos, y desde el punto de vista económico y político son los más difíciles de regular.

Ningún país ha resuelto el problema de los residuos nucleares. En la naturaleza, estos residuos son peligrosos para todas las formas de vida, tanto por su toxicidad directa como por su mutagenicidad. En manos inadecuadas pueden convertirse en instrumentos del terror. La naturaleza no tiene manera de anular su peligrosidad. Se desintegran en períodos que les son intrínsecos y que pueden durar decenios, siglos o incluso milenios. Como subproductos de la generación de energía nuclear se acumulan sin cesar, almacenados en lugares subterráneos o en estanques de agua dentro de los vasos de contención de los reactores nucleares, con la esperanza de que algún día la creatividad técnica e institucional de la humanidad descubra algún lugar para depositarlos. Debido a ello cunde un amplio y sano escepticismo con respecto al uso a gran escala de la energía nuclear.

Otro importante tipo de residuos problemáticos son los productos químicos sintetizados por la mano humana. Nunca antes habían existido en el planeta y por tan-

to en la naturaleza no han evolucionado organismos capaces de desintegrarlos y convertirlos en inofensivos. Actualmente hay en el comercio más de sesenta y cinco mil productos químicos industriales. Disponemos de datos toxicológicos de algunos de ellos. Cada día acceden al mercado nuevos productos químicos y para muchos de ellos no se realizan comprobaciones de toxicidad<sup>87</sup>. Todos los días se generan en el mundo miles de toneladas de residuos peligrosos, muchos de ellos en los países industrializados. Poco a poco se está reconociendo el problema, y gran parte de estos países empiezan a esforzarse por rehabilitar los suelos y los acuíferos contaminados durante decenios por vertidos irresponsables.

Después están las materias contaminantes que polucionan la Tierra en su conjunto. Estos contaminantes globales afectan a todo el mundo, al margen de dónde se generan. Un ejemplo dramático ha sido el efecto de los productos químicos industriales llamados clorofluorocarbonos en la capa de ozono estratosférica. La historia del ozono es fascinante porque ilustra la primera confrontación clara de la humanidad con un límite global. Es tal su importancia y tantas las esperanzas que alimenta que hemos decidido relatarlas en detalle en el capítulo 5.

La mayoría de científicos, y ahora también muchos economistas, creen que el próximo límite que tendrá que afrontar la humanidad es el efecto invernadero o el cambio climático mundial.

El sistema climático de la Tierra ha cambiado tanto a escala mundial como regional, y algunos de estos cambios pueden atribuirse a actividades humanas.

— El planeta se ha calentado  $0,6 \pm 0,2$  grados Celsius desde 1860, siendo los dos últimos decenios los más cálidos del último siglo.

- El aumento de las temperaturas de la superficie a lo largo del siglo xx en el hemisferio norte es probablemente mayor que el que se haya producido en cualquier otro siglo del último milenio.
- Los patrones de precipitación han cambiado con un incremento de los fenómenos de fuertes precipitaciones en algunas regiones.
- El nivel del mar ha subido unos 10 a 20 cm desde 1900; la mayoría de los glaciares no polares se contraen; la extensión y el grosor del hielo marino ártico disminuyen en verano.
- Las actividades humanas incrementan las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero que calientan la atmósfera y en algunas regiones las concentraciones de aerosoles de sulfato que enfrían la atmósfera.
- La mayor parte del calentamiento observado en los últimos cincuenta años es atribuible a actividades humanas<sup>84</sup>.

Durante decenios, los científicos han estado midiendo la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera causada por la quema de combustibles fósiles. En nuestro primer libro ya publicamos un resumen de los datos sobre el  $\text{CO}_2$ <sup>85</sup>. Se sabe desde hace más de cien años que el dióxido de carbono atrapa el calor e incrementa la temperatura de la Tierra, como un invernadero que deja entrar la energía solar pero le impide salir. Y a lo largo de los últimos treinta años se ha hecho cada vez más evidente que también se acumulan exponencialmente en la atmósfera otros gases de efecto invernadero generados por la actividad humana: metano, óxido nitroso y los mismos clorofluorocarbonos que amenazan a la capa de ozono (figura 3-23).

El cambio climático mundial no es fácil de detectar rápidamente, puesto que el tiempo varía por causas na-

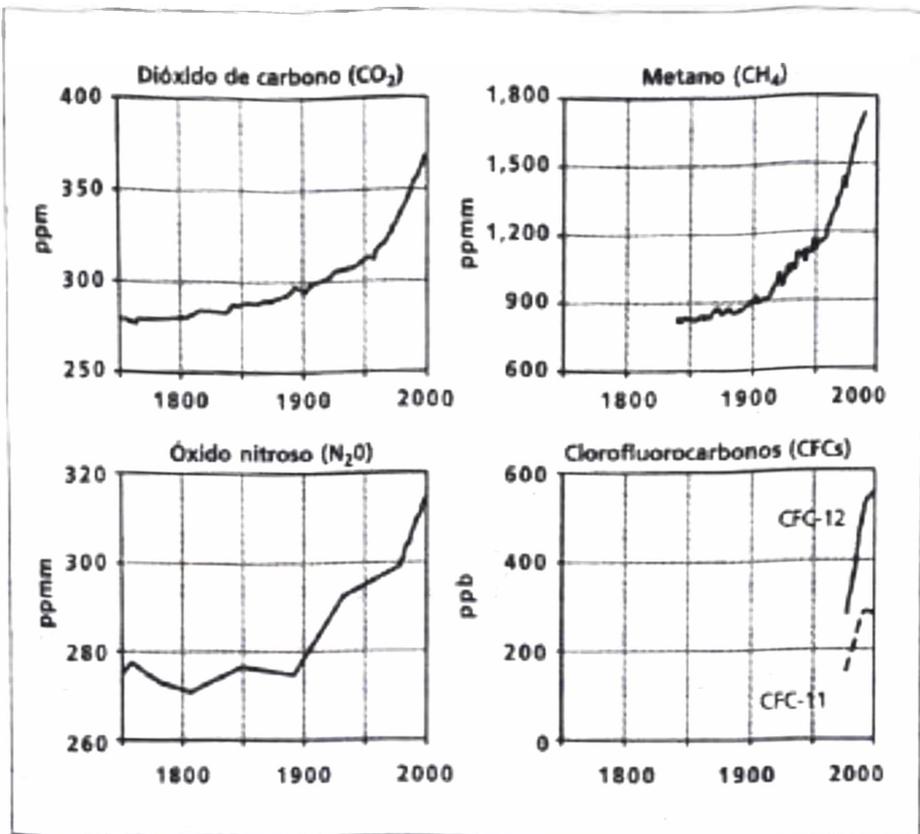


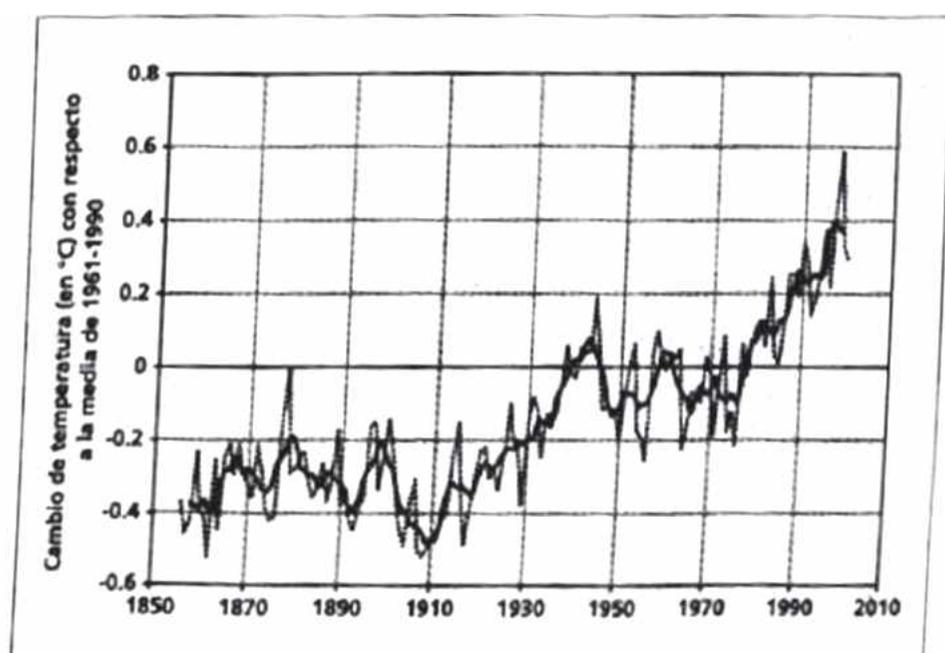
Figura 3-23 Concentraciones mundiales de gases de efecto invernadero

El dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y los clorofluorocarbonos reducen las emisiones de calor de la superficie terrestre al espacio exterior, incrementado de este modo la temperatura en el planeta. La concentración atmosférica de estos gases —excepto los CFC, que se sintetizaron por primera vez a mediados de la década de 1950— viene aumentando desde comienzos del siglo XIX. (Fuentes: CDIAC; PNUMA.)

turales de un día para otro y de un año para otro. El clima es el promedio a largo plazo del tiempo meteorológico; por tanto, sólo puede medirse durante períodos prolongados. Sin embargo, la evidencia del calentamiento del planeta ya era palpable hace un decenio y desde entonces no ha hecho sino aumentar a un ritmo alarmante. Ya es notorio que el año 2003 fue el más caluroso del que se tiene constancia, un dato que no es sorprendente si se tiene en cuenta la velocidad del aumento

de la temperatura media del planeta, tal como ilustra la figura 3-24.

Las imágenes de satélite muestran el retraimiento de la capa de hielo y nieve en el hemisferio norte; el casquete de hielo ártico es cada vez más delgado y los turistas occidentales que iban recientemente de crucero en un rompehielos ruso se sorprendieron al encontrar mar abierto al llegar al polo norte. En el período comprendido entre 1980 y 1990 se notificó un centenar de episodios de «blanqueo del coral» —fenómeno por el que los arrecifes coralinos de cualquier parte del mundo se tornan blancos y mueren—, cuando durante el siglo precedente solamente hubo tres. El blanqueo es una reacción del coral que se desencadena rápidamente cuando se produce un incremento insólito de la temperatura del océano<sup>90</sup>.



*Figura 3-24 El aumento de la temperatura mundial*

La temperatura media del planeta ha subido alrededor de 0,6 °C a lo largo del último siglo. La línea discontinua refleja las medias anuales, mientras que la línea gruesa refleja las medias quinquenales corrientes. (Fuente: CDIAC.)

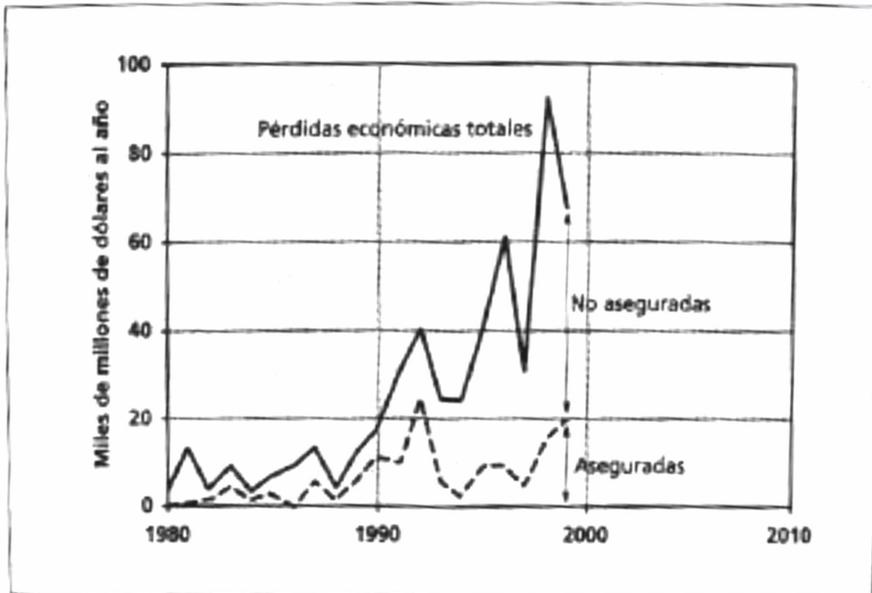
Incluso algunos economistas –gremio conocido por su escepticismo ante el «alarmismo ecológico»– se convencen cada vez más de que algo insólito está ocurriendo en la atmósfera y de que este fenómeno puede tener causas humanas. En 1997, un grupo de aproximadamente dos mil economistas, entre ellos seis galardonados con el premio Nobel, publicaron un manifiesto:

Todo indica a fin de cuentas que hay una influencia humana discernible en el clima mundial. Como economistas, creemos que el cambio climático planetario encierra riesgos ambientales, económicos, sociales y geopolíticos significativos y que está justificado tomar medidas preventivas<sup>91</sup>.

Uno de los motivos de la creciente preocupación de los economistas puede radicar en el hecho de que es posible observar una preocupante tendencia al alza de las pérdidas económicas cuantificables de las catástrofes relacionadas con el clima a partir de 1985 aproximadamente (figura 3-25).

Ninguna de las observaciones anteriores *demuestra* que el cambio climático en curso tenga causas humanas. Y aunque así fuera, los efectos del cambio climático planetario en la actividad humana futura o en la salud del ecosistema no pueden predecirse con certeza. Hay quien ha aprovechado esta incertidumbre para tratar de sembrar la confusión<sup>92</sup>, y por tanto es importante especificar claramente qué sabemos. En este empeño nos apoyamos en los varios cientos de científicos e investigadores que componen el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de Naciones Unidas, que publica sus puntos de vista cuidadosamente estudiados más o menos cada cinco años<sup>93</sup>:

- Es seguro que las actividades humanas, especialmente la quema de combustibles fósiles y la deforestación, contribuyen a la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera.
- Es seguro que la concentración de dióxido de carbono (el principal gas de efecto invernadero) en la atmósfera aumenta exponencialmente. La concentración de CO<sub>2</sub> ha sido objeto de seguimiento durante decenios. Su concentración histórica puede medirse en las burbujas de aire atrapadas en capas de hielo extraídas mediante la perforación de los casquetes polares.
- Los gases de efecto invernadero atrapan el calor que de lo contrario podría escapar de la Tierra al espacio. Ésta es una propiedad bien conocida de su estructura molecular y sus frecuencias de absorción espectroscópica.
- El calor atrapado incrementará la temperatura de la



*Figura 3-25 Pérdidas económicas mundiales causadas por catástrofes relacionadas con el clima*

Las últimas dos décadas del siglo XX han conocido crecientes pérdidas económicas provocadas por catástrofes relacionadas con el clima. (Fuente: Worldwatch Institute.)

Tierra por encima de lo que ésta aumentaría en ausencia de este factor.

- El calentamiento se distribuirá de forma desigual, siendo más acentuado en la proximidad de los polos que cerca del ecuador. Dado que el tiempo meteorológico y el clima de la Tierra se basan en gran medida en las diferencias de temperatura entre los polos y el ecuador, los vientos, las lluvias y las corrientes oceánicas experimentarán cambios de intensidad y dirección.
- En una Tierra más caliente, el océano se expandirá y el nivel del mar subirá. Si el calor es suficiente para fundir grandes cantidades del hielo polar, el nivel del mar ascenderá significativamente, pero en un horizonte de tiempo más prolongado.

Existen tres grandes incertidumbres. Una es que no se sabe cuál sería la temperatura mundial en ausencia de toda intervención humana. Si ocurre que el planeta se calienta debido a factores climatológicos profundos no relacionados con el incremento de los gases de efecto invernadero, entonces estos gases reforzarán dichos factores. Una segunda incertidumbre se refiere a qué implicará el calentamiento del planeta para las temperaturas, los vientos, las corrientes, las precipitaciones, los ecosistemas y la economía humana en cada lugar concreto de la Tierra.

La tercera gran incertidumbre está relacionada con los efectos de realimentación. Los flujos del carbono y de energía en el planeta Tierra son sumamente complejos. Puede haber mecanismos de autocorrección, procesos de realimentación negativos, que estabilicen los gases de efecto invernadero o la temperatura. Uno de ellos ya está operando: los océanos absorben cerca de la mitad del exceso de dióxido de carbono emitido por la

humanidad. Este efecto no es suficientemente fuerte para detener el aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, pero sí para desacelerarlo.

También puede haber ciclos desestabilizadores de realimentación positiva, que a medida que aumenta la temperatura calientan todavía más el ambiente. Por ejemplo, conforme el calor reduzca la capa de nieve y hielo, la Tierra reflejará una menor cantidad de calor solar al espacio, reforzando así el calentamiento. Los suelos de la tundra podrían liberar, al descongelarse, enormes cantidades de metano congelado, un gas de efecto invernadero que potenciaría aún más el calentamiento, la fusión de la nieve y el hielo y la liberación de todavía más metano.

Nadie sabe cómo influirán unas en otras las muchas respuestas posibles de realimentación negativa y positiva al aumento de los gases de efecto invernadero ni si dominarán las positivas o las negativas. Por fortuna, en la década de 1990 se produjo un enorme incremento de la exploración científica de estas cuestiones y las simulaciones por ordenador permiten realizar previsiones cada vez mejores de los probables efectos climáticos<sup>94</sup>. Las consiguientes «previsiones meteorológicas para 2050» son suficientemente inquietantes para llamar la atención del público.

La cuestión no es si el clima seguirá cambiando en el futuro en respuesta a las actividades humanas, sino *cuánto* (magnitud), *dónde* (pautas regionales) y *cuándo* (ritmo) cambiará. También está claro que el cambio climático afectará adversamente, en muchas partes del mundo, a sectores socioeconómicos, entre ellos los recursos hídricos, la agricultura, la silvicultura, la pesca y los asentamientos humanos, los sistemas ecológicos (en particular los arrecifes coralinos) y la salud humana (en particular las

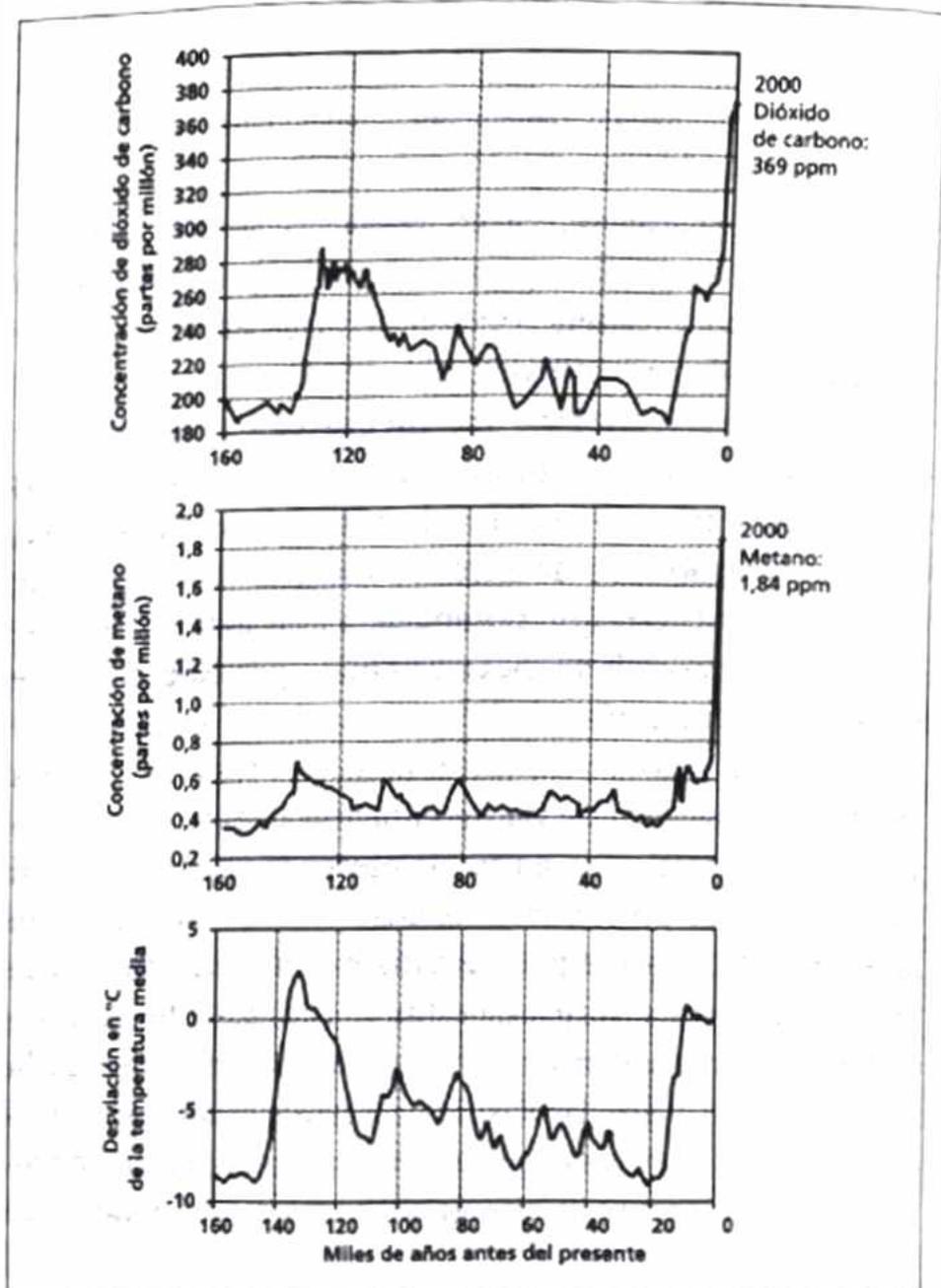


Figura 3-26 Gases de efecto invernadero y temperatura mundial durante los últimos 160.000 años

Las mediciones de núcleos de hielo muestran que ha habido importantes variaciones de temperatura en la Tierra (glaciaciones y períodos interglaciales) y que los niveles de dióxido de carbono y metano en la atmósfera han variado conjuntamente con la temperatura mundial. Las concentraciones actuales de estos gases de efecto invernadero han aumentado muy por encima del nivel alcanzado desde mucho antes de que apareciera la especie humana. (Fuente: CDIAC.)

enfermedades transmitidas por vectores). En efecto, el Tercer Informe de Evaluación del GICC concluye que la mayoría de las personas se verán afectadas adversamente por el cambio climático<sup>95</sup>.

Los científicos saben que en el pasado ha habido aumentos de la temperatura terrestre y que éstos no se han autocorregido rápidamente ni han sido suaves ni regulares. De hecho han sido caóticos. La figura 3-26 muestra la curva histórica de la temperatura terrestre durante 160.000 años y de las concentraciones atmosféricas de dos gases de efecto invernadero, el dióxido de carbono y el metano<sup>96</sup>. La temperatura y los gases de efecto invernadero han variado juntos, aunque no esté claro cuál de estos factores es el causante del otro. Lo más probable es que cada uno sea el causante del otro en un conjunto complejo de ciclos de realimentación.

Pero el mensaje más importante de la figura 3-26 es que las concentraciones atmosféricas *actuales* de dióxido de carbono y metano son *mucho más elevadas que nunca antes a lo largo de 160.000 años*. Sean cuales fueren las consecuencias, no hay duda de que las emisiones humanas de gases de efecto invernadero colman de repente los sumideros atmosféricos mucho más rápidamente que lo que el planeta puede evacuarlos. Existe un desequilibrio significativo en la atmósfera del planeta que además se agrava exponencialmente.

Los procesos generados por este desequilibrio pueden desarrollarse lentamente si los medimos con una escala de tiempo humana. Pueden pasar decenios hasta que se manifiesten sus consecuencias en forma de fusión de los hielos, ascenso de los niveles marinos, alteraciones de las corrientes oceánicas, cambios de pautas de precipitación, intensificación de las tormentas y migraciones de insectos, aves o mamíferos. Pero también

es plausible que el clima cambie súbitamente a través de ciclos de realimentación positiva que todavía no comprendemos. En el año 2002, una comisión de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos informó de lo siguiente:

Recientes pruebas científicas demuestran que se han producido importantes y extensos cambios climáticos a una velocidad alarmante. Por ejemplo, más o menos la mitad del calentamiento del Atlántico norte desde la última glaciación se ha producido en tan sólo un decenio, y además ha venido acompañado de significativos cambios climáticos en la mayor parte del globo. [...] Los cambios abruptos del pasado todavía no tienen una explicación cabal<sup>97</sup>.

Tanto si la arremetida es lenta como rápida, sabemos que tendrán que pasar siglos, o tal vez milenios, hasta que se subsanen las consecuencias negativas.

Los efectos ambientales negativos de la actividad humana que hemos examinado en este capítulo no eran necesarios. Todos ellos podrían haberse evitado. Cada vez más, la contaminación ya no se considera un signo de progreso, sino de ineficiencia y negligencia. A medida que las industrias se dan cuenta de ello, rápidamente encuentran maneras de reducir las emisiones y el consumo de recursos repensando los procesos de producción de punta a cabo, sustituyendo las soluciones «en el punto de salida» (reducción de las emisiones de los procesos de producción en curso) por una «producción más limpia» (diseño del producto y de los procesos de producción con vistas a minimizar las emisiones y el uso de recursos) y por la «ecología industrial» (uso de los efluentes de una fábrica como materia prima de otra). Un fabricante de circuitos impresos invierte en columnas de intercambio de iones para recuperar residuos de metales pesados y acaba obteniendo ingresos con la venta de los

metales reciclados, además de ahorrar dinero en la factura del agua y la prima del seguro de responsabilidad. Una empresa transformadora que reduce sus emisiones contaminantes del aire y del agua, su consumo de agua y el volumen de residuos sólidos que genera, ahorra cientos de millones al año en gastos de explotación. Una empresa química que decide reducir sus emisiones de CO<sub>2</sub> para no tener que pagar las tasas anticipadas de emisión ahorra al mismo tiempo ingentes costes de energía.

Gran parte de estas medidas, quizás un tanto sorprendentemente, han resultado ser rentables, incluso a corto plazo, más allá del efecto positivo en la imagen pública que acompaña a estos cambios. Sin duda, los beneficios económicos serán un buen argumento para seguir reduciendo la huella ecológica por unidad de consumo.

Si de entrada se duplicara la vida útil media de cada producto que fluye por los canales de la economía humana, si se reciclara el doble de los materiales, si no se movilizara más que la mitad del material necesario para fabricar cada producto, el caudal de materiales se reduciría por un factor de ocho<sup>98</sup>. Si el consumo de energía fuera más eficiente, si se emplearan fuentes de energía renovables, si los terrenos, la madera y el agua se utilizaran de forma menos derrochadora y se restauraran los bosques, se frenaría el aumento de los gases de efecto invernadero y de muchas otras materias contaminantes.

### Más allá de los límites

Una evaluación aproximada [...] muestra que el uso actual de los recursos y servicios naturales ya supera la capacidad de carga a largo plazo de la Tierra. [...] Si todos los habitantes del planeta gozaran de los mismos niveles ecológicos que los norteamericanos,

necesitaríamos tres planetas Tierra para satisfacer la demanda material agregada con la tecnología actual. Para acomodar de modo sostenible el aumento previsto de la población y de la producción económica en las próximas cuatro décadas, necesitaríamos de seis a doce planetas adicionales.

MATHIS WACKERNAGEL Y WILLIAM REES, 1996

Los datos que hemos aportado en este capítulo, junto a los muchos más que contienen las bases de datos de todo el mundo y las noticias cotidianas de los medios de comunicación, demuestran que la economía humana no utiliza las reservas y sumideros del planeta de modo sostenible. Los suelos, los bosques, las aguas superficiales y subterráneas, los humedales, la atmósfera y la diversidad de la naturaleza se degradan. Incluso en lugares en que las existencias de recursos renovables parecen estables, como los bosques de Norteamérica o los suelos de Europa, la calidad, diversidad o salud de las mismas están amenazadas. Los agentes contaminantes se acumulan y sus sumideros se desbordan. La composición química de toda la atmósfera del planeta está cambiando de un modo que ya está perturbando notablemente el clima.

### Vivir del capital, no de la renta

Si solamente estuvieran disminuyendo las reservas de un recurso, o de unos pocos, mientras que las de los demás permanecieran estables o incluso crecieran, cabría argumentar que el crecimiento tradicional podría mantenerse sustituyendo un recurso por otro (aunque las posibilidades de esta sustitución también son limitadas). Si sólo se llenaran unos pocos sumideros, la hu-

manidad podría sustituir uno (por ejemplo, el océano) por otro (por ejemplo, la atmósfera). Pero dado que son muchos los sumideros que se llenan y muchas las existencias que disminuyen, y que la huella ecológica humana ha sobrepasado el nivel sostenible, necesitamos un cambio más fundamental.

Debe quedar claro que los límites existentes no suponen una restricción del nivel de actividad económica humana reflejado en el producto mundial bruto. Los límites existentes constriñen la huella ecológica de la actividad humana. Y esos límites no son absolutos a corto plazo. Sobrepasar los límites no equivale a chocar contra un muro absoluto. La analogía más simple es el de la pesca ordinaria, donde la captura anual puede sobrepasar la tasa de recuperación anual durante un tiempo; de hecho, hasta que la población de peces haya quedado diezmada. De un modo similar, las emisiones de gases de efecto invernadero pueden proseguir durante un tiempo, incluso una vez superados los límites de la sostenibilidad, hasta que los ciclos de realimentación negativa del cambio climático obliguen a reducir las emisiones. Pero finalmente los caudales de producción tendrán que reducirse después de la extralimitación, bien por decisión humana, bien por imposición de los límites naturales.

Muchas personas reconocen a escala local que la huella ecológica ha crecido más allá de los límites locales. La ciudad de Yakarta emite más contaminación atmosférica que la que pueden soportar los pulmones. Los bosques de Filipinas casi han desaparecido. Los suelos de Haití se han desgastado en algunos lugares hasta la roca viva. Las pesquerías de bacalao de Terranova han cerrado. Los parisinos tienen que circular a velocidad reducida durante algunos días del verano a fin de paliar la contaminación que producen sus automóviles. En va-

rios países europeos murieron miles de personas prematuramente cuando el verano de 2003 alcanzó cotas de calor hasta entonces desconocidas. La carga química del Rin fue durante años tan grave que los lodos dragados en los puertos neerlandeses han de tratarse ahora como residuos peligrosos. Los esquiadores que visitaron Oslo en el invierno de 2001 apenas hallaron nieve para practicar su deporte.

En el caso de determinados problemas concretos, como el de los CFC que erosionan la capa de ozono, no sólo se ha reconocido la extralimitación, sino que se ha realizado un esfuerzo internacional por tomar medidas correctivas. Y el esfuerzo mundial por limitar las emisiones de gases de efecto invernadero avanza a trancas y barrancas, continuamente obstaculizado por gobiernos egoístas y miopes que representan a sus donantes igual de miopes y egoístas. Sin duda, el proceso de Kioto ilustra la dificultad para dar marcha atrás después de una extralimitación.

Pero apenas hay debate sobre el *problema general* de la extralimitación, la presión en pro de los cambios técnicos urgentemente necesarios para que los caudales de producción sean más eficientes es escasa y casi no existe voluntad de hacer frente a las fuerzas motrices del crecimiento de la población y del capital. Tal vez la falta de atención a la extralimitación podría excusarse en 1987. En aquel entonces, incluso grupos informados como la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, que examinaba de cerca las tendencias mundiales y las calificaba de «simplemente insostenibles», no consideró políticamente oportuno decir que *el mundo humano ha sobrepasado sus límites* y mucho menos plantear seriamente la cuestión de qué hacer. Es posible que no creyeran que la cosa iba en serio. Pero ahora, en los albores del nuevo milenio, es inexcusable negar la terrible

realidad de la extralimitación y esconder la cabeza ante sus consecuencias.

Las razones para eludir la cuestión de la extralimitación son comprensibles y políticas. Cualquier conversación sobre la reducción del crecimiento alimenta una amarga disputa sobre el reparto: de los recursos disponibles y de la responsabilidad por el actual estado de cosas. En términos generales, la huella ecológica de un rico es mucho mayor que la de un pobre. Un alemán, valga el ejemplo, tiene una huella diez veces superior a la de un mozambiqueño, mientras que un ruso extrae tantos recursos del planeta como un alemán, aunque no por ello goce de un nivel de vida decente. Si el mundo en su conjunto sobrepasa sus límites, ¿quién debería hacer algo al respecto: los ricos derrochadores, los pobres cada vez más numerosos o los ineficientes ex comunistas? En cuanto al planeta, la respuesta está en todo lo que antecede.

La pobreza perdurable de la mayoría de los habitantes del planeta y el consumo excesivo de una minoría son las dos principales causas de la degradación del medio ambiente. El rumbo actual es insostenible y posponer la acción deja de estar justificado<sup>99</sup>.

Los ecólogos resumen a veces las causas del deterioro ambiental en una fórmula que denominan IPAT:

$$\text{Impacto} = \text{Población} \times \text{Abundancia} \times \text{Tecnología}$$

El impacto (huella ecológica) de toda población o país en las fuentes y sumideros del planeta es igual al producto de su población (P) por su nivel de abundancia (A) por el daño causado por las tecnologías (T) empleadas para sostener esta abundancia. Para reducir la

huella ecológica de la humanidad, parecería razonable que cada sociedad introdujera mejoras en los aspectos en que tiene más posibilidades de hacerlo. El Sur tiene el mayor margen para mejorar el factor P, Occidente para mejorar el factor A y Europa Oriental para mejorar el factor T.

El margen de mejora total es asombroso. Si definimos cada término de la ecuación IPAT de modo más preciso, podemos ver cuántas maneras existen de reducir la huella ecológica y qué grandes son las reducciones posibles (cuadro 3-3)<sup>100</sup>.

La abundancia viene determinada por un alto nivel de consumo; por ejemplo, el número de horas dedicadas a ver la televisión, conducir un automóvil o descansar en una habitación. La huella ecológica de la abundancia es el impacto del *caudal* generado por el material, la energía y las emisiones asociadas a este consumo. Por ejemplo, si uno bebe tres tazas de café al día, la huella puede variar mucho en función de si utiliza tazas de porcelana tradicional o de plástico. El empleo de las tazas de porcelana requiere agua y jabón para lavarlas y un pequeño flujo de tazas para reponer las que se rompen cada año. Si una persona utiliza y desecha tazas de poliestireno, por otro lado, el flujo de mantenimiento incluye todas las tazas usadas durante un año, además del petróleo y los productos químicos necesarios para fabricar el poliestireno y transportar las tazas al lugar de utilización.

El impacto de la tecnología está reflejado en el cuadro 3-3 por la energía necesaria para fabricar y suministrar cada flujo de material multiplicada por el impacto ambiental por unidad de energía. Se requiere energía para extraer la arcilla para las tazas cerámicas, cocer la arcilla, suministrar las tazas a los hogares y calentar el agua para lavarlas. Se precisa energía para encontrar y

bombear el petróleo para las tazas de poliestireno, transportar el petróleo, hacer funcionar la refinería, formar el polímero, moldear las tazas, suministrarlas y transportar las tazas usadas al vertedero. Cada tipo de energía tiene su impacto ambiental. La huella ecológica puede modificarse técnicamente mediante dispositivos de control de la contaminación, la mejora de la eficiencia energética y el uso de una fuente de energía alternativa.

La variación de cualquier factor del cuadro 3-3 modificará la huella ecológica y acercará o alejará la economía humana de los límites del planeta. Reduciendo la población o la cantidad de material acumulado por cada persona se contribuirá a mantener al género humano dentro de estos límites. Lo mismo se conseguirá con una mayor ecoeficiencia, que implica un menor uso de energía o material –y menos emisiones– por unidad de consumo. El cuadro enumera algunos de los instrumentos que podrían ayudar a reducir cada factor de la ecuación y muestra asimismo algunas conjeturas sobre el grado en que podría reducirse cada factor que genera un impacto y el espacio de tiempo que precisaría para ello.

Visto de este modo, está claro que hay muchas, muchísimas posibilidades. El impacto humano en las fuentes y sumideros del planeta podría reducirse en un grado asombroso. Incluso suponiendo que se consiguieran logros mínimos en cada aspecto de posible cambio, en su conjunto podrían reducir el impacto humano en el planeta por un factor de *varios cientos o más*.

Si existen tantas opciones, ¿por qué no nos tomamos la molestia de escoger siquiera una de ellas? ¿Qué ocurriría si lo hiciéramos? ¿Qué sucedería si las tendencias de la población, la abundancia y la tecnología empezaran a invertirse? ¿Qué decir de las maneras en que están interconectadas? ¿Qué pasa si la huella ecológica se reduce gracias al cambio tecnológico pero en-

CUADRO 3-3  
EL IMPACTO AMBIENTAL DE LA POBLACIÓN, LA ABUNDANCIA Y LA TECNOLOGÍA

Población	Abundancia		Tecnología	
población	$\times$ $\frac{\text{reserva de capital}}{\text{persona}}$	$\times$ $\frac{\text{caudal de material}}{\text{reserva de capital}}$	$\times$ $\frac{\text{energía}}{\text{caudal de material}}$	$\times$ $\frac{\text{impacto ambiental}}{\text{energía}}$
Ejemplo	$\times$ $\frac{\text{tazas}}{\text{persona}}$	$\times$ $\frac{\text{agua + jabón}}{\text{tazas/año}}$	$\times$ $\frac{\text{gigajulios o kilovatios-hora}}{\text{kilogramos de agua + jabón}}$	$\times$ $\frac{\text{CO}_2, \text{NO}_2 \text{ uso de la tierra}}{\text{gigajulios o kilovatios-hora}}$

<i>Instrumentos aplicables</i>			
	Valores	Longevidad de la producción	Fuentes benignas
Planificación familiar	Precios	Elección de materiales	Eficiencia de uso final
Alfabetización femenina	Pago del coste total	Minimización de materiales	Eficiencia transformadora
Bienestar social	¿Qué queremos?	Reciclado, reutilización	Eficiencia distributiva
Papel de la mujer	¿Qué es suficiente?	Recuperación de residuos	Integración de sistemas
Propiedad de la tierra			Rediseño de procesos
<i>Alcance aproximado del cambio a largo plazo</i>			
~2x	?	~3-10 x	~5-10 x
			~10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup> x
<i>Escala temporal de los grandes cambios</i>			
~50-100 años	~0-50 años	~0-20 años	~0-30 años
			~0-50 años

tonces la población y el capital siguen creciendo? ¿Qué sucede si la huella ecológica no se reduce en absoluto?

Estas preguntas no se refieren a las reservas de recursos y los sumideros de contaminación contemplados por separado, como los hemos analizado en este capítulo, sino al conjunto de la huella ecológica, que interactúa con la población y el capital, que a su vez se influyen recíprocamente. Para abordar estas cuestiones tenemos que pasar del análisis estático de factor por factor a un análisis dinámico del conjunto del sistema.

