

## ESGOTAMENTO DOS COMBUSTIBLES FÓSILES E EMISIÓNS DE CO<sub>2</sub>: ALGÚNS POSIBLES ESCENARIOS FUTUROS DE EMISIÓNS

STÉPHANE SALAET FERNÁNDEZ / JORDI ROCA JUSMET  
Universidade de Barcelona

*Recibido:* 19 de novembro de 2009

*Aceptado:* 24 de marzo de 2010

---

**Resumo:** A dependencia con respecto ao uso de combustibles fósiles xerou dous tipos de preocupacións: por un lado, os impactos ambientais asociados e, en especial, os seus efectos no cambio climático; por outro, a limitación de reservas e o seu futuro esgotamento. As dúas preocupacións dominaron en diferentes momentos históricos.

En calquera caso, as emisións de CO<sub>2</sub> e o uso masivo duns recursos non renovables e moi limitados son dúas caras da mesma moeda e que hai que analizar conxuntamente.

Neste traballo fórmulanse posibles escenarios para o século XXI supoñendo que o petróleo e o gas natural se esgoten seguindo comportamentos tipo "pico do petróleo", aínda que contemplando diferentes variantes e hipóteses sobre o tamaño dos recursos finalmente recuperables. Para o carbón supóñense reservas suficientemente abundantes como para manter a oferta enerxética total procedente dos combustibles fósiles. O futuro das emisións de CO<sub>2</sub> dependerá sobre todo do resultado das forzas que, por un lado, inducirán a un uso crecente do carbón a medida que se esgotan o petróleo e o gas natural e, polo outro, as que fan presión para limitalo desde a política ambiental.

**Palabras clave:** Esgotamento de combustibles fósiles / Cambio climático / Pico do petróleo / Curva de Hubbert.

### FOSSIL FUEL DEPLETION AND CO<sub>2</sub> EMISSIONS: SOME POSSIBLE FUTURE SCENARIO EMISSIONS

**Abstract:** The dependency on fossil fuels has arisen two kinds of worries: firstly, its linked environmental impacts, especially the climate change effects; secondly, the depletion of the finite reserves. Each concern has prevailed in different historical moments.

In any case, CO<sub>2</sub> emissions and massive use of non renewable and limited resources are both sides of the same coin and should be analyzed together.

In the present work several possible XXIst scenarios are developed assuming oil and natural gas are depleted following peak oil theory although considering several hypothesis on recoverable resource size. It is also supposed carbon resources are plentiful enough to keep total energy supply from fossil fuels. CO<sub>2</sub> future emissions will rely upon the result arising from forces pushing to an increased coal use as oil and gas are depleted and those stemming from environmental politics and trying to limit its expansion

**Keywords:** Fossil fuel depletion / Climate change / Peak oil / Hubbert curve.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

A base da industrialización dos países ricos foi o uso masivo de combustibles fósiles e hoxe segue a ser un elemento principal dos procesos de cambio económico que caracterizan os países máis poboados do mundo. Desde hai moito tempo, en termos cuantitativos, os combustibles fósiles achegan o groso da enerxía exosomática utilizada polos humanos (e a propia obtención da enerxía endosomática —a dos alimentos— fíxose cada vez máis dependente do uso de combustibles fósiles). Nas

últimas décadas (cunha lixeira inflexión debida á crise actual) utilizouse máis petróleo, máis carbón e máis gas natural que nunca na historia.

Esta gran dependencia con respecto ao uso de combustibles fósiles xerou dous tipos de preocupacións moi diferentes que dominaron en diferentes momentos históricos. Nas últimas décadas –e especialmente desde o ano 1992– dominou a preocupación polos impactos ambientais da queima masiva de combustibles fósiles e, sobre todo, polos seus efectos no cambio climático. As actividades que xeran gases de efecto invernadoiro son diversas, pero hoxe o factor máis importante é sen dúbida a emisión de CO<sub>2</sub> asociada á obtención de enerxía. O futuro das emisións de gases de efecto invernadoiro irá directamente ligado á evolución no uso dos combustibles fósiles (coa única excepción da posible captura dunha parte das emisións xeradas en grandes instalacións, unha posibilidade técnica que non consideraremos neste artigo e que xera controversia sobre os seus custos e riscos).

En contraste, a preocupación pola limitación e o futuro esgotamento das reservas oscilou moito segundo as tendencias nos prezos. Nos anos setenta e nos primeiros anos oitenta si que dominou no debate público a preocupación pola limitación (e aínda máis a extrema concentración) das reservas de petróleo (que tanto daquela como agora –aínda que cunha perda de peso relativo– é a principal fonte enerxética): eran os anos dos *shocks* do petróleo que tanto afectaron ás economías ricas. Despois veu o que se chamou o *contrashock* do petróleo, cun afundimento dos prezos, e non foi ata entrada o século XXI que se xeraron novos debates públicos sobre o esgotamento do petróleo nunha conxuntura na que en poucos anos os prezos escalaron dos 50\$ por barril de cru aos 100\$ e case os 150\$ (para volver baixar a mediados do ano 2008 no contexto do estoupido aberto da crise financeira).

Polo tanto, as preocupacións sobre o cambio climático e o esgotamento dos combustibles fósiles tiveron historias moi diferentes e dominaron en diferentes momentos históricos. En calquera caso, as emisións de CO<sub>2</sub> e o uso masivo duns recursos non renovables e moi limitados son dúas caras da mesma moeda e parece necesario analízalos conxuntamente. Porén, son poucos os traballos que discuten explicitamente escenarios futuros de emisións –como faremos aquí para o século XXI– tendo en conta as perspectivas de esgotamento dos combustibles fósiles<sup>1</sup>.

## 2. O “PICO DO PETRÓLEO” E OS MODELOS DE ESGOTAMENTO DE RECURSOS NON RENOVABLES

Existen algúns autores que desde hai tempo advertiron que as reservas de combustibles fósiles son, en termos históricos, moi limitadas e que a dispoñibilidade masiva de enerxía facilmente accesible e moi concentrada que nunha etapa histórica (e para unha parte da humanidade) posibilitaron estas fontes de enerxía primaria non durará para sempre.

---

<sup>1</sup> Excepcións son os traballos de Kharecha e Hansen (2007), Brecha (2008) e Nel e Cooper (2008).

Xa no ano 1956 o xeólogo M. King Hubbert predixo (e acertou!) un declive na extracción de petróleo nos EE.UU. en torno ao ano 1970 e preveu que a extracción seguiría unha curva en forma de campá. Hubbert e os seus seguidores –representados agora pola asociación ASPO (*Association for the Study of Peak Oil*)– sinalaron que –coma o petróleo en EE.UU.– o crecente uso de petróleo e gas natural a nivel mundial virá seguido por unha tendencia oposta nun futuro non afastado (Campbell e Laherrère, 1998). Cando, como xa sinalamos, os prezos se dispararon cara aos 150\$ por barril de petróleo e non parecían ter un teito claro, a “curva de produción” (utilizando a linguaxe de Hubbert, aínda que preferimos falar de curva de extracción) converteuse nun punto de referencia claro no debate sobre o futuro do petróleo –e do gas natural–<sup>2</sup>.

En sucesivos traballos Hubbert e outros estudosos utilizaron unha curva loxística –usualmente chamada curva de Hubbert– para axustar os datos e facer proxecións sobre a futura extracción de petróleo. Esa curva de extracción caracterízase por ter un único máximo de extracción –o chamado *peak oil*, pico ou cénit do petróleo– e un comportamento simétrico na fase ascendente e na descendente. Porén, non hai que confundir o accesorio co esencial e, como Hubbert (1956, p. 9) formulaba, “*para calquera curva de produción dun recurso finito de cantidade fixada, dous puntos son coñecidos desde o principio, isto é, que en  $t=0$ , e de novo en  $t=\infty$ , a taxa de produción debe empezar en cero, e despois pasar a través de un ou de diversos máximos, e declinar de novo a cero*”. Polo tanto, Hubbert non predeterminaba ningunha forma funcional específica. En palabras de Brandt (2007, p. 3085), “*sería máis produtivo para os teóricos de Hubbert moverse dunha «estreita» metodoloxía de Hubbert... a unha máis «ampla» metodoloxía de Hubbert. Unha metodoloxía ampla de Hubbert presentaría evidencia de que o esgotamento do petróleo convencional é inevitable e está rapidamente converténdose en máis importante, sen enfocar as súas enerxías sobre unha forma funcional única para as curvas de produción*”.

Os elementos para determinar as posibles sendas de extracción dun recurso son dous: a *cantidade última de recursos recuperables* (URR) e a forma funcional específica. Dado o elevado grao de incerteza sobre o futuro, os escenarios baseados en diferentes supostos sobre estes dous factores deben verse non como previsións, senón simplemente como exercicios sobre posibles “estilos” de esgotamento compatibles con estimacións razoables dos recursos finalmente explotables (URR). A magnitude de URR non é coñecida, posto que depende das restricións xeolóxicas pero, por suposto, depende tamén da evolución dos factores tecnolóxicos e económicos, que farán que unha maior ou menor recuperación dos recursos sexa factible; ademais, os factores políticos e sociais tamén son importantes xa que, por exemplo, poden permitir que zonas con dotacións de recursos

<sup>2</sup> Tres diferentes exemplos de interesantes libros dedicados ao tema e aparecidos de forma case simultánea no noso país son os de Sempere e Tello (2008), Bermejo (2008) e Fernández Durán (2008).

especialmente sensibles desde o punto de vista ambiental sexan ou non explotables<sup>3</sup>.

En todo caso, calquera exercicio de escenarios futuros sobre uso de combustibles fósiles debe respectar a restrición de que a extracción acumulada debe ser menor que a cantidade estimada de URR. Parece pouco pero, como é sabido, moitos modelos económicos de crecemento non consideran explicitamente o papel dos recursos naturais e, en particular, da enerxía, o que supón ou ben esquecer o papel crucial dos ditos recursos ou ben supoñer que o acceso a estes recursos está asegurado no futuro sen ningunha limitación física. Porén, tamén sería moi equivocado caer no extremo oposto e pensar que a xeoloxía e unha función inevitable de esgotamento determinarían de forma directa o futuro da extracción: algúns debates sobre se xa se superou ou non o pico do petróleo parecen caer nese erro (especialmente cando ese pico se asocia mecanicamente á metade da extracción da cantidade de URR)<sup>4</sup>.

Ao elaborar escenarios é case inevitable acudir a modelos matemáticos simplificados aínda que, sen dúbida, a realidade sempre será moito máis complexa. Estes modelos deben ser compatibles coas realidades xeolóxicas, pero non son, desde logo, unicamente xeolóxicos: a xeoloxía é clave para determinar a taxa de esgotamento nun determinado campo de petróleo (dadas unhas instalacións de extracción), pero dificilmente pode explicar o ritmo de esgotamento dun recurso a nivel mundial, xa que este depende de forma decisiva do ritmo de investimento en capacidade de extracción do recurso. Polo tanto, poderíamos dicir que, aínda que as curvas como a de explotación loxística ou outras da “metodoloxía de Hubbert en sentido amplo” nos poden parecer formas estilizadas de describir plausibles ritmos de esgotamento dun recurso como o petróleo, sen dúbida o fan sobre a base dalgún tipo de “intuición” económica. De feito, algúns autores que traballaron con modelos deste tipo xa formularon algún criterio “económico” para seleccionar uns modelos ou outros. Así, Kaufmann e Shiers (2008, p. 406) descartan modelos baseados nunha súbita caída da extracción despois do pico do petróleo cos argumentos de

---

<sup>3</sup> O debate ecolóxico e de protección de determinadas poboacións podería levar a renunciar á explotación de certas áreas ricas en petróleo. Un interesante exemplo é a proposta defendida polo Goberno de Ecuador de deixar no subsolo o petróleo pesado da zona do Parque do Yasuní, área especialmente rica en biodiversidade e onde viven poboacións indíxenas. Estimouse que a explotación podería supoñer para o Estado un ingreso de preto de 5.000 ou 6.000 millóns de dólares, aínda que o valor sería moi dependente da evolución futura dos prezos do petróleo. A condición que pon o Goberno para renunciar á explotación é que unha parte importante do custo de oportunidade da conservación non sexa asumida polo país, senón pola comunidade internacional con doazóns a un fondo de conservación que permitiría xerar ingresos para levar a cabo políticas sociais e ambientais (Acosta, 2009). Desde o punto de vista do cambio climático, a mellor noticia sería, por suposto, que se renunciase a explotar voluntariamente a maior parte das reservas de petróleo e do resto dos combustibles fósiles (en especial do carbón).

<sup>4</sup> En realidade, xa houbo como mínimo dous picos do petróleo determinados por conflitos políticos e por cambios nas condicións do mercado: un pequeno pico no período 1973-1974 e un importante pico no ano 1979. A extracción mundial non volveu aos niveis do ano 1979 ata o ano 1986. Agora, no contexto da crise económica, deuse unha redución na demanda mundial de petróleo. O pico de demanda anterior á crise será o máximo histórico? Se cadra, pero non é probable.

que iso implicaría que “grandes investimentos nas infraestruturas de produción e transporte son usadas para un único ano”, de forma que os custos desas infraestruturas non serían xustificables economicamente, e de que unha “gran redución no output despois do pico tamén é inconsistente coas máis rudimentarias formas de comportamento predictor requirido para maximizar o valor neto actual dun recurso non renovable” (p. 406).

Malia as consideracións anteriores, o que para un economista pode resultar máis sorprendente dos modelos de esgotamento “tipo Hubbert” é que non incorporan explicitamente ningunha variable económica. O certo é que os ditos modelos son compatibles (o que lles dá flexibilidade, e entendemos que é máis ben unha vantaxe) con escenarios económicos moi diferentes: por exemplo, a necesaria caída da demanda asociada á fase descendente deses modelos podería resultar dunha planeada transición cara a outro modelo enerxético ou podería ser resultado dun gran aumento de prezos; esa caída podería ser compatible co crecemento económico ou podería asociarse a un decrecemento económico; ademais, tanto o crecemento como o decrecemento poderían ter impactos sociais moi diferentes dependendo de que países e grupos sociais se visen afectados por unha diminución de ingresos: un mesmo pode considerar que o “decrecemento económico” nos países ricos é desexable e que se podería dar sen unha diminución no benestar da maioría da poboación<sup>5</sup>.

Podemos preguntarnos se os modelos económicos dispoñibles tiveron ata o momento maior capacidade de predición sobre a evolución da extracción de recursos non renovables, e en particular dos combustibles fósiles.

A teoría económica dos recursos non renovables baseouse nun artigo de Hotelling publicado no ano 1931 no *Journal of Political Economy*. En palabras de Devarajan e Fisher (1987, p. 670), “só hai unhas poucas áreas en economía cuxos antecedentes poidan ser situados nun único, seminal artigo. Unha de tales áreas é a economía dos recursos naturais (...); a súa orixe é amplamente recoñecida no artigo do ano 1931 de Harold Hotelling”. Segundo a regra de Hotelling, os prezos (prezos netos de custos de extracción) dun recurso non renovable deberían crecer a un ritmo equivalente ao tipo de xuro e, ademais, os recursos deberían esgotarse exactamente no momento en que o prezo é tan elevado que a demanda se volve nula. Estas condicións serían as que determinarían a única traxectoria de prezos de “equilibrio” compatible coa maximización intertemporal dos beneficios totais (adequadamente “descontados”) por parte dos axentes económicos en condicións de competencia perfecta. A regra de Hotelling non nos di directamente nada sobre a evolución das cantidades extraídas e vendidas ao longo do tempo. Coas restritivas hipóteses de funcións de demanda e custos de extracción invariables, as cantidades extraídas diminuírían ao longo do tempo pero, con outros supostos tales como a demanda crecente e/ou unha fase inicial de diminución dos custos de extracción

---

<sup>5</sup> Sobre o debate sobre o decrecemento, véxase Roca (2007).

debido ao cambio tecnolóxico, a regra sería consistente cun pico na extracción que podería situarse, dependendo da evolución concreta da demanda e dos custos, en calquera nivel de extracción acumulada (Holland, 2008).

O modelo de Hotelling ten a súa importancia histórica e ten os seus méritos. Remarca que os prezos tenderían a exceder aos custos de extracción mesmo en situacións moi competitivas, e que calquera estratexia de maximización de beneficios ten que ter en conta como extraer o recurso ao longo do tempo e, polo tanto, depende das condicións futuras de prezos. Porén, os problemas ao aplicar o modelo para explicar os comportamentos efectivos dos prezos son enormes. Cando os axentes económicos toman as súas decisións, non poden basearse en cales son os prezos actuais e futuros, senón en cales son os prezos actuais e as expectativas sobre os prezos futuros; noutras palabras, o custo de oportunidade de non vender hoxe en termos de renuncia a ingresos futuros é descoñecido; mesmo no modelo máis simple, este feito elemental provocará que os prezos poidan caracterizarse moito máis pola inestabilidade que por traxectorias moi previsibles (Mishan, 1981; Roca, 1991). Non debería estrañarnos, xa que o modelo trata os recursos como activos financeiros e, que dicir da estabilidade dos prezos dos activos financeiros? Ademais, hai outro feito elemental. Os recursos non renovables non están inmediatamente dispoñibles para ser usados a vontade agora ou no futuro en calquera cantidade só coa restrición de que non superen as reservas totais; en realidade, a extracción está restrinxida polos investimentos previos en capacidade de extracción (Thompson, 2001; Cairns, 2001; Banks, 2004). Os investidores deciden canto investir na industria extractiva (e tamén en exploración) cando as condicións futuras do mercado son incertas, de forma que as decisións pasadas determinan a máxima cantidade de recurso que poderá ser extraído e vendido para o seu uso. Dado que os custos fundidos adoitan ser unha parte moi importante dos custos, nunha situación competitiva tenderíase a extraer todo o posible, a menos que os prezos sexan extremadamente baixos: isto pode xerar comportamentos cíclicos nos prezos que resulten de cambios importantes nos niveis de investimento.

Se ao anterior sumámoslle o feito de que os mercados de recursos non renovables están en moitos casos extremadamente afastados das condicións de competencia perfecta –por exemplo, a organización de países exportadores de petróleo (OPEP) tivo un papel moi relevante nalgúns períodos no mercado de petróleo (Slade, 1991)–, non resulta nada sorprendente que a “regra de Hotelling” sexa incapaz, nin sequera de forma estilizada, de explicar as tendencias históricas dos prezos dos combustibles fósiles (Krautkramer, 1998). A gran concentración xeográfica das reservas de petróleo e de gas natural fará que as decisións estratéxicas duns poucos actores clave sexan aínda máis relevantes no futuro (como tamén poden ser aínda máis relevantes os potenciais conflitos xeopolíticos en determinadas zonas).

Tamén existen algúns modelos que consideraron explicitamente as interaccións entre o sistema económico e a extracción de recursos non renovables. O máis famoso é o modelo World3, usado en *Os límites ao crecemento*, de Meadows *et al.* (1974) e, con pequenos cambios, en Meadows *et al.* (2004). A modelización do seu sector de recursos non renovables “está baseada en material de *Energy Resources, de M. King Hubbert*” (Meadows *et al.*, 1974, p. 381), aínda que o sistema dinámico de World3 para tratar dous recursos non renovables é moito máis complicado que o modelo loxístico, xa que considera relacións entre a economía e o uso de recursos non renovables: cando a produción industrial crece, crece o uso de recursos non renovables pero, á vez, unha fracción crecente da produción industrial tense que destinar a extraer estes recursos (e formar parte do “capital extractivo” non dispoñible como “capital industrial”) a causa da maior dificultade de obter recursos a medida que se van esgotando. Finalmente, a dinámica global de todo o sistema depende dun gran número de ecuacións, mesmo aínda que se fagan simplificacións enormes como, por exemplo, tratar –como o World3– todos os recursos non renovables como un único recurso conxunto sen distinguir entre diferentes combustibles fósiles, nin sequera entre combustibles fósiles e outros minerais. O modelo World3 tivo un papel fundamental –e moi positivo ao noso entender– en estimular o debate sobre os problemas ecolóxicos asociados ao crecemento da poboación e da produción industrial. Porén, o obxectivo de simular á vez o futuro de variables demográficas, económicas e ecolóxicas é moi ambicioso e sitúase sempre entre a disxuntiva de simplificar radicalmente as funcións que relacionan as variables ou multiplicar sen límites as variables consideradas; aínda que poden facerse exercicios de sensibilidade, os escenarios resultantes cando actúan moitas relacións entre distintas variables poden ser difíciles de interpretar no sentido de saber que papel desempeñan nos resultados as especificacións concretas de cada unha das funcións. Non é este, en todo caso, o lugar para avaliar este tipo de modelos.

### 3. POSIBLES ESCENARIOS DE EXTRACCIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES PARA O SÉCULO XXI: UN EJERCICIO DE SIMULACIÓN

A estratexia que aquí seguiremos non é a de desenvolver ningún modelo económico, senón que o propósito –moito máis modesto– é formular algúns escenarios futuros de extracción que sexan compatibles coas estimacións dominantes sobre as cantidades de URR dos diferentes combustibles fósiles. Aquí, ao noso entender, hai que facer unha diferenciación importante entre, por un lado, o petróleo e o gas natural e, por outro lado, o carbón<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> No caso do petróleo referímonos ao petróleo “convencional”. O petróleo “non convencional” non se considera nas nosas previsións. Ver posteriormente.

### 3.1. PETRÓLEO E GAS NATURAL

Para estes recursos é imposible que durante moitas décadas a explotación aumente ou mesmo que se mantéña nos niveis actuais. Polo tanto, é inevitable facer algunha hipótese sobre cando e como se producirá a redución na explotación durante o período analizado. A nosa hipótese será sempre tipo Hubbert en sentido amplo, xa que non consideraremos só o caso loxístico, senón tamén outras variantes ou estilos de esgotamento. Por outro lado, proporemos, tanto para o petróleo coma para o gas, dúas hipóteses diferentes con respecto ao tamaño de URR.

En concreto, fixemos os seguintes supostos con respecto ás reservas de petróleo convencional. Como suposto “baixo” tomamos 2.100 Giga (2.100 x 10<sup>9</sup> bp) barrís de petróleo (Gbp), medida que é algo superior á que viñeron considerando os autores máis destacados da asociación ASPO –Campbell e Laherrère (1998, p. 81) suxerían 1.800; Campbell (2002) suxería en torno aos 1900 Gbp–, que utilizan unha definición de petróleo convencional máis restritiva que a da Axencia Internacional da Enerxía (AIE), que aquí tomaremos como referencia<sup>7</sup>. O suposto “alto” situámo-lo nun valor de 3.300 Gbp, que é un valor que supera a estimación media do US Geological Survey (2000), para quen a estimación elevada –que parece moi improbable– sería de 3.900 e a estimación media sería de 3.000 Gbp (Cleveland *et al.*, 2003, p. 321). Outras estimacións elevadas –pero máis moderadas– son as de Mohr e Evans (2007), que as sitúan entre os 2.234 e os 2.734 Gbp. Polo que respecta ao gas natural, os recursos non foron tan analizados, aínda que parece haber bastante acordo en que son máis baixos que os do petróleo<sup>8</sup>. Nel e Cooper (2009) escollen un valor de 2,038 Gbpe. Brecha (p. 3498) suxire tres escenarios: 1.116 Gbpe, un 50% maior e o dobre do primeiro valor; o valor máis elevado que achamos é de 2.968 Gbpe (BGR, 2006). Malia as incertezas, fixamos os valores en 1.700 (“baixo”) e 3.000 Gbpe (“alto”).

A táboa 1 resume os supostos que adoptamos en diferentes escenarios. Tendo en conta a extracción acumulada, estes supostos representarían que no ano 2007 xa se

<sup>7</sup> A fronteira entre petróleo convencional e non convencional non é en absoluto nítida e parte das diferenzas nas estimacións dos recursos dependen de onde se estableza. Aquí seguimos á AIE e consideramos dentro do concepto “petróleo convencional” os gases naturais líquidos e tamén os depósitos mariños de elevadas profundidades. En cambio, as areas, os asfaltos bituminosos e os petróleos moi pesados (de menos de 20° API) clasifícanse como petróleo non convencional. Os combustibles líquidos derivados do carbón e do gas natural tampouco están incluídos no petróleo convencional. En realidade, desde o punto de vista enerxético, o relevante é a enerxía requirida para dispoñer de enerxía (“custo enerxético” da extracción, transporte e tratamento), mentres que desde o punto de vista económico o relevante é o custo monetario: ambos os dous custos están, obviamente, moi relacionados, e en ambos os dous casos non hai unha fronteira clara entre diversos tipos de petróleo, senón un continuo.

<sup>8</sup> As reservas e a extracción de gas natural normalmente non se expresan en barrís de petróleo equivalente (bpe), pero aquí é a unidade que utilizaremos para que sexa comparable cos datos do petróleo, igual que despois faremos co carbón. Para iso aplicamos os factores de conversión habituais.



terían extraído entre algo máis da metade (suposto baixo) e aproximadamente a terceira parte (suposto alto) dos recursos totais de petróleo convencional que se extraerán; para o gas natural os valores son moi inferiores: entre algo máis da terceira e a quinta parte do total.

**Táboa 1.-** Supostos de URR: cantidade última de recursos recuperables (en 10<sup>9</sup> barrís de petróleo equivalente) (Gbpe)

	BAIXO	ALTO
Petróleo convencional	2.100	3.300
Gas natural	1.700	3.000

Polo que respecta ao “estilo” ou variante de esgotamento, as posibilidades son moitas, mesmo sen moverse do enfoque de Hubbert tomado en sentido amplo<sup>9</sup>. Así, por exemplo, dado un suposto sobre a cantidade de URR, atrasar o ano –ou anos– de máxima extracción supón que a curva de decrecemento da extracción deberá ser máis pronunciada, co que a adaptación a unha menor oferta de combustibles fósiles pode ser máis difícil.

Aquí optamos por limitarnos a tres posibilidades: 1) un comportamento caracterizado por un pico ou cénit único (*peak*) e unhas curvas de extracción crecente e decrecente simétricas; 2) un comportamento “meseta” (*plateau*), segundo o que o máximo de extracción se mantén durante todo un período (en concreto suporemos vinte anos), e as curvas de extracción crecente e decrecente son simétricas; 3) un comportamento asimétrico, segundo o que se alcanza un pico único, pero no que as curvas de crecemento e decrecemento non son simétricas; en concreto suporemos que o ritmo de esgotamento é máis rápido que o ritmo de crecemento anterior ao pico.

A táboa 2 resume os casos considerados e as funcións matemáticas concretas adoptadas. No primeiro caso trátase unha función loxística; no segundo caso a meseta é precedida e seguida por dúas curvas gaussianas coa mesma desviación típica; no terceiro caso consideramos dúas curvas gaussianas con diferente desviación (unha desviación típica da curva decrecente con valor igual á metade da da curva crecente) e co suposto de continuidade (aínda que non o de derivabilidade) no máximo de extracción.

A combinación de supostos sobre URR e das anteriores funcións dá lugar aos escenarios da táboa 3.

<sup>9</sup> Ver, por exemplo, para diferentes especificacións, Deffeyes (2005); Caithamer (2008); Brecha (2008); Feng, Li e Pang (2008); Kaufmann e Shiers (2008); Wood *et al.* (2003); e Brandt (2007).

**Táboa 2.-** Supostos de funcións de esgotamento para o petróleo convencional e o gas natural

	FUNCIÓN	CARACTERÍSTICAS ADICIONAIS
Pico simétrico	$\dot{P} = rP \left( 1 - \frac{P}{P_\infty} \right)$	
Meseta simétrico	$\pi(t) = \begin{cases} \frac{e^{-\frac{(t-\tau_{peak\ up})^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}} & t \leq \tau_{peak\ up} \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} & \tau_{peak\ up} \leq t < \tau_{peak\ down} \\ \frac{e^{-\frac{(t-\tau_{peak\ down})^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma}} & t \geq \tau_{peak\ down} \end{cases}$ $\dot{P}(t) = \frac{P_\infty}{\left( \frac{\tau_{peak\ down} - \tau_{peak\ up}}{\sqrt{2\pi\sigma}} \right) + 1} \pi(t)$	Tamaño da meseta: $\tau_{peak\ up} - \tau_{peak\ down} = 20$
Pico asimétrico	$\pi(t) = \begin{cases} \frac{e^{-\frac{(t-\tau_{peak})^2}{2\sigma_1^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} & t \leq \tau_{peak} \\ \frac{e^{-\frac{(t-\tau_{peak})^2}{2\sigma_2^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma_2}} & t \geq \tau_{peak} \end{cases}$ $\dot{P}(t) = \frac{P_\infty}{\frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)} \pi(t)$	Relación entre ritmos de crecemento e esgotamento: $\sigma_2 = 0,5\sigma_1$

NOTA:  $P(t)$  simboliza a extracción acumulada ata o instante  $t$ , a súa derivada é a extracción anual,  $P_\infty$  simboliza URR,  $\tau_{peak}$  é o ano no que se alcanza o pico,  $\tau_{peak\ up}$  e  $\tau_{peak\ down}$  son os anos inicial e final da meseta.

**Táboa 3.-** Escenarios considerados para o petróleo convencional e o gas natural

FUNCIÓN DE EXTRACCIÓN	URR BAIXO	URR ALTO
Pico simétrico	Simétrico baixo	Simétrico alto
Meseta simétrico	(*)	Meseta alto
Pico asimétrico	Asimétrico baixo	Asimétrico alto
(*)Este escenario non se considerou porque é inviable, dado que no suposto baixo xa se consumiron a metade de URR.		

### 3.2. CARBÓN, SERÁ O SÉCULO XXI O SÉCULO DO CARBÓN?<sup>10</sup>

O caso do carbón é diferente ao dos outros combustibles fósiles. Aínda existe máis polémica que nos outros recursos sobre a cantidade de recursos potencialmente explotables; en palabras de Laherrère (2004, p. 6) “*as estimacións sobre os recursos de carbón son moi pouco frecuentes*”. Aínda que algúns estudos recentes cuestionaron a idea de que os recursos de carbón son extremadamente abundantes (EWG, 2007; Rutledge, 2008), en xeral considéranse moitísimo máis abundantes (e son xeograficamente moito menos concentrados) que os dos outros combustibles fósiles, e mesmo poderían ser dunha orde de magnitude superior. A extracción acumulada segundo BP (2007) sería de 1.189 Gbpe. O IPCC (2007, p. 264) fala dunhas reservas de 17.452 Gbpe, mentres que o BGR dá a case increíble cifra de 46.686 Gbpe para o carbón, cun poder calorífico superior aos 16.500 kJ/kg e 8.204 Gbpe para o lignito. De feito, entre os anos 2000 e 2007 o uso de carbón creceu máis que o de petróleo e mesmo que o de gas natural, polo que ten sentido preguntarse se seguirá esta tendencia que, sen dúbida, pode prolongarse cando menos por bastantes décadas, e cales serían as consecuencias en termos de emisións. A nosa hipótese é que as limitacións xeolóxicas non desempeñarán un papel decisivo nas tendencias no uso do carbón durante o século XXI: a clave serán os factores económicos e políticos, incluíndo, obviamente, a política ambiental e, en particular, as restricións que poida impoñer a política fronte ao cambio climático.

En concreto, nos nosos escenarios suporemos unha evolución extremadamente negativa en termos ambientais segundo a cal o esgotamento do petróleo e do gas natural vai acompañado dun uso crecente de carbón para compensar ese esgotamento. Asumimos que cando empeza a diminuír a oferta conxunta (en termos enerxéticos) de petróleo e de gas natural, a extracción de carbón aumenta de forma que se manteña exactamente a enerxía primaria total procedente dos tres combustibles fósiles. Isto implica, como veremos, que nos diversos escenarios a extracción de carbón aumenta de forma importantísima. Porén, advírtase que durante os últi-

<sup>10</sup> Algúns autores, como Mariano Marzo, especialista en recursos enerxéticos, advertiron en artigos e en conferencias que a tendencia máis probable é a un uso cada vez maior –e non menor– de carbón.

mos séculos a tendencia foi dunha dispoñibilidade crecente de enerxía primaria procedente dos combustibles fósiles a nivel mundial, e na nosa hipótese esa dispoñibilidade estabilizaríase nun futuro próximo. Ademais, se, como é esperable, as extraccións futuras danse de media en lugares de máis difícil extracción, e mesmo nalgúns casos danse procesos de transformación enerxeticamente custosos (como obtención de líquidos a partir de carbón ou de gas), podemos esperar un aumento na enerxía requirida para dispoñer de enerxía<sup>11</sup>, de forma que a enerxía neta dispoñible procedente dos combustibles fósiles diminuíría, rompendo así a tendencia histórica.

#### 4. RESULTADOS DAS SIMULACIÓNS

Para determinar os valores dos parámetros non definidos nas funcións o que facemos é minimizar en cada caso a suma dos cadrados das diferenzas entre os valores que toman as funcións para os diferentes valores e os datos históricos. Para iso utilizamos os datos de petróleo de Caithamer (2008) desde o ano 1857 ata o ano 2003, mentres que os anos seguintes se calculan restándolles aos datos subministrados por BP (2007) os valores de petróleo non convencional proporcionados en IEA (2006, p. 94). Para os datos de carbón e de gas natural utilizamos as series 1965-2007 procedentes de BP (2007).

Os resultados sobre os anos en que se producirá a máxima extracción de petróleo e de gas natural resúmense na táboa 4.

**Táboa 4.-** Máxima extracción dos diferentes recursos (Gbpe)

ESCENARIO	PETRÓLEO CONVENCIONAL	GAS NATURAL	PETRÓLEO + GAS NATURAL
Simétrico baixo	2005	2019	2010
Simétrico alto	2022	2041	2030
Meseta alto	2016-2036	2037-2057	2036
Asimétrico baixo	2011	2031	2013
Asimétrico alto	2031	2052	2034

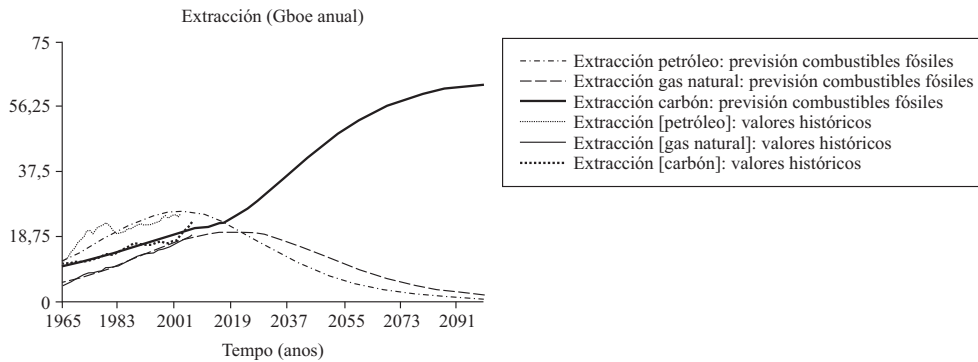
Polo tanto, segundo os diferentes supostos, o máximo de enerxía primaria procedente do petróleo e do gas natural situaríase no período 2010-2034<sup>12</sup>. É a partir deste máximo cando supoñemos que a extracción de carbón aumenta para compen-

<sup>11</sup> Ou, visto á inversa, unha diminución do que se chama *Energy Return On Investment* (EROI) ou enerxía obtida por unidade de enerxía invertida.

<sup>12</sup> Pode resultar estraño que no escenario simétrico baixo o pico do petróleo xa se producira hai uns anos. Porén, os datos de petróleo “convencional” que utilizamos si que mostran que o máximo de extracción se produciu no ano 2006; ademais, como se trata dun axuste dunha fórmula matemática, o máximo da curva teórica non ten por que coincidir exactamente co máximo observado. En calquera caso, o escenario corresponde a unha situación na que a curva de extracción é simétrica e no que supoñemos que se explotaron máis ou menos a metade das reservas, polo que o pico debe estar en torno ao momento actual.

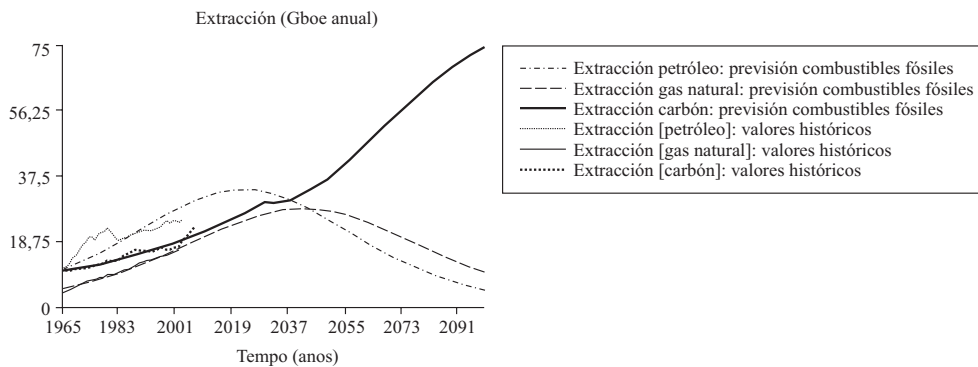
sar a caída, tal e como se reflicte nas gráficas 1 a 5<sup>13</sup>, que corresponden aos cinco escenarios considerados. Isto implicaría –supoñendo que non se desen antes signos claros de esgotamento– enormes aumentos do uso do carbón, que en conxunto levarían a unha extracción acumulada total que se situaría entre preto dos 4.700 Gbpe (no escenario meseta) e algo máis dos 6.000 Gbpe (no escenario asimétrico baixo): valores enormes –e nefastos desde o punto de vista ambiental–, pero que están moi lonxe dos recursos dispoñibles segundo moitas estimacións, aínda que, insistimos, hai fortes desacordos con respecto ao tema e para algúns autores serían cifras inviáveis.

**Gráfica 1.-** Extracción de combustibles fósiles no escenario simétrico baixo



NOTA: Gboe = 10<sup>9</sup> barrís de petróleo equivalente.

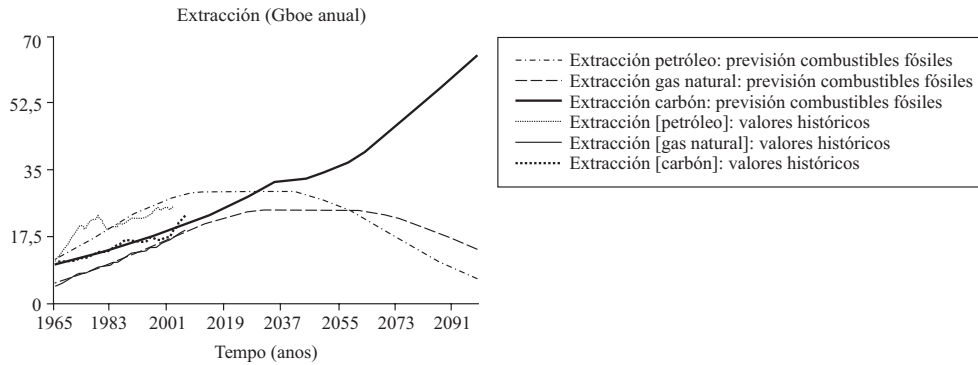
**Gráfica 2.-** Extracción de combustibles fósiles no escenario simétrico alto



NOTA: Gboe = 10<sup>9</sup> barrís de petróleo equivalente.

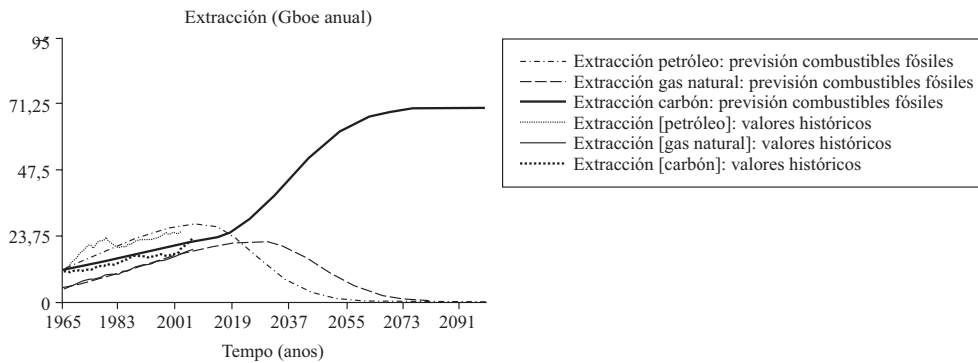
<sup>13</sup> Tamén é necesario facer algún suposto sobre a extracción de carbón antes dese momento. O que supoñemos é un axuste loxístico como se a cantidade de URR fose tan grande como a estimación de BGR (2006) comentada anteriormente.

**Gráfica 3.-** Extracción de combustibles fósiles no escenario meseta alto



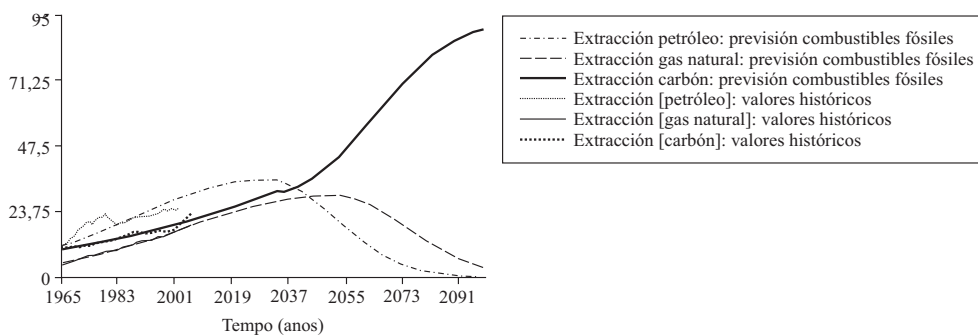
NOTA: Gboe = 10<sup>9</sup> barrís de petróleo equivalente.

**Gráfica 4.-** Extracción de combustibles fósiles no escenario asimétrico baixo



NOTA: Gboe = 10<sup>9</sup> barrís de petróleo equivalente.

**Gráfica 5.-** Extracción de combustibles fósiles no escenario asimétrico alto

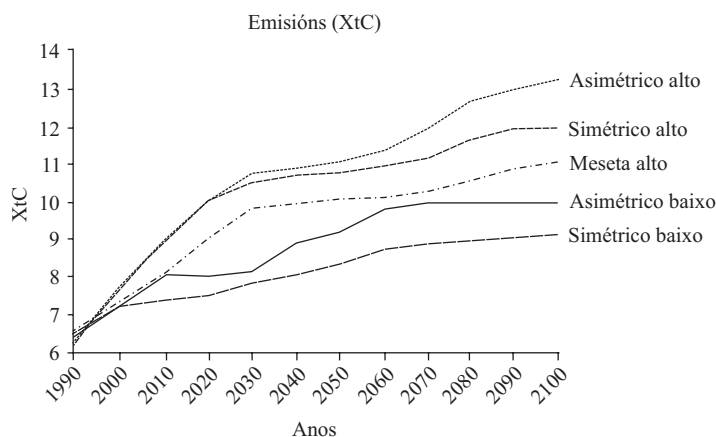


NOTA: Gboe = 10<sup>9</sup> barrís de petróleo equivalente.

## 5. IMPLICACIÓNS EN TERMOS DE EMISIÓNS DE CO<sub>2</sub>

Na gráfica 6 representamos as emisións de CO<sub>2</sub> que os anteriores escenarios de explotación de recursos fósiles suporían (sempre sen considerar a posible captura dunha parte do carbono). En todos eles obsérvase un moi elevado aumento das emisións. Nos escenarios nos que o máximo de extracción de petróleo e gas natural se produce antes, o total máximo de uso de combustibles fósiles é menor pero, por outro lado, antes se produce un crecente peso relativo do carbón cos seus efectos sobre o aumento das emisións medias por unidade de enerxía. As emisións para o ano 2100 con respecto ao ano 1990 aumentan case o 50% no mellor dos casos (escenario simétrico baixo) e alcanzan máis do dobre no peor dos casos (asimétrico alto).

**Gráfica 6.-** Emisións de CO<sub>2</sub> derivadas do uso de combustibles fósiles nos diferentes escenarios



NOTA: XtC significa xigatoneladas de carbono.

Unha observación é que as emisións, malia o seu elevado crecemento, son inferiores ás dos peores escenarios contemplados no último informe do IPCC (IPCC, 2007); por iso, estes peores escenarios parecen “pouco realistas”, tendo en conta as limitadas reservas de petróleo e gas natural, unha crítica que se fixo desde algúns círculos preocupados polo esgotamento dos combustibles fósiles. Son pouco realistas a menos que se estea supoñendo un uso do carbón aínda superior ao considerado nos nosos escenarios. En calquera caso, parece claro que nos escenarios sobre futuras emisións sería interesante facer máis explícitos os supostos sobre uso dos diferentes combustibles fósiles e contrastalos coas informacións sobre dispoñibilidade de recursos explotables.

De todas formas, o que hai que destacar é que o feito de que as emisións crezan menos que nos peores escenarios do IPCC non é en absoluto tranquilizador, xa que

todos os nosos escenarios levarían, con toda probabilidade –segundo os modelos habituais<sup>14</sup> que moitos consideran demasiado prudentes–, a concentracións de CO<sub>2</sub> claramente superiores ás 450 ppm e a aumentos na temperatura media superiores aos 2,5° e, no peor dos nosos escenarios, aos 3°. Os nosos escenarios representan unhas emisións moito máis grandes que os mellores escenarios do IPCC e, por suposto, moi superiores ao que recomendan a maioría dos científicos, é dicir, reduci-las drasticamente o antes posible.

Se, ademais, temos en conta a elevada incerteza, a posibilidade de comportamentos peores, e aplicamos o principio de precaución, a conclusión aínda é máis clara: o esgotamento do petróleo e do gas natural non só será un reto para o cambio de modelo enerxético, senón que pode ir acompañado de escenarios de emisión que poden ter efectos dramáticos.

## 6. LIMITACIÓNS E CONCLUSIÓNS

Para acabar, cómpre sinalar as limitacións dos nosos exercicios de simulación. Nos escenarios non se consideraron dous factores moi polémicos. O primeiro, a explotación –que xa se leva a cabo e que, sen dúbida, será crecente– de petróleo “non convencional”. As posibilidades de obter moitos recursos por esta vía son moi debatidas, aínda que parece claro que en calquera caso serían de magnitude moi inferior ás do resto de combustibles fósiles. Na modelización poderíamos ter optado por utilizar un concepto máis amplo de petróleo para incluír o petróleo “non convencional”, co resultado de que o pico ou meseta de petróleo se atrasase, ou poderíamos ter optado por supoñer que parte da compensación da decrecente oferta de petróleo e de gas natural viría non só do carbón, senón tamén do petróleo non convencional, o que “aliviaría” a necesidade de extraer carbón e, desde logo, facilitaría a substitución do petróleo, xa que este se utiliza sobre todo como combustible líquido. De todas as formas, hai que ter en conta o elevado custo enerxético –o baixo EROI– que caracteriza en xeral aos petróleos non convencionais. En calquera caso, a inclusión nos escenarios destes petróleos non cremos que dese un resultado significativamente máis optimista en termos de emisións. O segundo factor non considerado –tamén moi polémico, e ao que xa nos temos referido– é o da aplicación de técnicas de captura de CO<sub>2</sub>: certamente, sendo optimista respecto deste tema, as traxectorias futuras de emisión poderían ser moi inferiores, aínda que tamén hai que ter en conta o custo enerxético das actividades de captura (Page *et al.*, 2009).

Por outro lado, pódese pensar que os escenarios sobre explotación futura de carbón son bastante impensables, xa que aparecerán síntomas de esgotamento do recurso. En calquera caso, si que parece claro que isto non se producirá antes de varias décadas, polo que as posibles restricións xeolóxicas limitarían as emisións

---

<sup>14</sup> Utilizamos o modelo MAGICC, *software* desenvolvido por un dos principais autores dos modelos simples do IPCC (Wigley, 2008).



dando escenarios climáticos algo menos dramáticos pero, sen dúbida, isto sería demasiado pouco e se produciría demasiado tarde como para confiar moito neste factor.

Finalmente, insistimos de novo en que non pretendemos nin moito menos facer exercicios de previsión (a case cen anos vista!), senón explorar as relacións entre dispoñibilidade de combustibles fósiles e traxectorias futuras de emisións para destacar o papel clave que o carbón podería desempeñar no futuro e para ilustrar o que, ao noso entender, pode representar unha gran tensión futura a nivel mundial: a tensión entre a sede de combustibles fósiles como fonte enerxética concentrada e facilmente accesible e a necesidade –e conciencia crecente– de que hai que frear as emisións de gases de efecto invernadoiro, o que significa principalmente frear de forma rápida o uso de combustibles fósiles<sup>15</sup>. Os nosos escenarios poden verse coma unha ilustración das traxectorias de enerxía-emisións que poderían darse se a tensión anterior se resolvese basicamente a favor de manter a oferta de combustibles fósiles o máximo tempo posible, respecto do cal pódese discutir se é ou non probable pero, na nosa opinión é, sen dúbida, indesexable.

## BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA, A. (2009): “El proyecto ITT en Ecuador: dejar el crudo en tierra o el camino hacia otro modelo de desarrollo” (entrevista), *CIP-Ecosocial- Boletín ECOS*, núm. 8 (agosto-octubre).
- BANKS, F.E. (2004): “Beautiful and Not So Beautiful Minds: An Introductory Essay on Economic Theory and the Supply of Oil”, *OPEC Review*, vol. 28, núm. 1 (March), pp. 27-62.
- BENTLEY, B.; BOYLE, G. (2008): “Global Oil Production: Forecasts and Methodologies”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 35, pp. 609-626.
- BERMEJO, R. (2008): *Un futuro sin petróleo. Colapsos y transformaciones socioeconómicas*. CIP-Ecosocial / La Catarata.
- BRANDT, A.R. (2007) “Testing Hubbert”, *Energy Policy*, vol. 35, pp. 3074-3088.
- BRECHA, R.J. (2008) “Emission Scenarios in the Face of Fossil-Fuel Peaking”, *Energy Policy*, vol. 36, pp. 3492-3504.
- BRITISH PETROLEUM (BP) (2007): *Statistical Review of World Energy 2007*.
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR) (2006): *Reserves, Resources and Availability of Energy Resources 2006*.
- CAIRNS, R.D. (2001): “Capacity Choice and the Theory of the Mine”, *Environmental and Resource Economics*, vol. 18, núm. 1 (January), pp. 129-148.
- CAITHAMER, P. (2008): “Regression and Time Series Analysis of the World Oil Peak of Production: Another Look”, *Mathematical Geosciences*, vol. 40, pp. 653-670.
- CAMPBELL, C.J.; LAHERRÈRE, J.H. (1998): “The End of Cheap Oil”, *Scientific American*, (March).

<sup>15</sup> E, se cadra, complementariamente avanzar na captura de carbono, aínda que en ningún caso pensamos que esta posibilidade tecnolóxica poida substituír a redución no uso de combustibles fósiles.

- CAMPBELL, C.J. (2002): *Forecasting Global Oil Supply 2000-2050*. (Hubbert Center Newsletter, 2002/3).
- CLEVELAND, C.; HALL, C.; HALLOCK, H.; JEFFERSON, M.; THARAKAN, P. (2003): "Hydrocarbons and the Evolution of Human Culture", *Nature*, vol. 426, pp. 318-322.
- DEFEYES, K.S. (2005): *Beyond Oil*. New York: Hill & Wang.
- DEVARAJAN, S., FISHER, A.C. (1981): "Hotelling's Economics of Exhaustible Resources: Fifty Years Later", *Journal of Economic Literature*, vol. XIX (March).
- ENERGY WATCH GROUP (EWG) (2007): *Coal: Resources and Future Production*. (EWG-Series, 1/2007).
- FENG, L.; LI, J.; PANG, X. (2008): "China's Oil Reserve Forecast and Analysis Based on Peak Oil Models", *Energy Policy*, vol. 36, pp. 4149-4153.
- FERNÁNDEZ DURÁN, R. (2008): *El crepúsculo de la era trágica del petróleo: pico del oro negro y colapso financiero (y ecológico) mundial*. Virus / Ecologistas en Acción.
- HOLLAND, S. (2008): "Modeling Peak Oil", *Energy Journal*, vol. 29, núm. 2, pp. 61-79.
- HOTELLING, H. (1931): "The Economics of Exhaustible Resources", *Journal of Political Economy*, vol. 22, núm. 9, pp. 137-175.
- HUBBERT, M.K. (1956): *Nuclear Energy and the Fossil Fuels*. (Shell Development Company, Exploration and Production Research Division, Publication, 95). Houston, TX.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2006): *World Energy Outlook 2006*.
- IPCC (2007): *Energy Supply*. (IPCC, Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the AR4 of the IPCC).
- KAUFMANN, R.K.; SHIERS, L.D. (2008): "Alternatives to Conventional Crude Oil: When, How Quickly, and Market Driven?", *Ecological Economics*, 67, pp. 405-411.
- KHARECHA, P.A.; HANSEN, J.E. (2007): *Implications of Peak Oil for Atmospheric CO<sub>2</sub> and Climate*. (www.theoil drum.com).
- KRAUTKRAEMER, J.A. (1998): "Nonrenewable Resource Scarcity", *Journal of Economic Literature*, XXXVI (December).
- LAHERRÈRE, J.H. (2004): "Perspectives Energetiques et Scientifiques. Presentation au Club des Jeunes Dirigeants de Quimper", *Brouillon*, (Avril).
- MEADOWS, D.L.; BEHRENS III, W.W.; MEADOWS, D.H.; NAILL, R.F.; RANDERS, J.; ZAHN, E.K.O. (1974): *Dynamics of Growth in a Finite World*. Cambridge, MA: Wright-Allen Press.
- MEADOWS, D.L.; RANDERS, J.; MEADOWS, D.H. (2004): *Limits to Growth. The 30-Year Update*. Chelsea Green.
- MISHAN, E.J. (1981): *Introduction to Normative Economics*. New York: Oxford University Press.
- MOHR, S.; EVANS, G. (2007): "Mathematical Model Forecasts Year Conventional Oil Will Peak", *Oil & Gas Journal*, vol. 105, núm. 17.
- NEL, W.P.; COOPER, C.J. (2009): "Implications of Fossil Fuel Constraints on Economic Growth and Global Warming", *Energy Policy*, vol. 37, pp. 166-180.
- PAGE, S.C.; WILLIAMSON, A.G.; MASON, I.G. (2009): "Carbon Capture and Storage: Fundamental Thermodynamics and Current Technology", *Energy Policy*, vol. 37, pp. 3314-3324.
- ROCA JUSMET, J. (1991): "La teoría económica sobre el precio de los recursos no renovables: un comentario crítico", *Cuadernos de Economía*, vol. 19, núm. 54 (enero-marzo), pp. 111-123.

- ROCA JUSMET, J. (2007): “La crítica al crecimiento económico desde la economía ecológica y las propuestas de decrecimiento”, *Ecología Política*, núm. 33.
- RUTLEDGE, D. (2008): *The Coal Question and Climate Change*. (www.theoil drum.com).
- SEMPERE, J.; TELLO, E. [cord.] (2008): *El final de la era del petróleo barato*. Icaria.
- SLADE, M.E. (1991): “Market Structure, Marketing Method, and Price Instability”, *Quarterly Journal of Economics*, vol. 106, pp. 1309-1340.
- THOMPSON, A.C. (2001): “The Hotelling Principle, Backwardation of Futures Prices and the Values of Developed Petroleum Reserves - The Production Constraint Hypothesis”, *Resource and Energy Economics*, vol. 23, núm. 2, pp. 133-156.
- WIGLEY, T. (2008): *MAGICC/SCENGEN 5.3*.
- WOOD, J.H.; LONG, G.R.; MOREHOUSE, D.F. (2003): “World Conventional Oil Supply Expected to Peak in 21st Century”, *Offshore*, vol. 90.