

# ¿Desarrollo sustentable?

**Mariano Vázquez Espí**

La Serena (Chile), 31 de octubre de 2006.

Madrid (España), 29 de noviembre de 2006.

**Madrid, 28 de noviembre de 2007.**

# Superstición y ciencia

## Mitos autoritarios

«hay lobos amarillos»

- «lo que es»
- inverificable  
habría que examinar a **todos** los lobos habidos y por haber
- la verdad se decide por las autoridades con poder para ello
- afirmaciones hacia el futuro
- **superstición**

## Mitos democráticos

«no hay lobos negros»

- «lo que no puede ser»
- refutable  
bastaría con encontrar **un** lobo negro
- cualquiera (si tiene ganas) puede participar en buscar una refutación
- afirmaciones sobre el pasado
- **ciencia**

## «Desarrollo sustentable»

---

La definición 'oficial':

- «Satisfacer las necesidades del presente sin poner en peligro la satisfacción de las necesidades futuras»

Una definición que genera muchas preguntas:

- ¿por qué de repente nos preocupa el futuro? (Por qué no ¿«satisfacer nuestras necesidades sin poner en peligro las de otros»?)
- ¿qué tiene que ver el '**desarrollo**' con la satisfacción de necesidades?
- de hecho ¿qué es el '**desarrollo**'?
  - ¿desarrollo de qué o de quién?

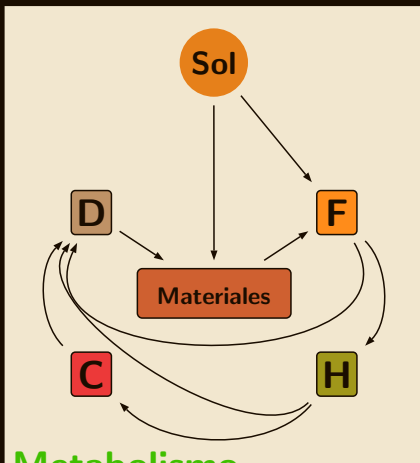
Por su parte, el adjetivo '**sustentable**' apunta la idea de estabilidad (mejor expresada por el *durable* en francés —*développement durable*), algo opuesto al desarrollo (sinónimo de crecimiento).

# La crisis ecológica



Fuentes: Diamond (2005), elaboración propia.

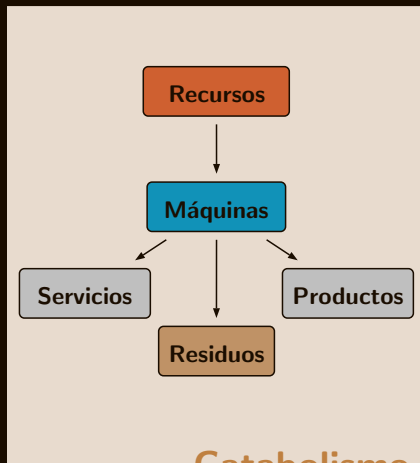
# La revolución industrial



## Metabolismo

### Ecosistema en clímax

La fotosíntesis **F** es la acción anabólica que empuja el ciclo completo de procesos catabólicos.



## Catabolismo

### Revolución Industrial

Los recursos se degradan y transforman en residuos.

## La revolución industrial

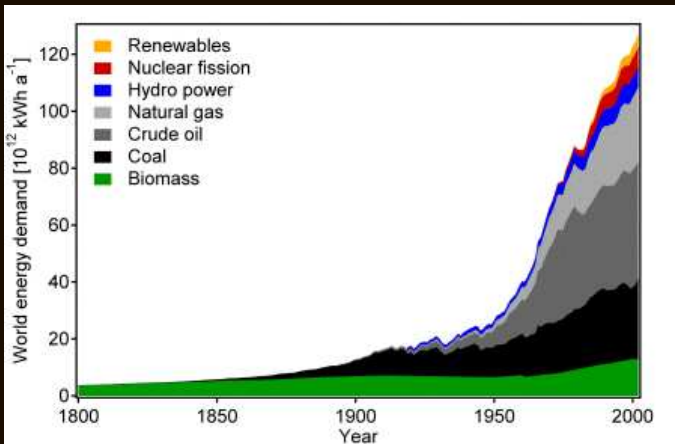
---

La máquina de vapor *a carbón* comenzó a utilizarse **para aumentar** la extracción *de carbón*, que ya se usaba profusamente como combustible base en Gran Bretaña.

Al mismo tiempo que Watt, en 1767, Horace de Saussure realiza las primeras pruebas de una '*caja solar*', antecedente temprano de los actuales paneles térmicos.

	s. XVI	escasez aguda de madera en Gran Bretaña
	s. XVII	sustitución de madera por carbón
Thomas Savery	1698	primera bomba de vapor
James Watt	1765	primera máquina de vapor
	1862	petróleo de Pensilvania a 95\$US <sub>2004</sub>
Nikolaus Otto	1876	primer motor de cuatro tiempos
	1885	petróleo a 20\$US <sub>2004</sub>
Rudolf Diesel	1896	primer motor diesel

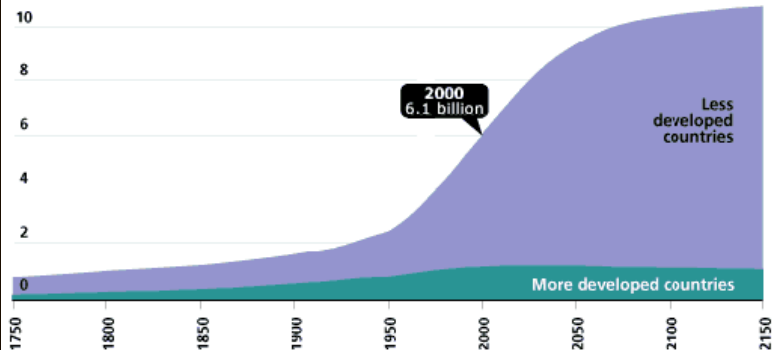
# La revolución industrial



# La revolución industrial

## World Population Growth, 1750–2150

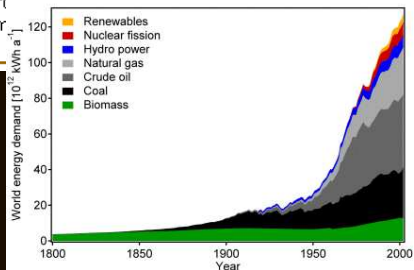
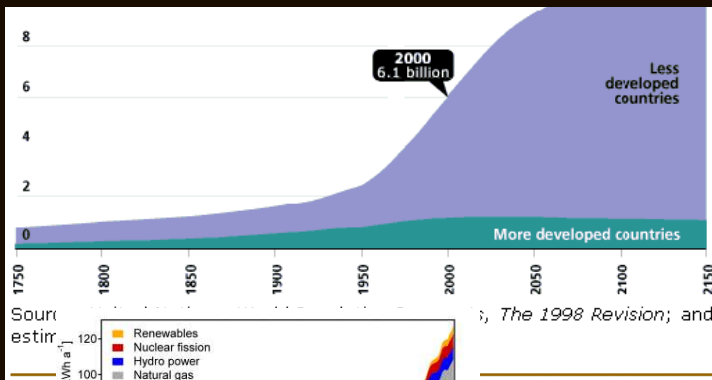
Population (in billions)



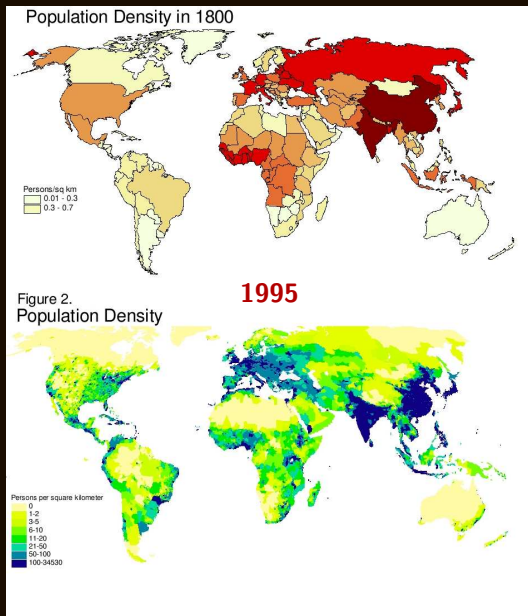
Source: United Nations, *World Population Prospects, The 1998 Revision*; and estimates by the Population Reference Bureau.



# La revolución industrial



# La revolución industrial



## La revolución industrial

---

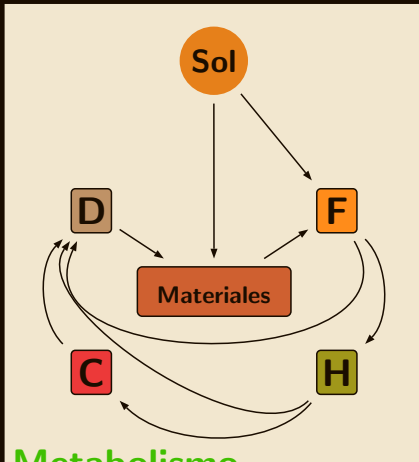
### Advertencias sobre el cambio climático y el uso indiscriminado de combustibles

Joseph Fourier	1827	matemático, físico, 1768–1830
Joseph Tyndall	1861	físico, 1820–1893
Rudolf Clausius	1885	físico, 1822–1888
Svante Arrhenius	1896	físico, químico, 1859–1927, PNobel 1903
Frederick Soddy	1922	físico, químico, PNobel 1921
...	...	

A modo de ejemplo, ninguna de sus advertencias figuran en la *Enciclopedia El País*. Hasta 1979 no se celebra la primera Conferencia Mundial sobre el clima. Y hay que esperar hasta 1985, en la Conferencia de Villach, para que el cambio climático entre por fin en la agenda política y se constituya el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC).

En el tercer informe del IPCC de **2001** se reconoce oficialmente, **por fin**, la influencia humana sobre el clima.

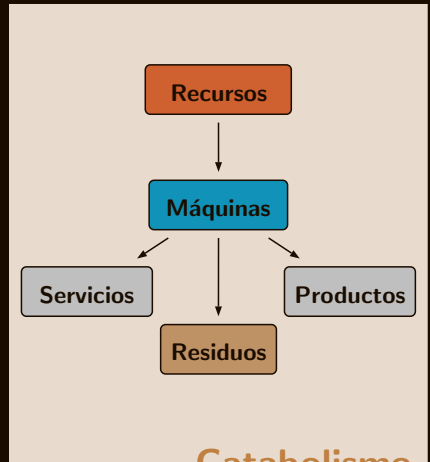
# La visión ecológica



## Metabolismo

### Ecosistema en clímax

La fotosíntesis **F** es la acción anabólica que empuja el ciclo completo de procesos catabólicos.



## Catabolismo

### Revolución Industrial

Los recursos se degradan y transforman en residuos.

### Energía útil consumida en el ciclo hidrológico (en terajulios anuales)

---

Evaporación del agua del mar	≈	1.000.000.000.000 TJ
<i>Pro memoria</i>		
Valoración energética del agua dulce empleada por los ecosistemas artificiales	>	13.000.000.000 TJ
Fotosíntesis	≈	3.600.000.000 TJ
<b>Producción artificial de energía primaria</b>		
2005–2006	≈	447.000.000 TJ
1999	≈	400.000.000 TJ
1960	≈	134.000.000 TJ
Acumulación energética en la fotosíntesis	<	25.000.000 TJ

---

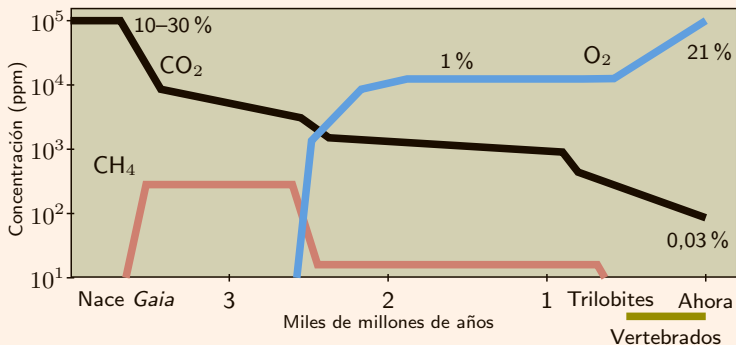
Fuente: Elaboración propia

# La visión ecológica

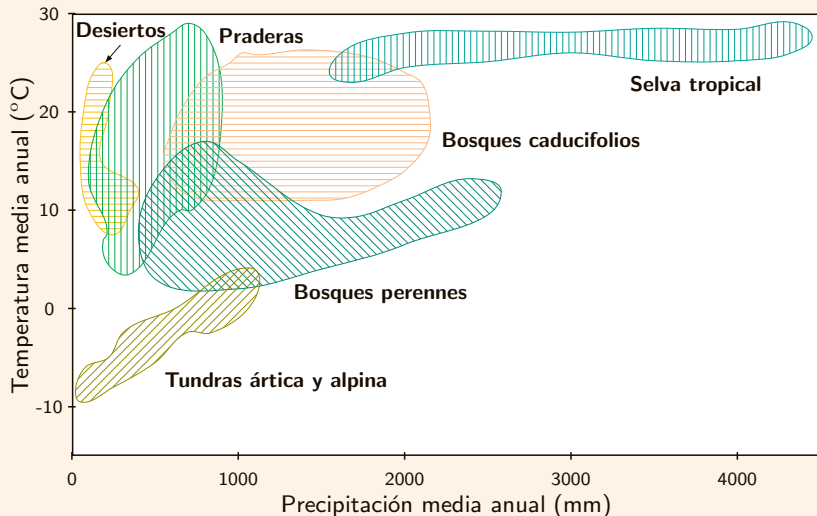
## La vida como agente geológico

Gas	Venus	Tierra (muerta)	Marte	Tierra (viva)
CO <sub>2</sub>	98 %	98 %	95 %	0,03 %
N <sub>2</sub>	1,9 %	1,9 %	2,7 %	79 %
O <sub>2</sub>	trazas	trazas	0,13 %	21 %
Temperatura (°C)	477	≈290	-53	13

Fuente: Lovelock (1983)



## ¿Competencia o cooperación?



Fuente: *National Science Foundation*, Odum (1983)

# La visión ecológica

---

## Capacidad de carga / Huella ecológica

- Una obviedad: ¡La Tierra no crece!
- Requisito *medio* de suelo útil *per capita* en los países desarrollados: 4,5 hectáreas (cubre las necesidades de alimentos, vestidos, alojamiento, transporte y digestión de residuos).
- La superficie de las tierras emergidas es de unos 15.000 millones de hectáreas, de las que tan sólo 10.000 millones pueden considerarse útiles. Permitirían vivir como 'desarrolladas' a unos 2.200 millones de personas.
- La población actual, si se repartiera equitativamente el suelo disponible, tocaría a unas 1,61 hectáreas por cabeza: y podría vivir con un 'nivel de vida' medio similar a la población de Nigeria.
- La población futura, si se estabilizara en torno a los 9.000 millones, tocaría *equitativamente* a 1,11 hectáreas por cabeza: corresponde a un 'nivel de vida' medio algo superior al de la India.
- Pero el reparto actual dista de ser equitativo. . .

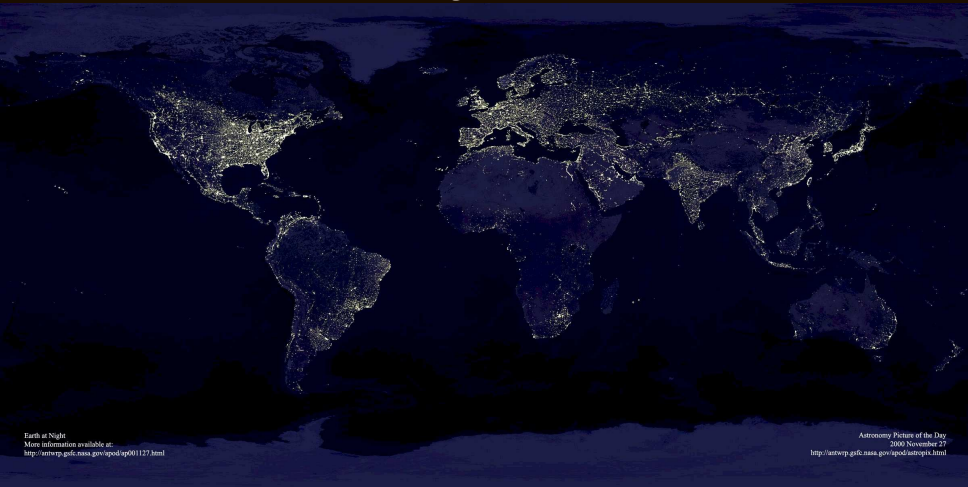
Datos de 1998.



# La jerarquía urbana global

---

Las ciudades globales brillan. . .



Earth at Night  
More information available at:  
<http://ntrwp.gsfc.nasa.gov/apod/ap001127.html>

Astronomy Picture of the Day  
2000 November 27  
<http://astrowp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html>

# La jerarquía urbana global

## Áreas de disfrute y consumo

### GRANDES CONGLOMERADOS URBANOS SEGÚN PBU



Fuente: Atlas de Le Monde Diplomatique. Datos referidos a 2000



- Si hacia 1820 la proporción entre las rentas medias de Europa y África era de 3, para 1992 ese cociente era de 13.  
(La disparidad entre las rentas máximas de Europa y las mínimas de África es, hoy por hoy, incalculable. . . )
- La creciente disparidad del poder de compra se observa tanto entre países como entre grupos de población dentro de cada país, o en cada ciudad. (La pobreza tiene estructura fractal.)
- La humanidad se va distribuyendo, de esta forma, entre áreas de disfrute y apropiación de recursos y áreas de extracción y vertido de residuos.

# Equidad

---

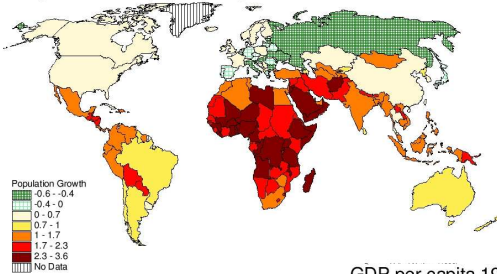
<i>Rank</i>	<b>Renta per cápita</b>	<b>Huella ecológica</b>
1	USA	Etiopía
2	Singapur	Egipto
3	Noruega	Chile
4	Canada	México
5	Francia	Costa Rica
6	Holanda	Argentina
7	Chile	Francia
8	Argentina	Noruega
9	México	Holanda
10	Costa Rica	Singapur
11	Egipto	Canada
12	Etiopía	USA

Fuente: IDH/NU (1998)

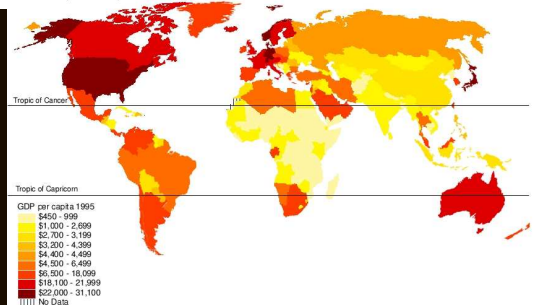
# Equidad

## Depredadores y presas

Projected annual population growth 1995 - 2030



GDP per capita 1995



## Las reglas del «juego»

---

Tras constatar “**el contraste entre el enorme progreso en el dominio del hombre sobre la naturaleza y su escasa contribución a la perfección de la vida humana**”, Frederick Soddy (en 1922) se preguntó cual era la **la regla del juego económico**.

El planeta dispone de un **ingreso solar** (como una renta anual) y también de un **capital solar** acumulado en forma de *stocks* de materiales (combustibles) y organización ecológica.

## Las reglas del «juego»

---

Para Soddy, existen por tanto dos alternativas extremas:

- **Vivir del ingreso solar (renta)**, y si es posible acrecentarlo (e incluso ahorrar incrementando el capital solar). (Norias, molinos, agricultura, . . . )
- **Vivir del capital solar (ahorro)**, destruyéndolo. (Para ello, empleamos capital para construir máquinas, que seguirán destruyéndolo desde que se ponen a funcionar. . . )



## Las reglas del «juego»

---

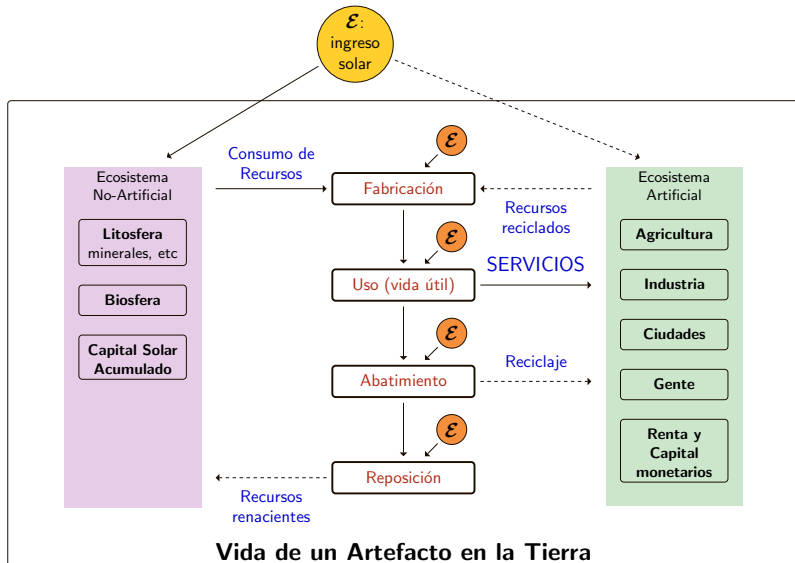
Para Soddy, el **desarrollo económico** de la Revolución Industrial estuvo basado en la destrucción del capital solar que, considerando todas sus formas y efectos secundarios, trae como resultado inevitable el **deterioro ecológico**.

En su análisis, mostraba que tal consumo de capital solar propició también el crecimiento demográfico.

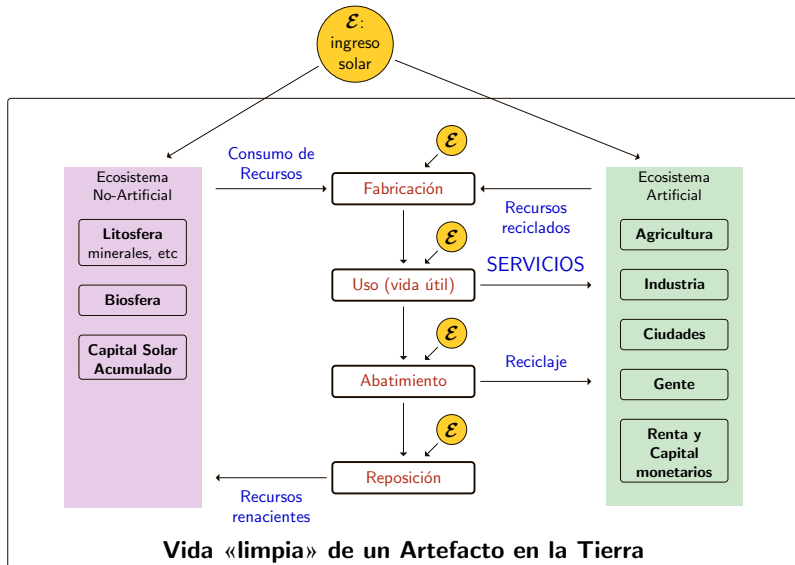
Las reglas del juego monetario identificaron la pérdida del capital solar con la producción de riqueza monetaria: **dime cuanto consumes (o destruyes) y te diré cuanto ganas**.

O, con más precisión, la riqueza monetaria se identificó con **la capacidad de apropiarse capital solar** para su posterior consumo.

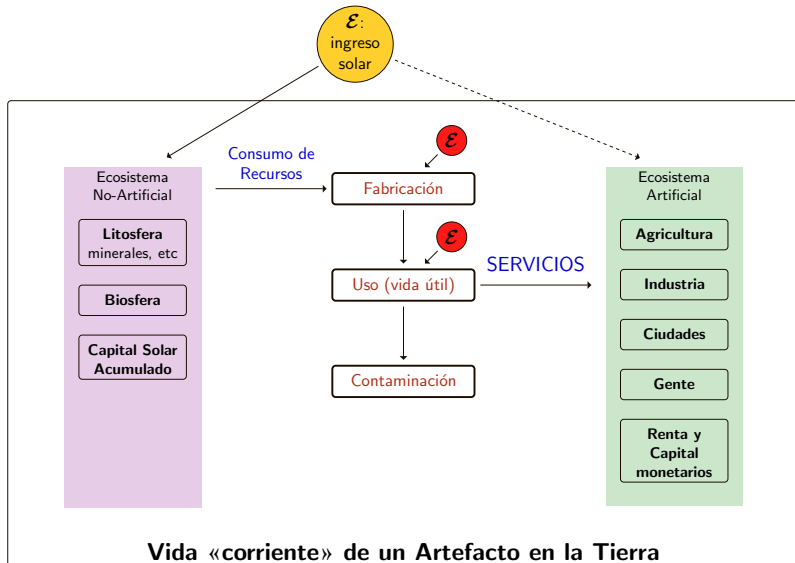
# Las reglas del «juego»



# Las reglas del «juego»



# Las reglas del «juego»



## «Desarrollo sustentable»

---

### Ecología

- desarrollo hasta una identidad
- estabilidad (climax)
  
- ciclaje de materiales

### Economía

- desarrollo indefinido
- crecimiento sostenido  
(*sustained*)
- consumo de recursos y  
vertido de residuos

### ¿síntesis?

-> | **desarrollo sostenible**  
(*sustainable*)

Se sigue debatiendo acerca del significado de 'desarrollo sostenible' porque el debate se cerro en falso **a favor de la economía monetaria y, por tanto, a favor de la inequidad.**

## ¿Fiebre o enfermedad? ¿Problema o coartada?



## La bomba de calor eléctrica

---

### ¡Qué invento!

Aunque el proceso práctico es complicado, el funcionamiento teórico de una bomba de calor es análogo a una bomba de agua: se trata de bombear calor desde una fuente fría a una caliente, en sentido contrario al flujo espontáneo. Para ello, como en una bomba de agua, es necesario realizar un trabajo, consumiendo energía útil.

Cuanto mayor sea la diferencia de temperaturas, menor será el rendimiento de la bomba. Y ese rendimiento es mayor que la unidad; por ejemplo para calefacción:

$$\frac{\text{calor aportado}}{\text{energía eléctrica consumida}} = 1 + \frac{T_{\text{Fría}}}{\Delta T}$$

Y para una bomba trabajando entre 0 y 20°C, el **rendimiento teórico** es:

$$1 + \frac{273 \text{ K}}{20 \text{ K}} \approx 15$$

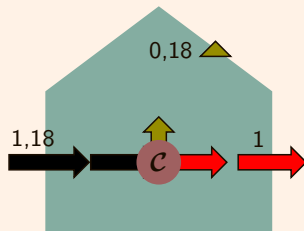
## La bomba de calor eléctrica

«Es infinitamente más rentable usar una cantidad mínima de esta energía de cinco estrellas [electricidad], altamente concentrada, para acumular la energía antigua desordenada y de baja calidad que yace en nuestros patios y concentrarla dentro de la casa. ¡Esto sí que constituye una gestión eficiente de los recursos energéticos!»

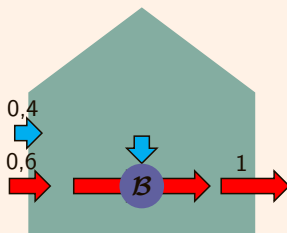
P.W. Atkins, *La segunda ley*, 1984.

	Caldera	Bomba
Rendimiento del aparato	0,85	2,5
Consumo	1,18	0,4
Pérdidas	1,18	1
- pasivas	0,18	
- activas	1	1
'Contaminación' térmica	1,18	0,4

**Pero tras estas cifras tan optimistas hay más historias que contar...**



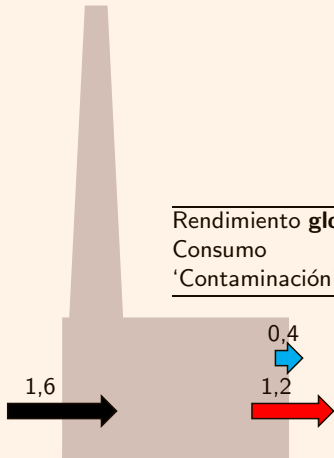
Caldera de gas



Bomba de calor

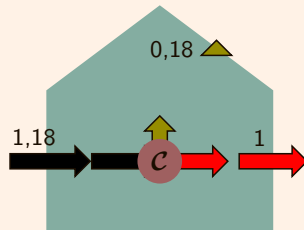


# La bomba de calor eléctrica

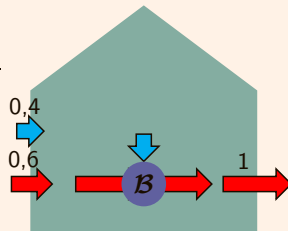


Central eléctrica

	Caldera	Bomba
Rendimiento <b>global</b>	0,85	0,63
Consumo	1,18	1,6
'Contaminación' térmica	1,18	1,6



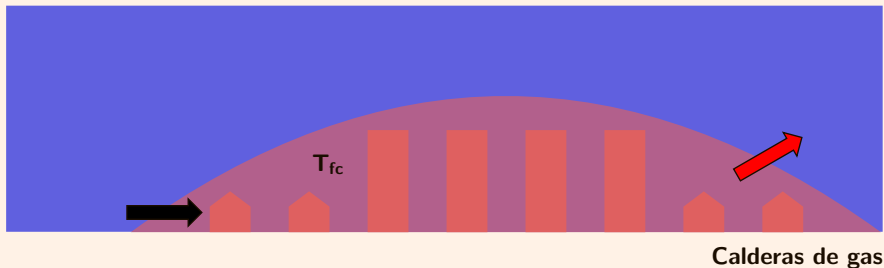
Caldera de gas



Bomba de calor

## La bomba de calor eléctrica

---



En la 'ciudad del gas', la energía consumida se usa dos veces: primero caldea el interior de los edificios; luego caldea el espacio urbano, el espacio del 'fuera' (Fernando Ramón).

El microclima urbano resulta así algo más suave que el clima meteorológico, aquel que se padece en el rededor rural.

## La bomba de calor eléctrica

---

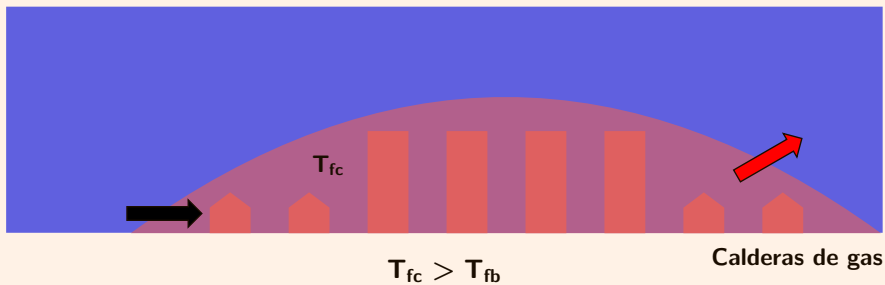
En la 'ciudad de la bomba', solo una pequeña fracción de la energía consumida llega a la ciudad para caldearla, disipándose la mayor parte en el entorno rural de la central eléctrica. Las propias bombas caldean los edificios enfriando el espacio urbano.

El microclima urbano resulta así algo más duro que en la 'ciudad del gas': las propias bombas han de hacer frente a una mayor diferencia de temperaturas (y mayores pérdidas por tanto), viendo disminuir su rendimiento.



**Bombas de calor**

# La bomba de calor eléctrica



**Al utilizar electricidad nuclear, ¿emitimos o no CO<sub>2</sub> a la atmósfera?**

# La energía nuclear de fisión

Fosa 1 de la Mina Ranger en Australia



Todo el material, mineral, ganga y tierra, se extrae y mueve mediante motores diesel. En las mejores minas hay que movilizar como poco 30 kg por cada kg de mineral de uranio útil ( $U_3O_8$ ). Pero más corrientes son yacimientos con leyes del 10%. Las reservas 'inagotables' tienen leyes ridículas del 0,001%.

¿Cuánto diesel se gasta por cada kilowatiohora de electricidad nuclear producida?



# La energía nuclear de fisión

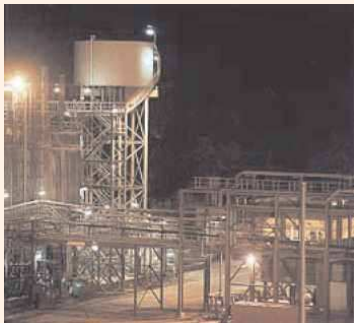


El mineral se muele hasta convertirlo en polvo. El uranio se disuelve en ácido sulfúrico (junto a otros metales presentes), dejando como subproducto residuos sin uranio.

Los molinos podrían funcionar con electricidad nuclear (en el mejor de los casos). El mineral de uranio se encuentra en rocas duras que requieren de 3 a 4 veces más energía que rocas blandas como las calizas. Otro coste que hay que contabilizar.

## La energía nuclear de fisión

---



El mineral sobrante se neutraliza con cal, producida por calcinación, un nuevo gasto de combustible.

El mineral neutralizado se transporta y maneja en los pozos de relave, con máquinas diesel (más combustible).





## La energía nuclear de fisión

---



La solución de uranio y otros metales se trata con aminas disueltas en **queroseno** para separar el uranio que, finalmente, se precipita mediante amoniaco en forma de diuranato de amonio o *torta amarilla*. Aminas y amoniaco requieren actualmente para su fabricación combustibles fósiles.

# La energía nuclear de fisión



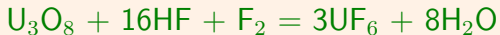
La *torta amarilla* se tuesta a  $800^{\circ}\text{C}$  en hornos de petróleo, consiguiéndose óxido de uranio de un 98 % de pureza, un polvo verde oscuro. Este es el producto final de la etapa minera, que se transportará en bidones hacia las fábricas de productos derivados (combustible, escudos militares, etc), repartidas por todo el planeta. Todas las emisiones producidas hasta aquí se contabilizan en el país minero.



# La energía nuclear de fisión

## Hexafluoruro de uranio

La etapa siguiente consiste en disolver el óxido de uranio en ácido fluorhídrico y gas flúor para producir hexafluoruro de uranio en estado gaseoso:



El hexafluoruro de uranio, un gas, se transporta a continuación en grandes cilindros para su posterior enriquecimiento. (Las plantas de enriquecimiento no pueden estar en cualquier sitio —caso de Irán.)



# La energía nuclear de fisión

## Uranio enriquecido

El uranio que se encuentra en la naturaleza consiste de 3 isótopos: 99,2745 % de U-238; 0,7200 % de U-235; y 0,0055 % de U-234.

El proceso estándar de enriquecimiento del combustible para un reactor de agua a presión (PWR) transforma la mezcla a 96,4 % de U-238 y 3,6 % de U-235; una mezcla apta para la fisión.

Las centrifugadoras funcionan con electricidad, de modo que esta etapa podría ser alimentada directamente por electricidad nuclear. Sin embargo, para construir las cascadas de centrifugadoras metálicas se requiere más combustible fósil.

Finalmente, se traslada el gas de hexafluoruro de uranio enriquecido (al 3,6 %) a la planta de fabricación del combustible nuclear.



# La energía nuclear de fisión

El  $\text{UF}_6$  en forma de gas se convierte en dióxido ( $\text{UO}_2$ ) en polvo, se comprime para fabricar tacos, y se cuece en un horno de combustible para dar origen a un material cerámico. Los tacos (*pellets*) se cargan entonces en un tubo de una aleación de zirconio. Varios de estos tubos se juntan para conformar una celda de combustible.

El zirconio es un elemento metálico derivado del zircón, un mineral de silicato de zirconio, subproducto de la explotación de sales de rutilo (otro proceso de alto consumo energético, similar al del uranio). El zirconio aparece en la naturaleza siempre acompañado de hafnio, el cual es preciso separar (con dificultad) para su uso nuclear.

Se necesitan hasta 2 toneladas de zirconio por cada tonelada de uranio en el combustible.



# La energía nuclear de fisión

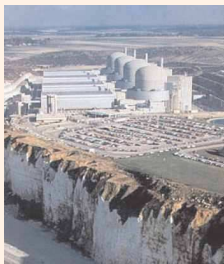
---



El combustible 'nuevo' es sólo ligeramente radiactivo y puede ser manejado sin protección. Las unidades de combustible se trasladan a continuación al reactor en camión o tren.

## La energía nuclear de fisión

---



Un reactor nuclear de 1000 MW(e) contiene aproximadamente de 100 a 130 toneladas de dióxido de uranio, y cerca de una tercera parte de éste es cambiado cada año en forma rotativa. Si se excluyen los vehículos que trasladan a los operarios hacia el sitio de trabajo, el reactor no produce nada de CO<sub>2</sub>. Pero sí consume electricidad, al mismo tiempo que la produce, y en la medida que esa electricidad es generada mayoritariamente por la quema de combustibles fósiles, este factor debe ser incorporado al balance energético.

## La energía nuclear de fisión

---



Se requiere una gran cantidad de acero para construir una central nuclear, y el acero se fabrica fundiendo mineral de hierro con carbón coque. Y una central de energía nuclear requiere una gran cantidad de hormigón, que se hace con cemento. El cemento se fabrica triturando caliza y tostándola, usando combustibles fósiles. Además, la propia reducción de carbonatos y manganatos (*clinkerización*) libera bastante CO<sub>2</sub>.





## La energía nuclear de fisión



El combustible usado debe ser procesado en busca de un nuevo destino (o almacenado mientras tanto).

En el proceso *once through*, las barras se disuelven en ácido, y se extrae el plutonio, quedando el resto (incluyendo el uranio) como desecho de alto nivel.

En el proceso *recycling* también se recupera el uranio.

El plutonio recuperado y mezclas de óxidos de plutonio y uranio (MOX) se envían de vuelta por carretera a la planta de fabricación de combustible para ser usados en nuevas barras de combustible. **¡Más transporte!**

# La energía nuclear de fisión

---

La exploración de la cadena contable podría continuar:

- Los residuos deben ser vigilados durante decenas, centenas o miles de años según su vida media. . .
- Agotada su vida útil, las centrales han de ser demolidas y los residuos producidos abatidos y almacenados. . .
- . . .

# La energía nuclear de fisión

---

## Conclusión

- En el ciclo de vida de una central nuclear es imprescindible consumir combustibles fósiles en procesos en que de nada sirve la electricidad.
- También es necesario consumir electricidad que actualmente es mayormente producida por combustión de combustibles fósiles. Las emisiones correspondientes sólo podrían descontarse si toda la electricidad fuera nuclear en el futuro.
- Las minas de uranio explotables no son especialmente abundantes. La previsión sobre las reservas de uranio es que durarán menos que las de carbón.
- No hay acuerdo sobre las emisiones netas de CO<sub>2</sub> de una central nuclear típica. Con minerales de uranio de ley alta se han estimado entre un tercio y la mitad de las emisiones de una central moderna de gas de similar potencia.

## ¿Desarrollo sustentable?

Mariano Vázquez Espí

GIAU+S (UPM)

Grupo de Investigación en Arquitectura, Urbanismo y Sostenibilidad

Universidad Politécnica de Madrid

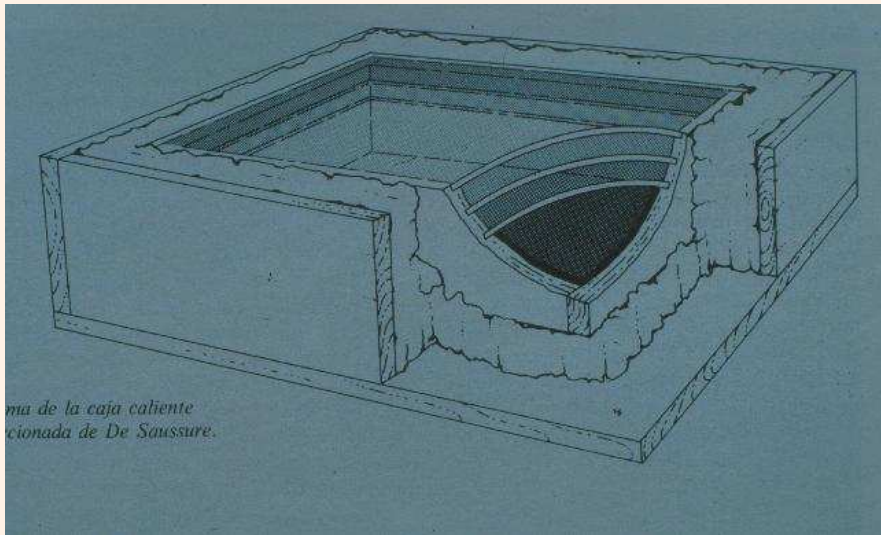
<http://habitat.aq.upm.es/gi>

Edición del 28 de noviembre de 2007

Compuesto con *free software*:  
GNULinux/L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X/dvips/ps2pdf

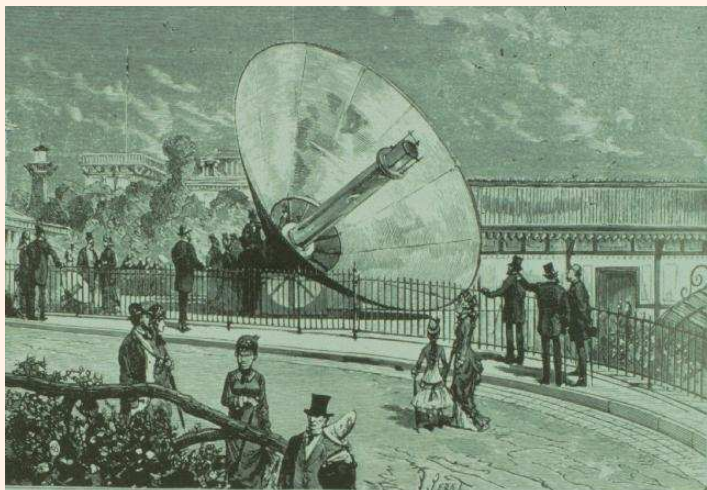
Copyright ©Vázquez Espí, 2007

## 'Caja solar' de Saussure



*ma de la caja caliente  
ccionada de De Saussure.*

## Maquina solar de Mouchot, 1878



*La mayor máquina solar de Augustin Mouchot, exhibida en la Exposición Universal de París de 1878.*