

# **Tecnologías energéticas contra el Cambio Climático**

**José M. Martínez-Val**

**Catedrático de Termotecnia, ETSII-UPM**

**Presidente del Comité Científico y Técnico  
de EURATOM, U.E.**

- **La energía como bien imprescindible para el desarrollo**
- **Las limitaciones de la naturaleza ante la explotación de los recursos**
- **Materia y energía: pilares físicos de la actividad humana. Pero la materia es reciclable; la energía, no. La energía se usa y se degrada.**

# **Energía, materia, actividad humana**

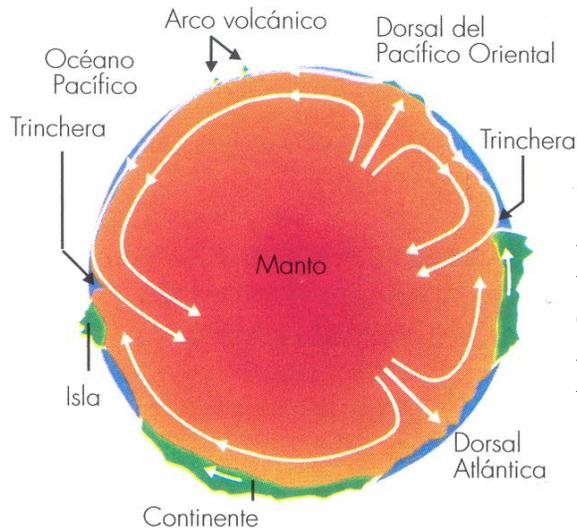
- ✓ **El balance energético en el planeta Tierra: dominado por la irradiación solar; perturbado en la troposfera.**
- ✓ **Los ciclos de la naturaleza, activados por la energía solar:**
  - **Ciclo agua/vapor**
  - **Ciclo carbono/CO<sub>2</sub>**
    - **La acción humana sobre este ciclo. La emisión antropogénica de CO<sub>2</sub> es un 6% de la tasa de reciclado natural de fotosíntesis en los cultivos terrestres**
    - **Inventario de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y en el mar, muy variable a lo largo del tiempo por causas naturales. A ellas se añade hoy día una causa artificial**

Balances energéticos: la materia se recicla;  
la energía, no: se usa y se degrada

## Referencia antropogénica

10.000 Mtep/año en total ~ 13 TW

**1 Unidad Antropogénica (UA)**



### Energías terrestres

Geotermia: 2,5 UA

Mareomotriz: 0,25 UA

### Energía solar

Exoatmosférica: 13.000 UA

Biosfera: 10.000 UA



# El sector de la Energía y la energía en el planeta

## Sector Energético (antropogénico; 6000 millones de habitantes)

> 10.000 Mtep  $\sim 10^{14}$  termias  $\sim 4,2 \times 10^{20}$  J

90% del consumo pasa por **Combustión Química**

$\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$

Ciclos terrestres naturales

- ✓ Efecto invernadero dominado por el vapor de  $\text{H}_2\text{O}$
- ✓ Efecto imprescindible para la vida en la superficie de la Tierra. Temperatura mayor que la que correspondería a atmósfera transparente.
- ✓ Gran sensibilidad de la meteorología a los coeficientes de retrodispersión: efecto invernadero. Historia geológica-meteorológica muy alterada
- ✓  $\text{CO}_2$  geológico fijado en combustibles fósiles y rocas (carbonatos)

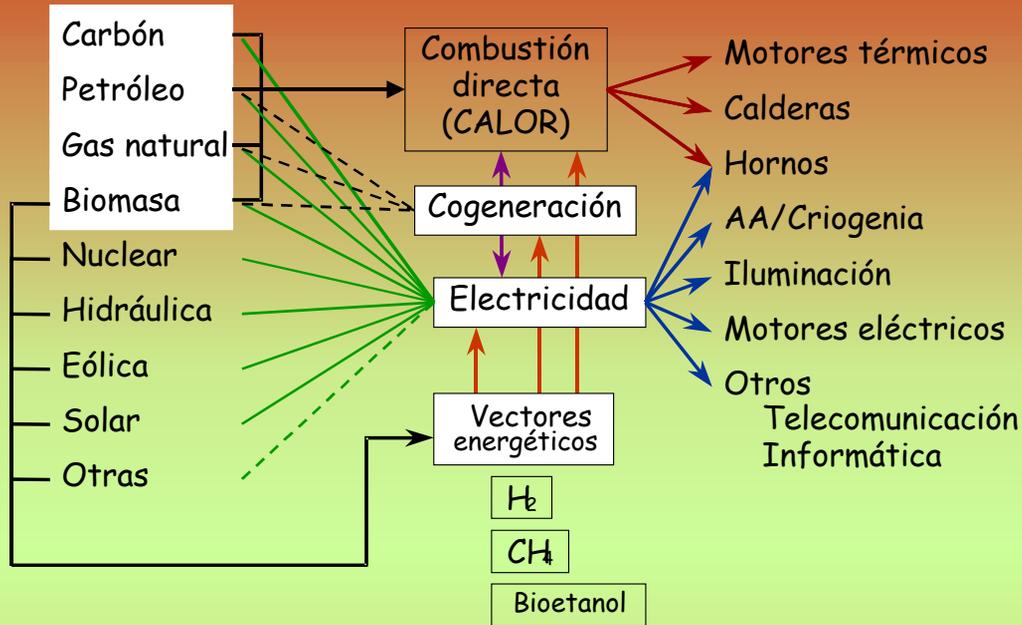
# La energía en la Tierra

- **Geogénica:** por radiactividad natural y efectos tectónicos  
(Despreciable a escala global)

- **Solar:** ~ 1350 W/m<sup>2</sup>.normal, exoatmosférica
  - Energía anual recibida ~ 5,5x10<sup>24</sup> J/año  
unas 12.000 veces la energía antropogénica
  - Energía en la troposfera ~ 4,0x10<sup>24</sup> J/año  
unas 10.000 veces la antropogénica
  - Densidad media superficial original de radiación ~ 240 W/m<sup>2</sup>  
**(lo que corresponde a unos 18 °C bajo cero)**
- Alteración del efecto invernadero natural > +150 W/m<sup>2</sup>
- Densidad troposférica de radiación : 390 W/m<sup>2</sup>  
**lo que corresponde a unos 15 °C sobre cero**

## Fuentes energéticas en origen

## Usos



Para llegar desde las fuentes de energía a las aplicaciones útiles se ha de pasar a través de algún proceso de transformación energética, que se materializa en una máquina o dispositivo adecuado, desde bombillas de incandescencia o de fluorescencia a motores de explosión. En algunos casos es factible cogenerar al mismo tiempo calor y electricidad (e incluso desplegar trigeneración: electricidad, calor y frío). En el futuro, los vectores energéticos, y particularmente el hidrógeno, serán factores clave para un eficiente acoplamiento desde el suministro u oferta hasta la demanda.

# □ Uso racional de la energía

- Evolución de la intensidad energética por unidad de PIB

Intensidad energética per cápita

evolución según tipo de sociedad; creciente en los países menos desarrollados, incluido España

Problemática planteada por el acceso a la energía "barata" de países emergentes, como China, India, sudeste asiático, etc..

**El uso racional de la energía como deber individual facilitado y promovido por:**

**La tecnología** (motores de más alto rendimiento, mejor factor de potencia, mejores sistemas de control,...)

**El marco económico** (internalización de costes, impuestos, subvenciones...)

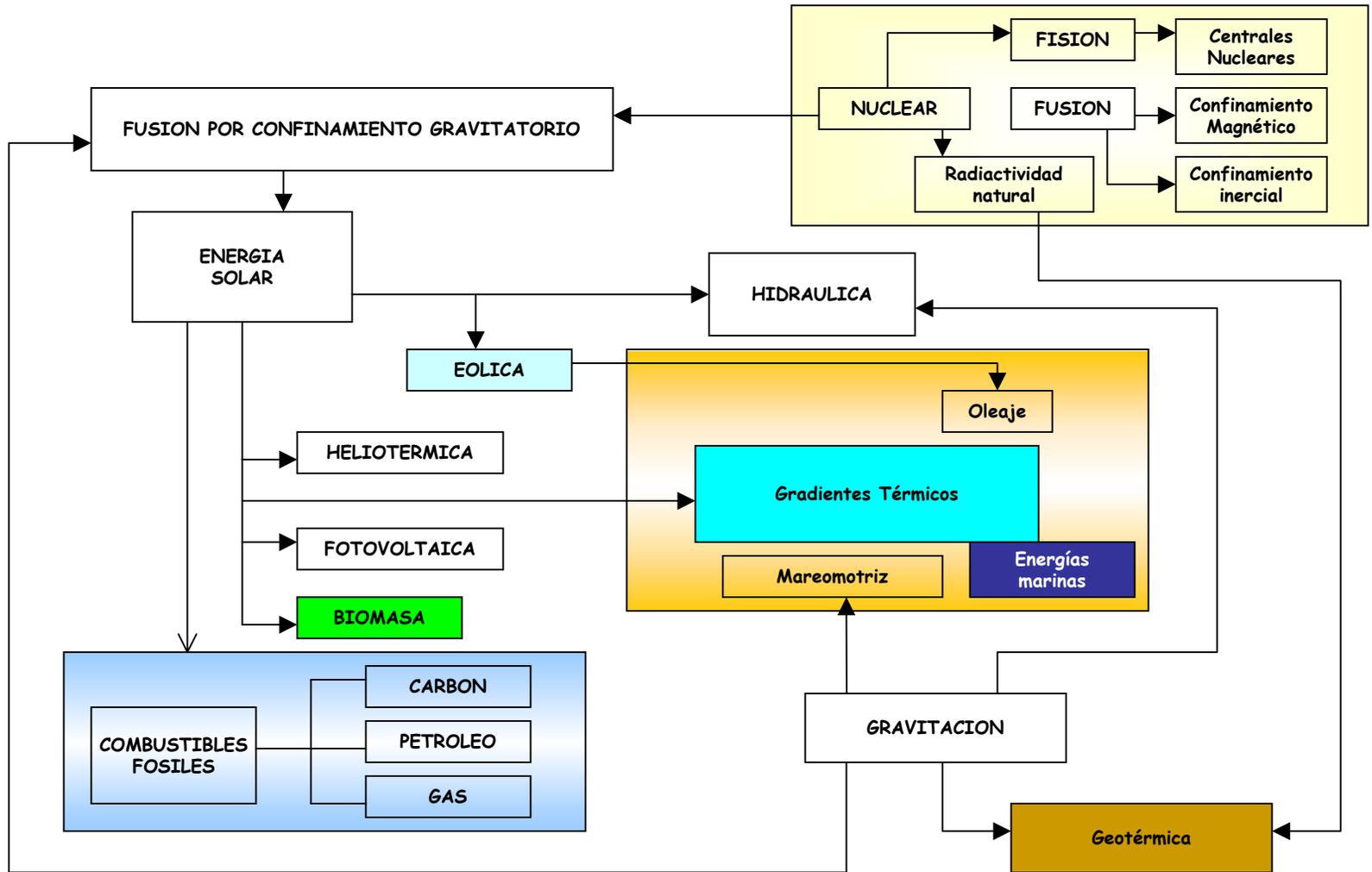
**Actuaciones sectoriales** (transporte, residencial, industrial,...)

# Fuentes de Energía

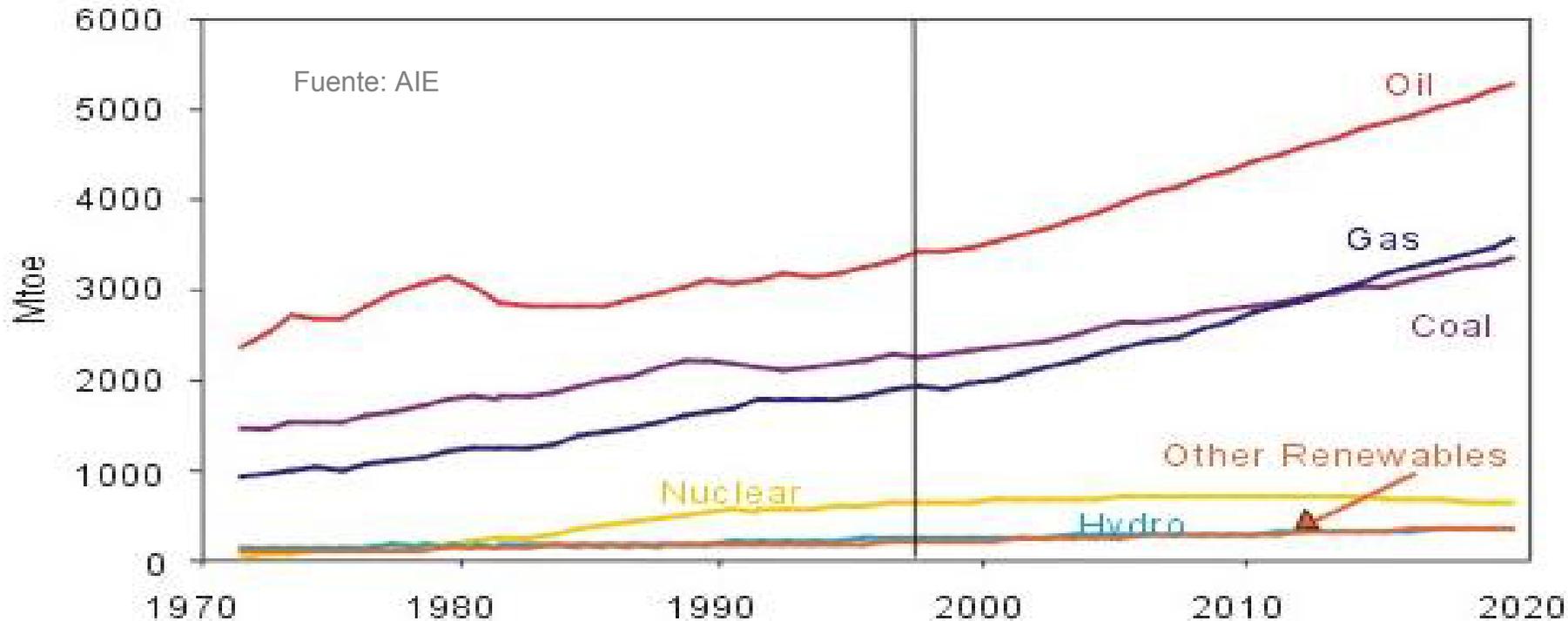
- Inventario conocido, sometido a leyes bien conocidas. Incertidumbres en reservas y recursos
- ¿Posibilidad de aparición de Nuevas Fuentes?. No descartable, pero no previsible a tenor de los fenómenos observados en nuestro universo físico.
- Estructura de la materia

NIVEL	REACCIONES ENERGÉTICAS
Molecular	Combustión Química
Molecular	Evaporación
Atómico cortical (rayos x)	No aprovechable
Núcleo Atómico	Fisión
Núcleo Atómico	Fusión
Núcleo Atómico	Radioisótopos (N.a.)
Subnuclear	No aprovechable
Antimateria	No aprovechable

# Interrelación de las fuentes de energía

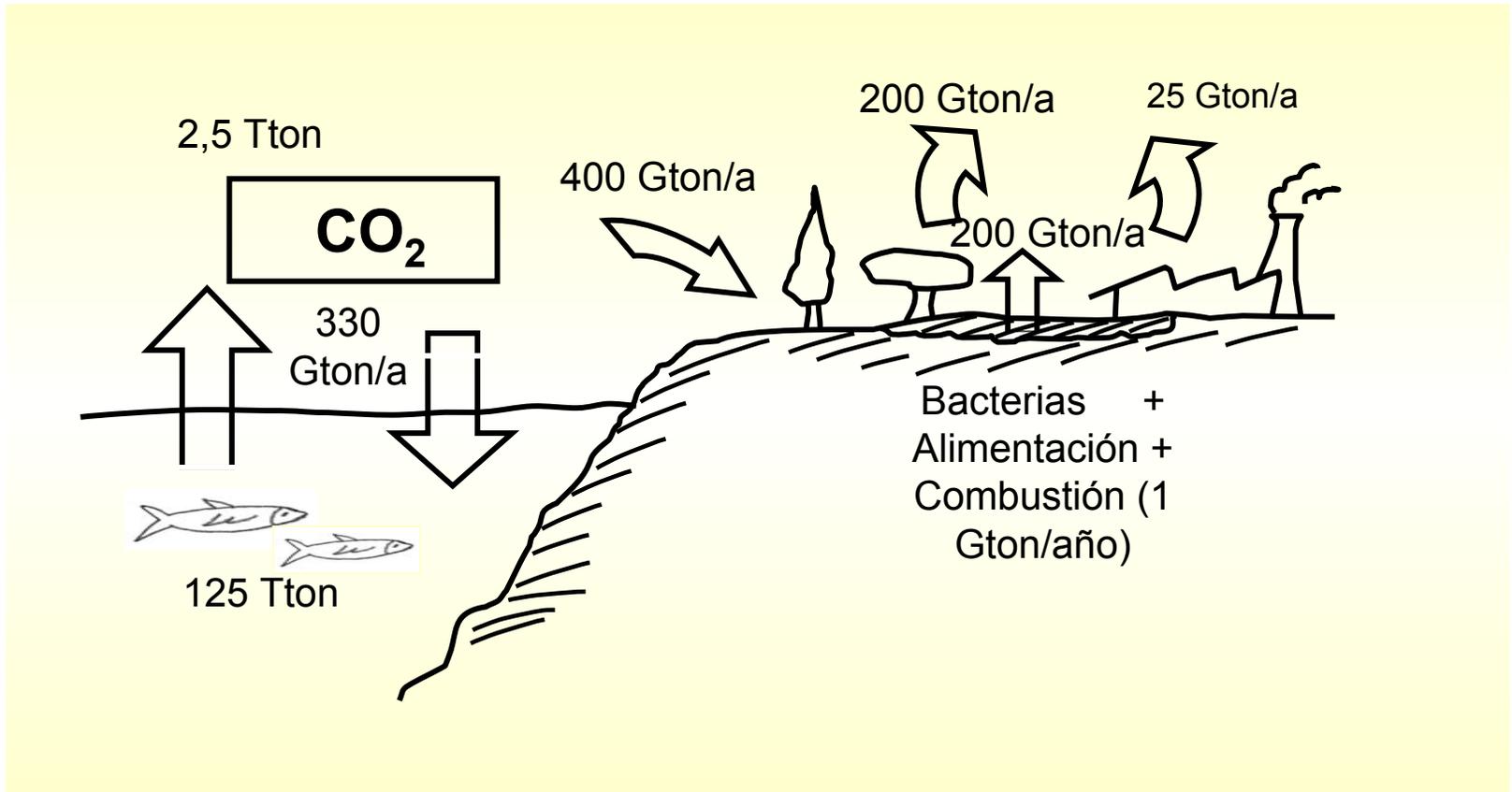


## World Primary Energy Supply by Fuel 1971-2020

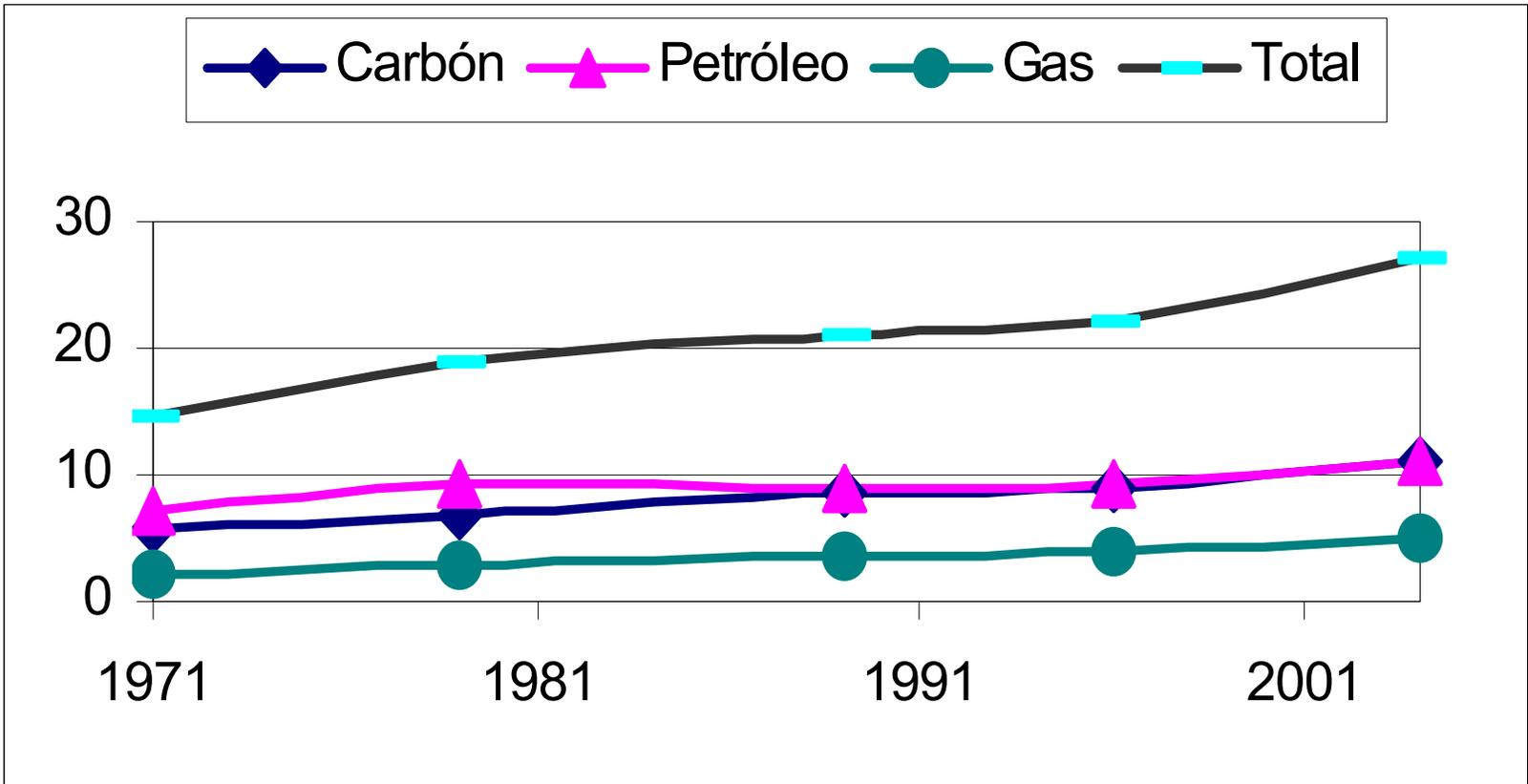


**Misión del ingeniero: establecer una industria energética que no transgreda límites, y posibilite el desarrollo socioeconómico, aprovechando de manera eficiente y segura la fenomenología natural**

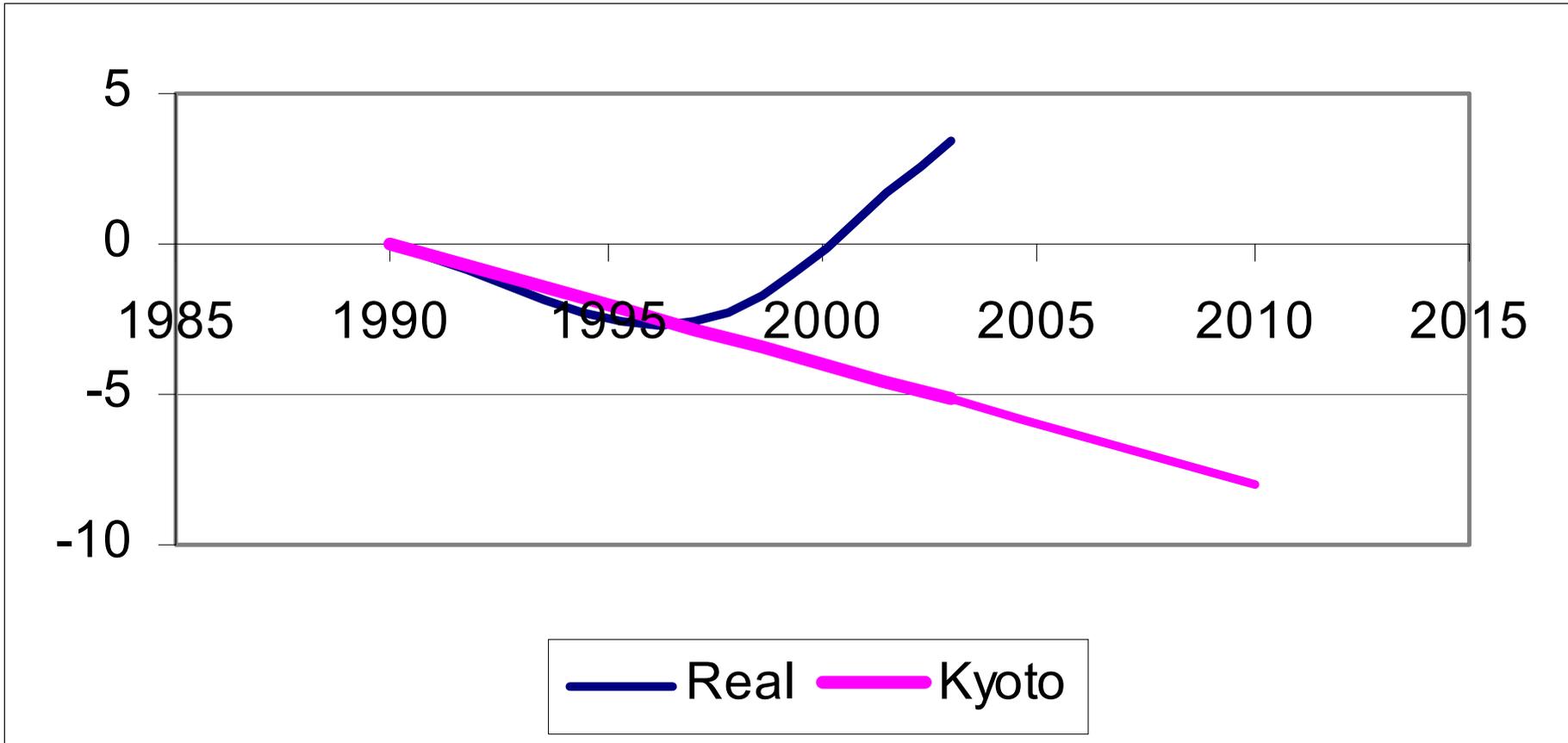
# El ciclo del carbono como pieza clave del Desarrollo Sostenible



**Distorsión antropogénica apreciable respecto de las variables naturales. El año 2000 se emitieron ~ 23 Gton/a la atmosfera, que es un 6% del balance fotosintético, y un 3% del total, incluido del océano. A su vez, es del orden de 1% (anual) del contenido atmosférico total. Hay que tener en cuenta que el  $\text{CO}_2$  funciona básicamente como un “relé” energético, sobre la gran masa energética que es la irradiación solar**

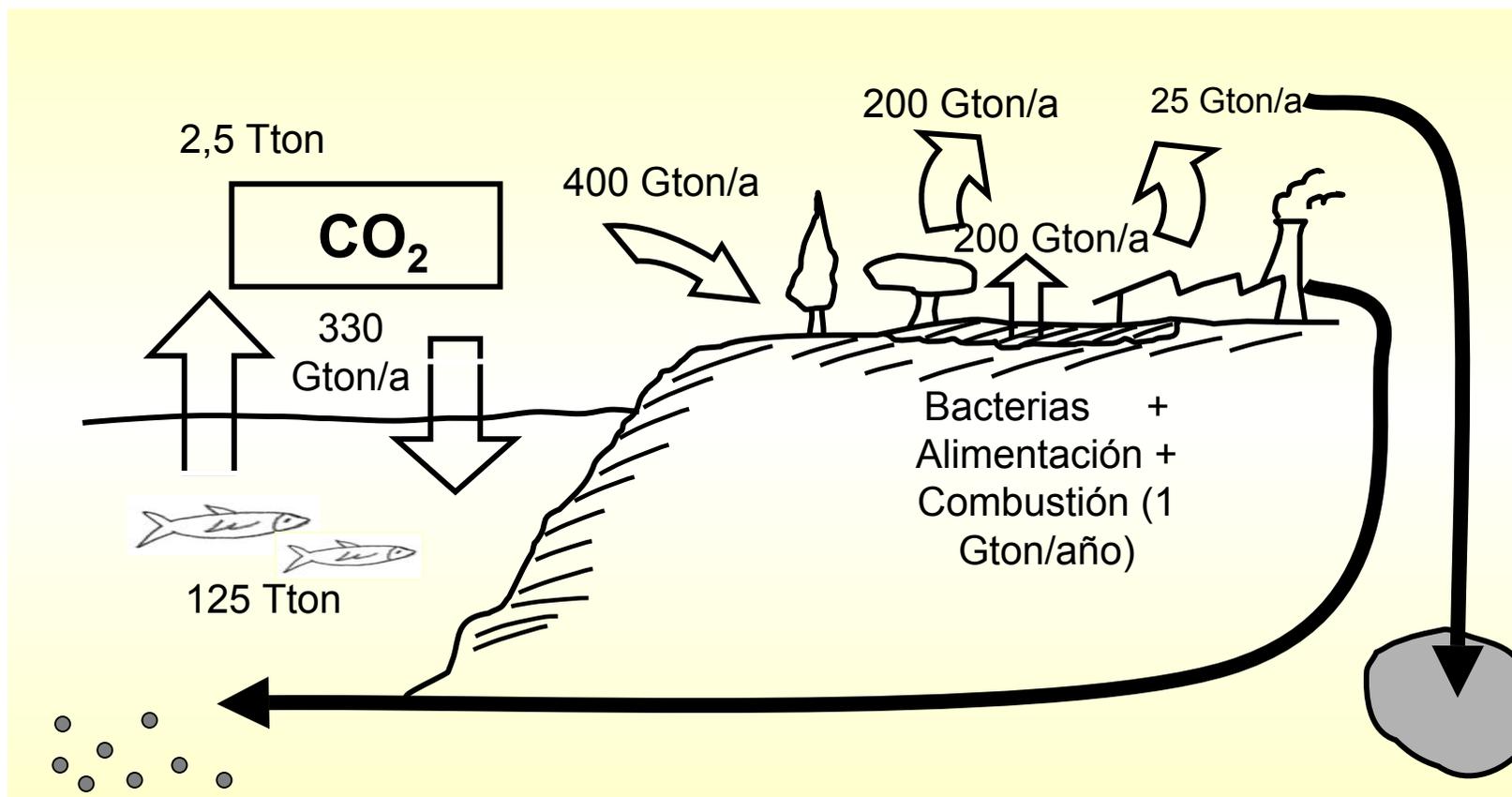


# Emisiones de CO<sub>2</sub> en U.E.

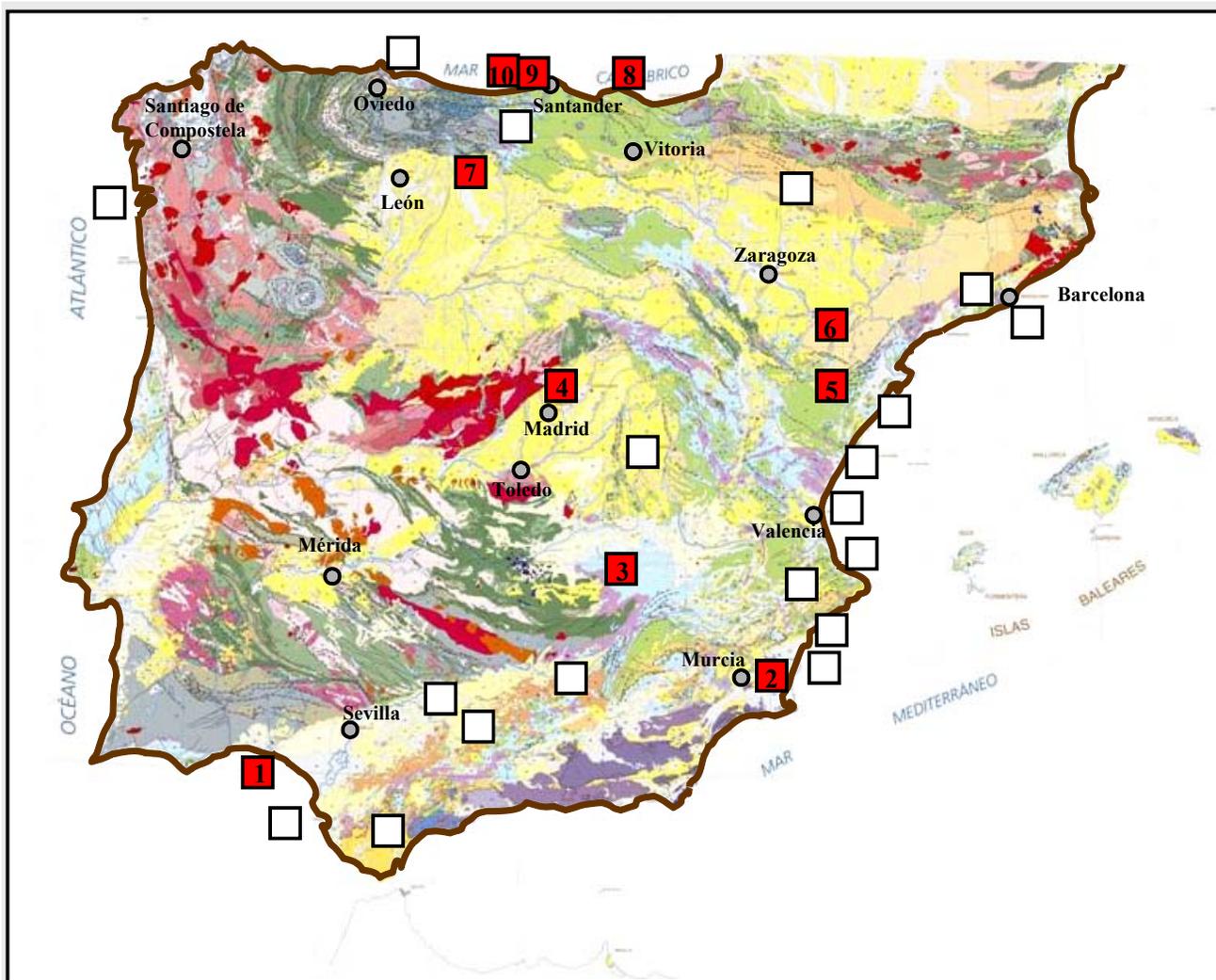


*Reacción política visceral: limitación por racionamiento*  
Se proscribe el uso de la inteligencia: nada de "la imaginación al poder". Escasísima confianza en la ciencia y en la tecnología

# Captura y secuestro del CO<sub>2</sub>



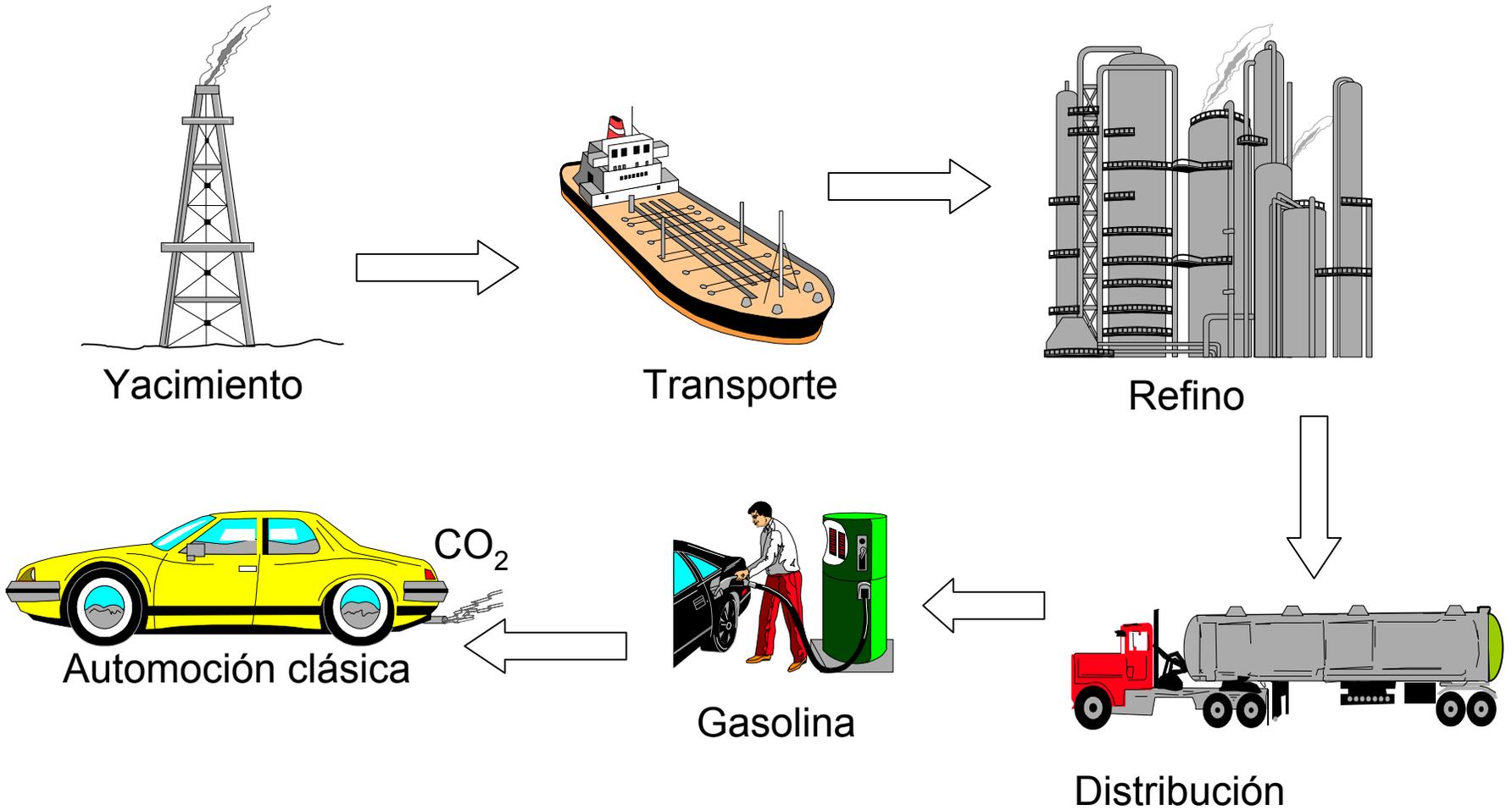
En algunas aplicaciones energéticas, podría capturarse el CO<sub>2</sub>, para ser confinado en almacenamientos subterráneos, o muy en el fondo del mar de manera dispersa (por debajo de 3.000 metros y a las temperaturas marinas, el CO<sub>2</sub> es un líquido más denso que el agua).



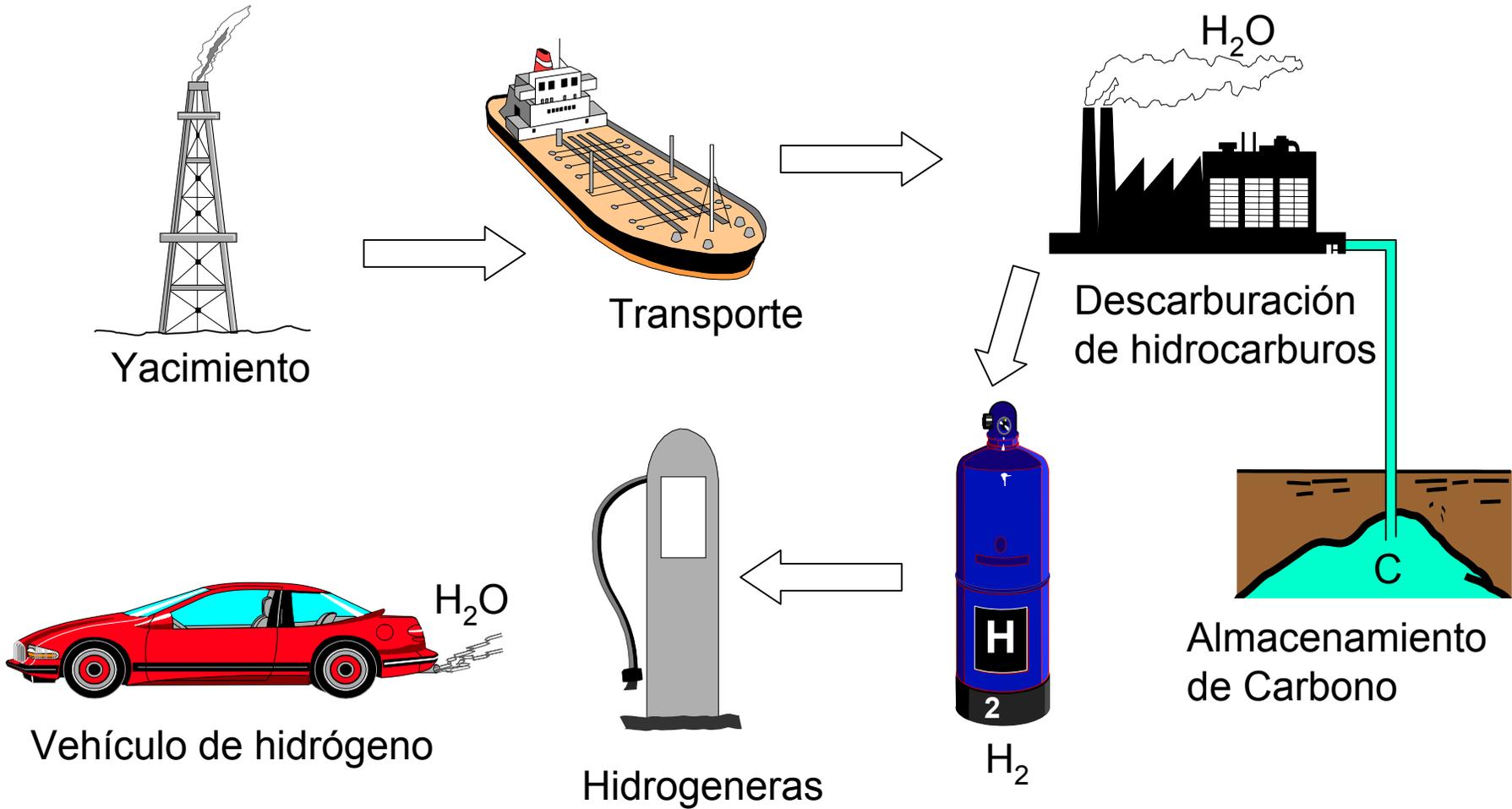
**■ Reservas del Estado**

1. Huelva marina
2. Alicante
3. La Mancha
4. Madrid
5. Teruel
6. Zaragoza
7. Palencia
8. Vizcaya marina
9. Santander marina-1
10. Santander marina-2

**□ Otras posibilidades**



Aprovechamiento actual de hidrocarburos en la automoción



Alternativa futura de aprovechamiento de hidrocarburos, con almacenamiento de Carbono

## El hidrógeno pide el relevo a la gasolina

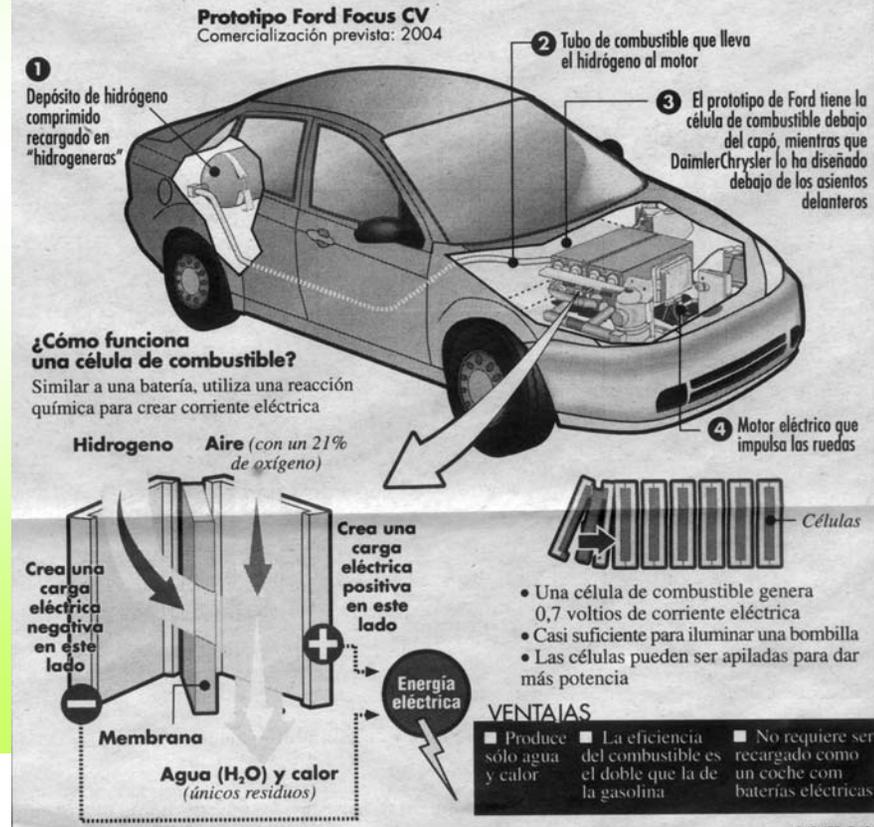
Las firmas automovilísticas diseñan ya modelos "limpios" para no quedar al margen de la revolución que se avecina

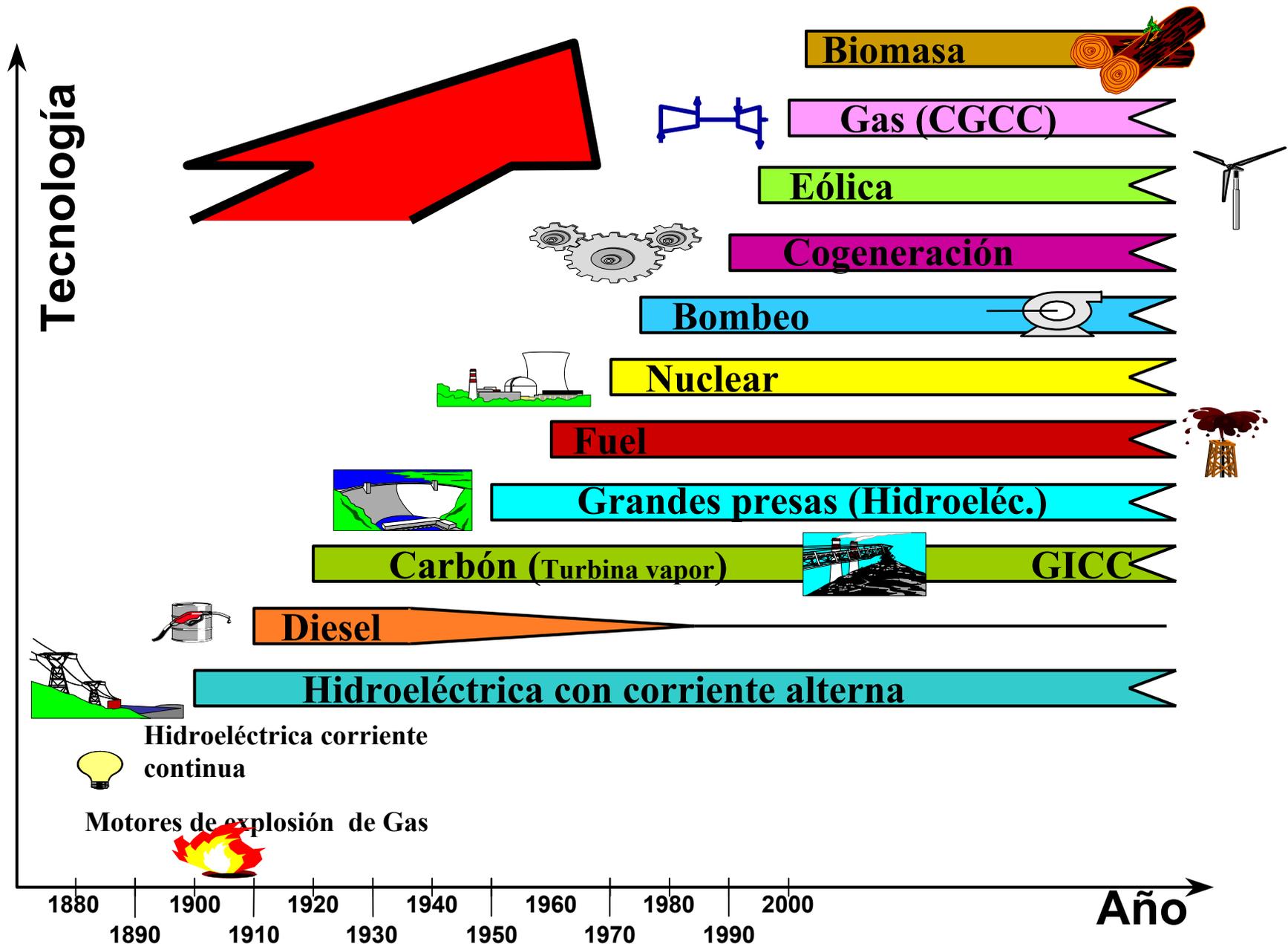
Un escollo clave es cómo producir, distribuir y almacenar el hidrógeno de manera competitiva

Los partidarios ven la oportunidad de desterrar los combustibles fósiles y frenar el calentamiento global

- Combustible ideal: directamente, o en pilas de combustible
- Inexistente: se ha de fabricar, por reducción química del agua

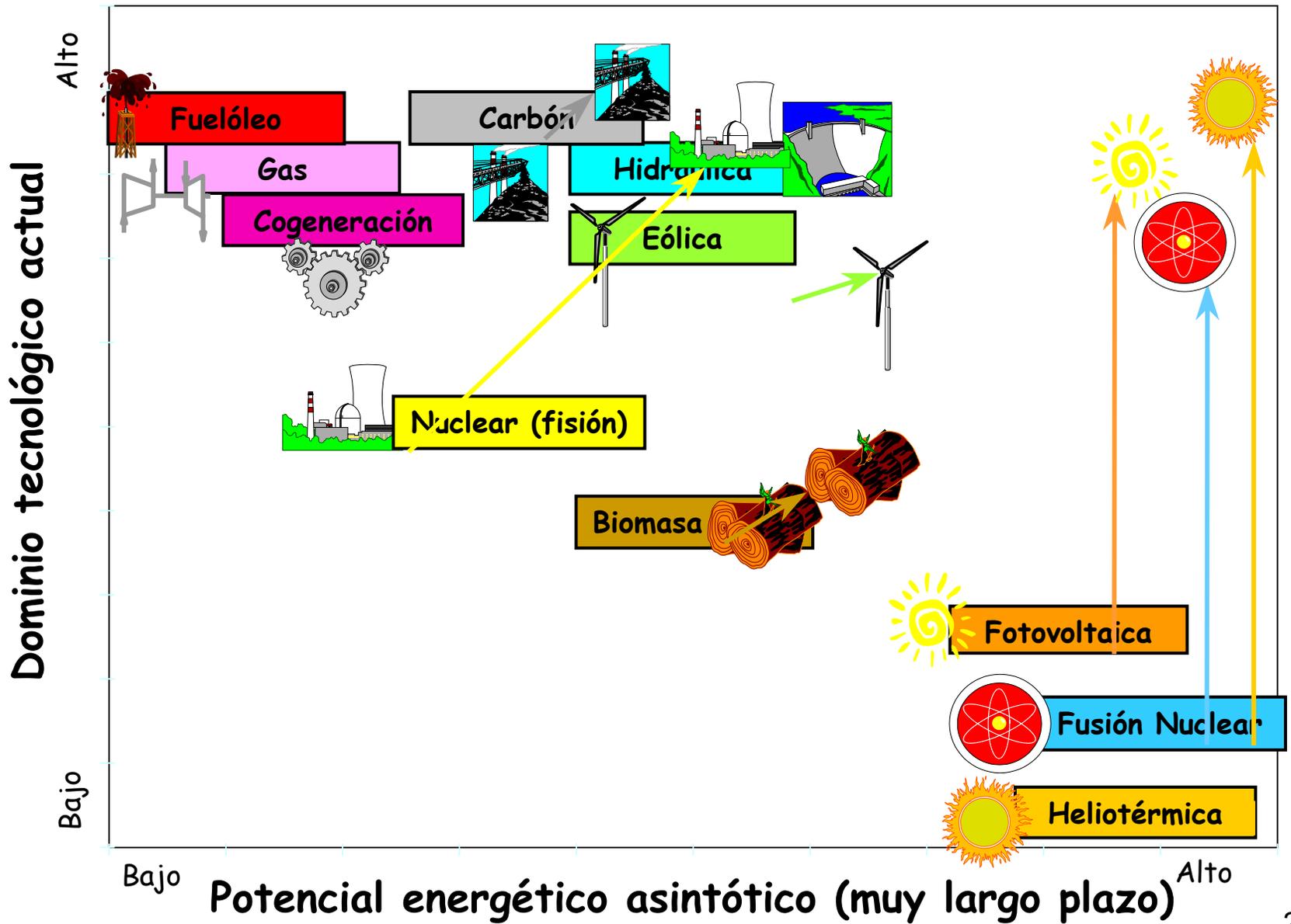
El futuro puede estar en las células de combustible, que son generadores eléctricos que consumen hidrógeno y sólo producen agua y calor como residuo. Sin embargo, la generalización del uso de las células de combustible tardará unos diez años





En el sector eléctrico se han aprovechado las tecnologías disponibles que mejor se ajustaban a una cobertura eficiente y económica de la demanda. Es uno de los ámbitos donde la actualización tecnológica ha sido más permanente

# Potencial intrínseco de las fuentes de energía



# Reservas y recursos energéticos

- **Fuentes no renovables: RESERVAS**
  - \* aseguradas
  - \* estimadas
  - \* geológicas

- **Fuentes renovables: RECURSOS anuales**
  - ✓ En bruto
  - ✓ Teóricos explotables
  - ✓ Operativos

- **Combustibles fósiles:**

Carbón = 300 Gtep (~ 220 años de consumo actual)

Petróleo = 140 Gtep (~ 40 años)

Gas Natural = 145 Gtep (~ 65 años)

## □ Nuclear

- Fisión: muy dependiente del tipo de reactor y ciclo combustible

3 Mton Unat →  $2.6 \times 10^{23}$  J teóricos

8 Mton Torio →  $6.9 \times 10^{23}$  J teóricos

(Producción bruta actual =  $2.7 \times 10^{19}$  J term/año)

(Máximo asintótico = 35.000 años de c.actual)

(Con LWR, 200 años)

- Fusión: > 1000 millones de años si el consumo no excediera el 1% de la Energía recibida del sol (incremento de  $\sim 1$  °C la T terrestre).

# HORIZONTES de SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA VIAS DE DESARROLLO SOSTENIDO

## HORIZONTE remoto: SIN COMBUSTIBLES FÓSILES

- **Renovables**: recursos limitados, pero muy amplios (10.000 UA, aprovechables al 1 %, es decir 100 UA)
- **Fusión Nuclear**: más de 1.000 millones de años con un consumo energético humano cien veces superior al actual.
- En ambos casos, necesidad de **desarrollo tecnológico**

## VIAS de Desarrollo Sostenido

- **Gas**: vastísima versatilidad; menor emisión  $CO_2$ /termia; geopolítica de sus reservas (Rusia)
- **Carbón**: CCT (Clean Coal Technologies) + confinamiento del  $CO_2$
- **Fisión Nuclear**: Mejorar seguridad (no otro Chernobyl)  
Reducir peligrosidad de sus residuos.

# Hidráulica

## Potencial hidráulico global

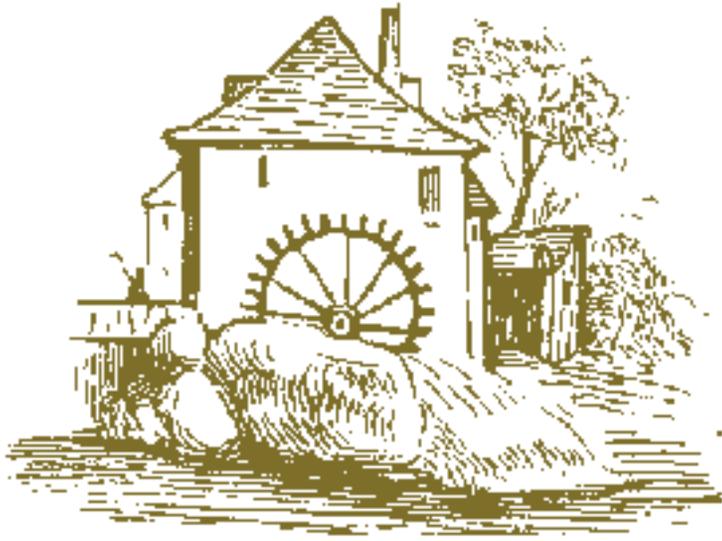
10.000 TWh/año

Actualmente explotado: 2.600 TWh/año

Equivalente a: 225 Mtep/año (de ahorro de combustión equivalen a 600 Mtep/año)

Potencial de potencia (al 50% del total):

0,6 TW eléctricos ~ 1,5 TW térmicos



# La atmósfera

# Eólica

Termosfera 500 Km  
Protección contra meteoros exteriores

Auroras

Meteoritos

Cinturón de polvo 50 Km  
Restos de meteoros

Estratosfera

Capa de ozono 16 Km  
Protección ultravioleta

Troposfera

## Potencial eólico global

10.000 – 20.000 TWh/año

Actualmente explotado: 60 TWh/año

Ciclo de negocio incipiente

Potencial de potencia (al 50% del total):

1 TW eléctricos ~ 2,5 TW térmicos

## Identificación de campos eólicos



# Solar: Biomasa

## Recurso natural actual

14 Gtec/año ~ 10 Gtep/año

Aprovechamiento actual:

1,1 Gtep/año (11%)

Un aprovechamiento adicional del 22% equivaldría al consumo actual de carbón (2,2 Gtep/año)

Necesidad de agua, sol y nutrientes

## Biomasa energética

Cultivos especializados, como el cardo en el caso español.

20 ton/Ha.año.

*Posibilidades de nuevos organismos*

*diseñados genéticamente,*

*mucho más eficientes?*



**Dificultades logísticas y de economía de escala**

# Luz solar: fotovoltaica

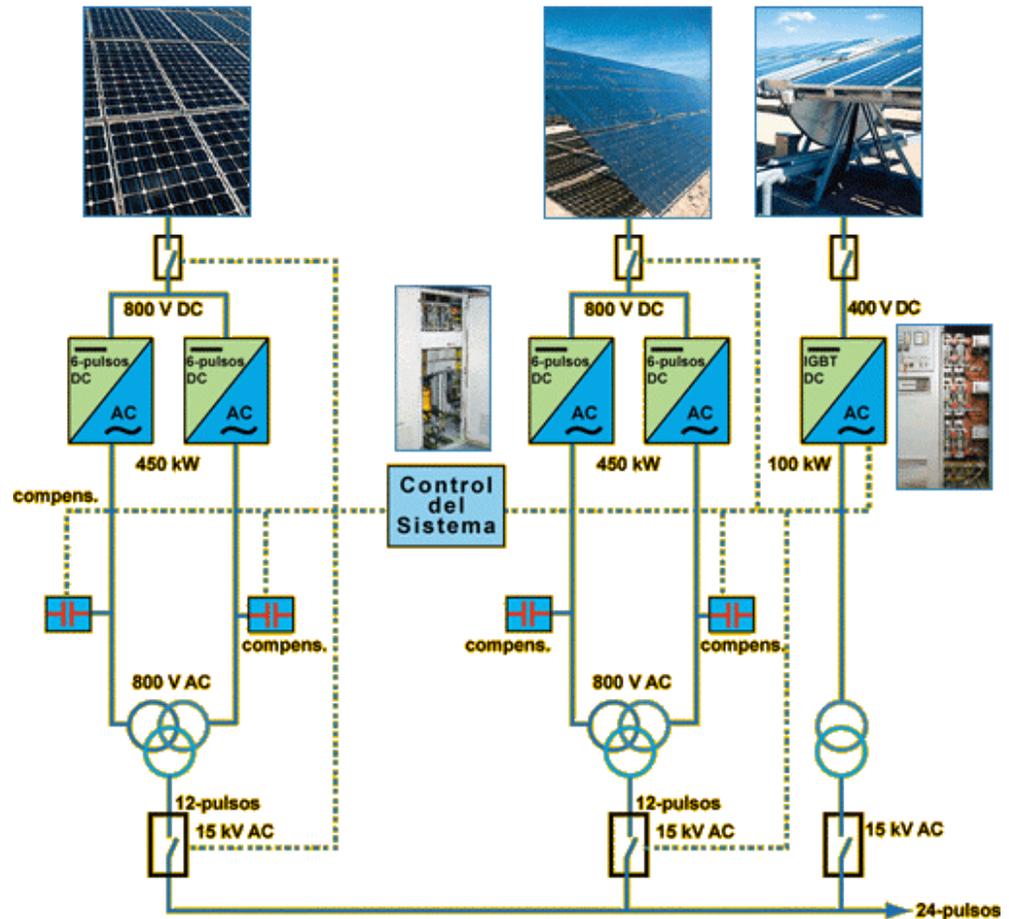
## Conversión ordenada de fotones en energía eléctrica

A pesar de la fuerte reducción de entropía, los rendimientos son apreciables (10% habituales, pudiendo llegar a 30% en células multiunión)

Paneles planos para **luz difusa**  
Aplicables a casi cualquier latitud

Paneles con concentración para la **irradiación directa**  
Solo aplicables en zonas de baja latitud y sin nubosidad

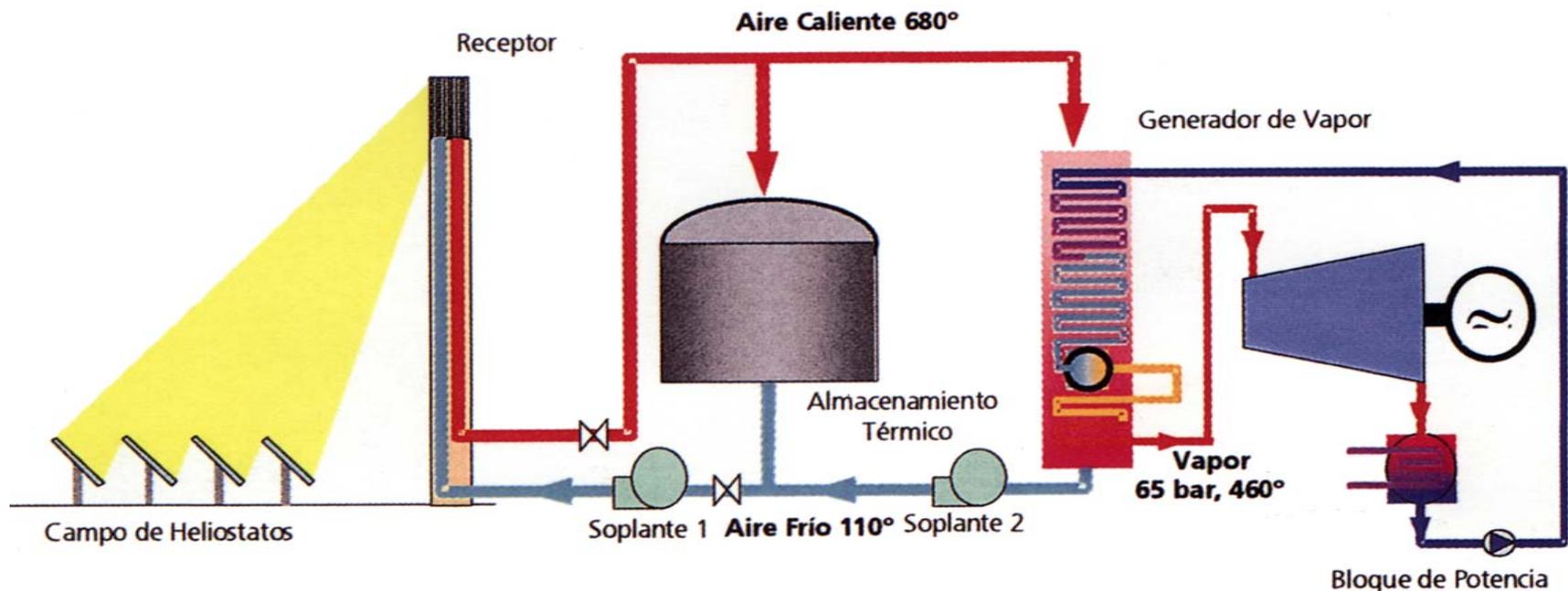
Carencia del material: se compete con la informática en el mercado de silicio purificado



# Calor solar: heliotérmica

## Conversión de calor a energía mecánica por ciclo termodinámico

Necesidad de concentración de la luz solar: sólo con irradiación directa



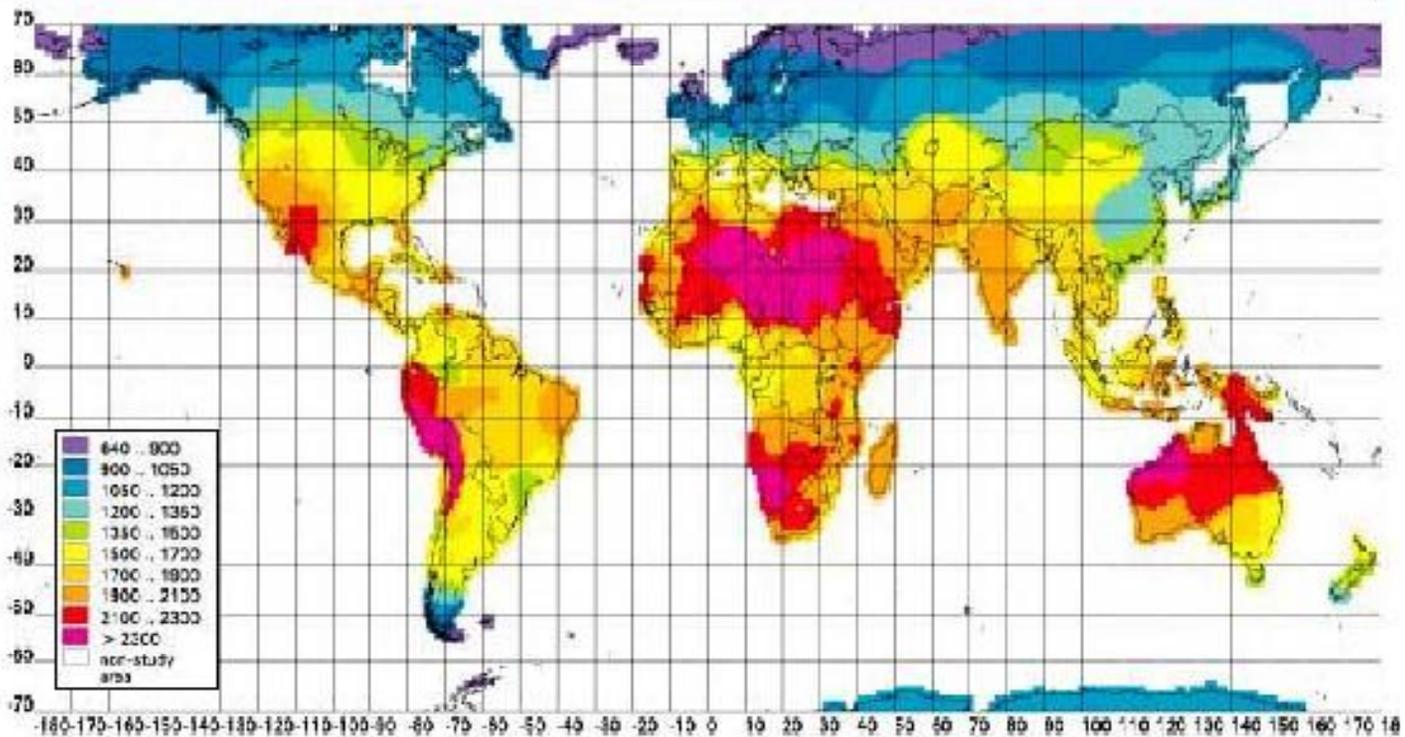
Fuerte dependencia del **rendimiento** respecto de la temperatura del foco caliente.  
Rendimientos accesibles sobre el 40%.

Facilidad de **almacenamiento térmico** para acoplar disponibilidad a demanda

**Posibilidad de producción de hidrógeno (vía electrólisis o vía pirólisis)**

# Energía solar: zonas idóneas alejadas de los grandes centros de consumo, por lo general

## SOLAR ENERGY SUPPLY *Global irradiation*



**Average global irradiation per year [kWh/m<sup>2</sup>] - Belgium: 1050 kWh/m<sup>2</sup>**

source: Meteotest, Meteonorm 3.05

# Energía solar

**Más de 10 millones de km<sup>2</sup> de alta insolación directa (por encima de 2.000 kWh/m<sup>2</sup>.año) que equivalen a 20 millones de TWh/año.**

**Equivalente a unos 2.200 TW (casi 200 veces el consumo actual de la humanidad)**



## **Problemática de la transmisión de energía.**

Producción de hidrógeno y combustibles sintéticos =  $\eta \times 1,8 \times 10^6$  Mtep/año, que podría representar cerca de  $10^6$  Mtep/año, es decir 100 veces el consumo de combustibles fósiles actualmente.

Transmisión de electricidad por líneas superconductoras

# Energías renovables: puntos fuertes y débiles

- + **No desequilibran el balance termofísico**
- + **Minimizan el impacto ambiental**
- + **Amplia disponibilidad de base**
- + **Tecnologías no muy exigentes (en P, T, V, etc.)**
- + **Buena conversión a electricidad**
  
- **Intermitencia, variabilidad, no pronosticable**
- **Dificultad de garantizar el suministro**
- **Dificultad de almacenamiento**
- **Lejanía a los grandes centros de consumo**
- **Explotación económica incierta**
- **Tecnologías no siempre replicables (biomasa)**

**Quiénes logren dominar tecnológica y económicamente las Energías Renovables, tendrán mucho más fácil la transición hacia los nuevos escenarios de desarrollo. Pero hay que contar con la “materia prima” energética y la tecnología**

# HORIZONTES de SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA VIAS DE DESARROLLO SOSTENIDO

## HORIZONTE remoto: SIN COMBUSTIBLES FÓSILES

- **Renovables**: recursos limitados, pero muy amplios (10.000 UA, aprovechables al 1 %, es decir 100 UA)
- **Fusión Nuclear**: más de 1.000 millones de años con un consumo energético humano cien veces superior al actual.
- En ambos casos, necesidad de **desarrollo tecnológico**

## VIAS de Desarrollo Sostenido

- **Gas**: vastísima versatilidad; menor emisión  $CO_2$ /termia; geopolítica de sus reservas (Rusia)
- **Carbón**: CCT (Clean Coal Technologies) + confinamiento del  $CO_2$
- **Fisión Nuclear**: Mejorar seguridad (no otro Chernobyl)  
Reducir peligrosidad de sus residuos.

## Opción Nuclear. “Pros”

- ▶ Su propia fuerza (fuerza fuerte por antonomasia).
- ▶ El hombre siempre ha sido capaz de dominar todo avance científico que se ha realizado. ¿Será lo nuclear nuestro límite?. No hay razón para ello, ni en fisión, ni en fusión. Los “nucleares” no somos “aprendices de brujo” que estemos jugueteando con redomas incontrolables

### ▶ Criterios de “Desarrollo Nuclear Sostenible” (o Durable)

1. No proliferante

2. Seguro

Imposibilidad de accidentes de supercriticalidad

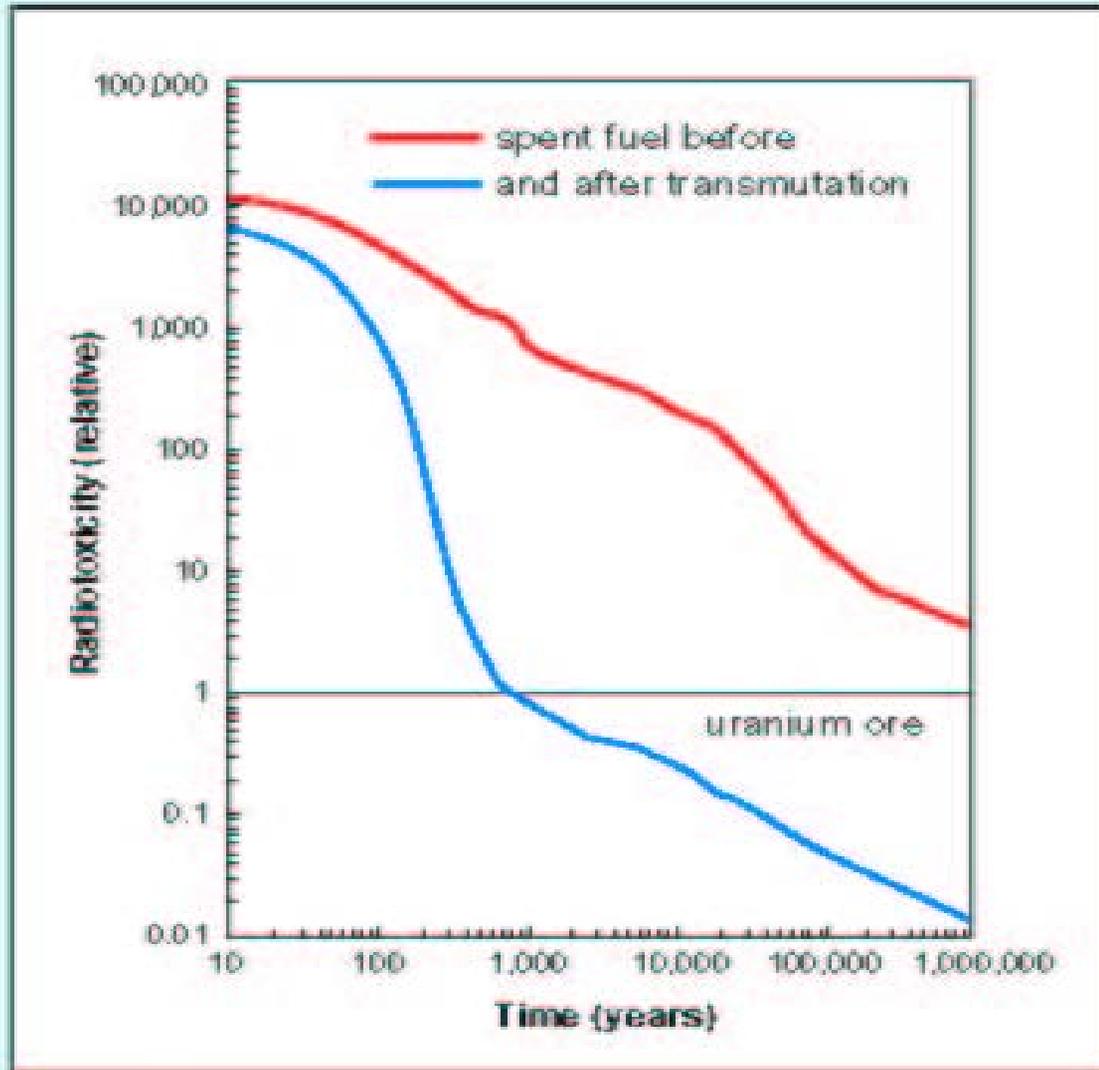
Minimización de escapes de radiactividad

Acotación de los escapes

3. Minimización de residuos, particularmente los de muy largo plazo

4. Aprovechamiento adecuado del combustible (muy por encima del 0,6% actual)

5. Económico. Minimización de costes. Posibilidad de producción de H<sub>2</sub>



## ¿Para qué desarrollar la Fusión?

- ➔ En la Tierra no es probable que lleguemos a explotar el ciclo protón-protón. Demasiado lento (por fortuna)
  
- ➔ Reacciones esenciales a base de Deuterio
  - 1 átomo de deuterio por cada 6500 de H
  - 1 m<sup>3</sup> de mar =  $8 \times 10^{12}$  J = 200 litros de petróleo
  - $1,5 \times 10^9$  km<sup>3</sup> de agua en la Tierra =  $1,2 \times 10^{31}$  J
  - 32.000 millones de años del total de la energía consumida actualmente por la humanidad (La Tierra no permanecerá habitable, por lo que sabemos de la “vida del Sol”, mucho más de 1000 millones de años)
  - Si se explotara la fusión con un tope de 1% de la energía solar llegada a la Tierra, el deuterio podría proporcionar energía para más de 500 millones de años.
  - A ello podrían añadirse otros combustibles (H, Li,...)

# Acuerdos sobre SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA y vías de DESARROLLO SOSTENIDO

## Importancia de la tecnología

### Como priorizar los recursos de I + D disponibles

- **Renovables:** no siempre es imprescindible una "revolución" científica para hacer de ellas un ciclo de negocio
- **Fusión Nuclear:** necesidades presupuestarias muy altas, en un campo que contiene muchas más posibilidades que las investigadas hasta la fecha

### VIAS de Desarrollo Sostenido

- Descarbonación de HC, y captura y secuestro del  $CO_2$ , para un escenario transitorio pero revolucionario
- Despliegue de la economía del hidrógeno, a partir de hidrocarburos en primera fase, y de renovables y fusión en la definitiva
- Fisión Nuclear: Necesidad de nuevos reactores  
Reducción drástica de la radiotoxicidad de los residuos