



# ***“Carbón Limpio”: ¿una energía sustentable?***

**Julio Vergara Aimone**

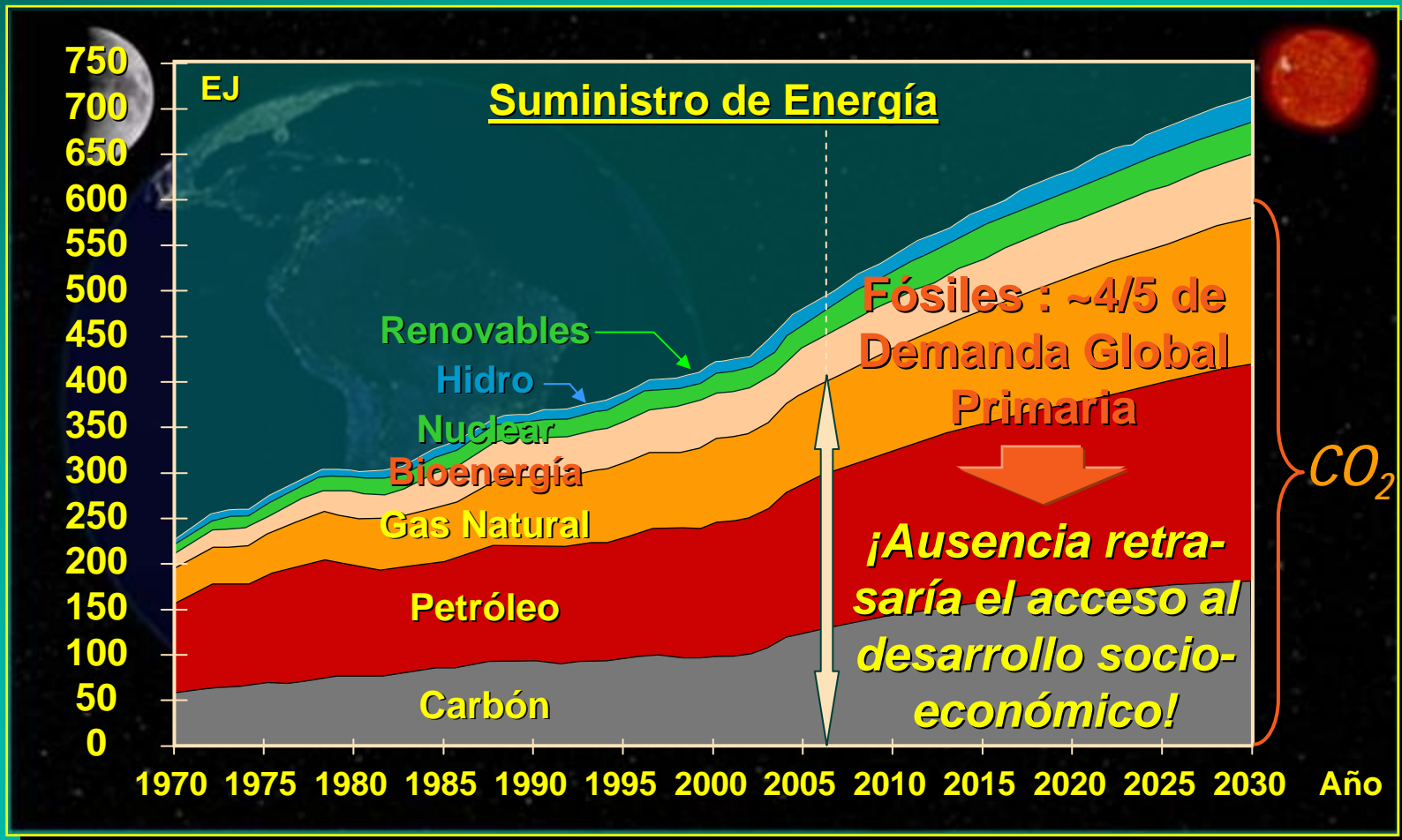
***Santiago, 21 de Agosto del 2007***



# Mercados



La utilización de energía seguirá creciendo





# Mercados



## ¿Podemos eliminar los combustibles fósiles?

La realidad dice otra cosa:

- Petróleo y GN seguirán siendo combustibles **flexibles** (55% de demanda) por ~40-60 años.
- Los petróleos **sedimentarios** (EUA, Europa África) y **alquitranes** de Canadá y Venezuela esperan ser extraídos (grandes reservas).
- Los precios se toleran con baja elasticidad.
- Los **sistemas logísticos** (refinerías, buques, centrales, etc.) toman décadas en adaptarse.



# Mercados



## ¿Podemos eliminar los combustibles fósiles?

La realidad dice otra cosa (cont):

- El carbón tiene una **autonomía** de siglos y podría –por si sólo– satisfacer la demanda primaria del presente siglo.
- Varios países son dependientes del carbón (EUA, Australia, Sudáfrica, Alemania, China, India, Polonia,...).
- **China** construye decenas de GW a carbón (“6 SIC chilenos” al año) y con desafíos de fiscalización.



# Mercados



## El carbón puede proveer combustibles flexibles

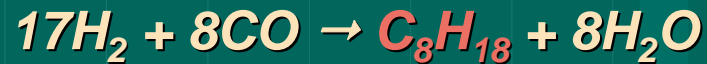
Autonomía

Milenios

Siglos

Décadas

### Fisher-Tropsch



### Gasificación C



Solar

Eólico

Olas/Mareas

Hídrico

Geotermia

Biomasa

Carbón

Gas Natural

Petróleo

Uranio

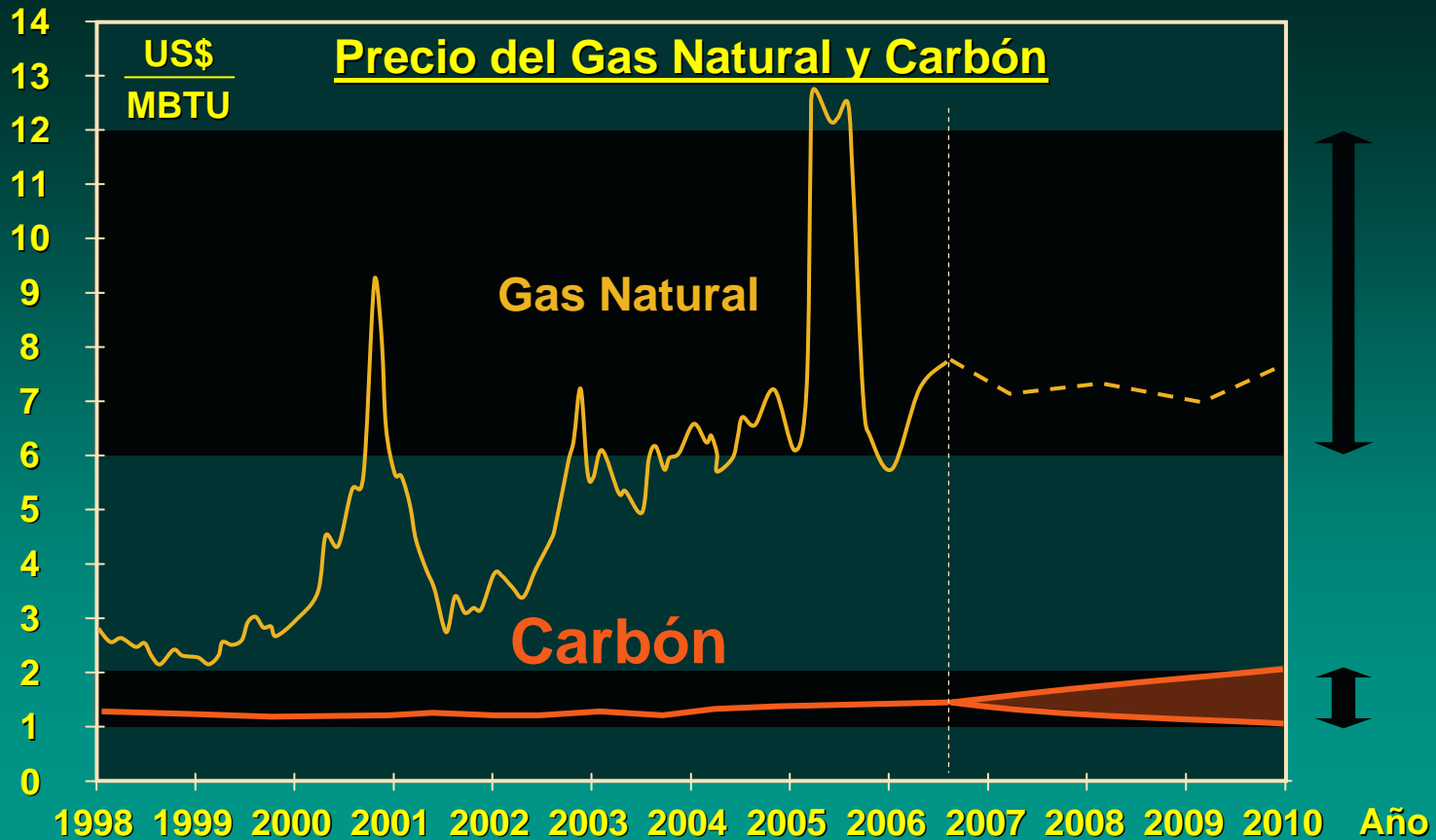
Deuterio/Tritio



# Mercados



Con carbón barato, abundante y ubicuo

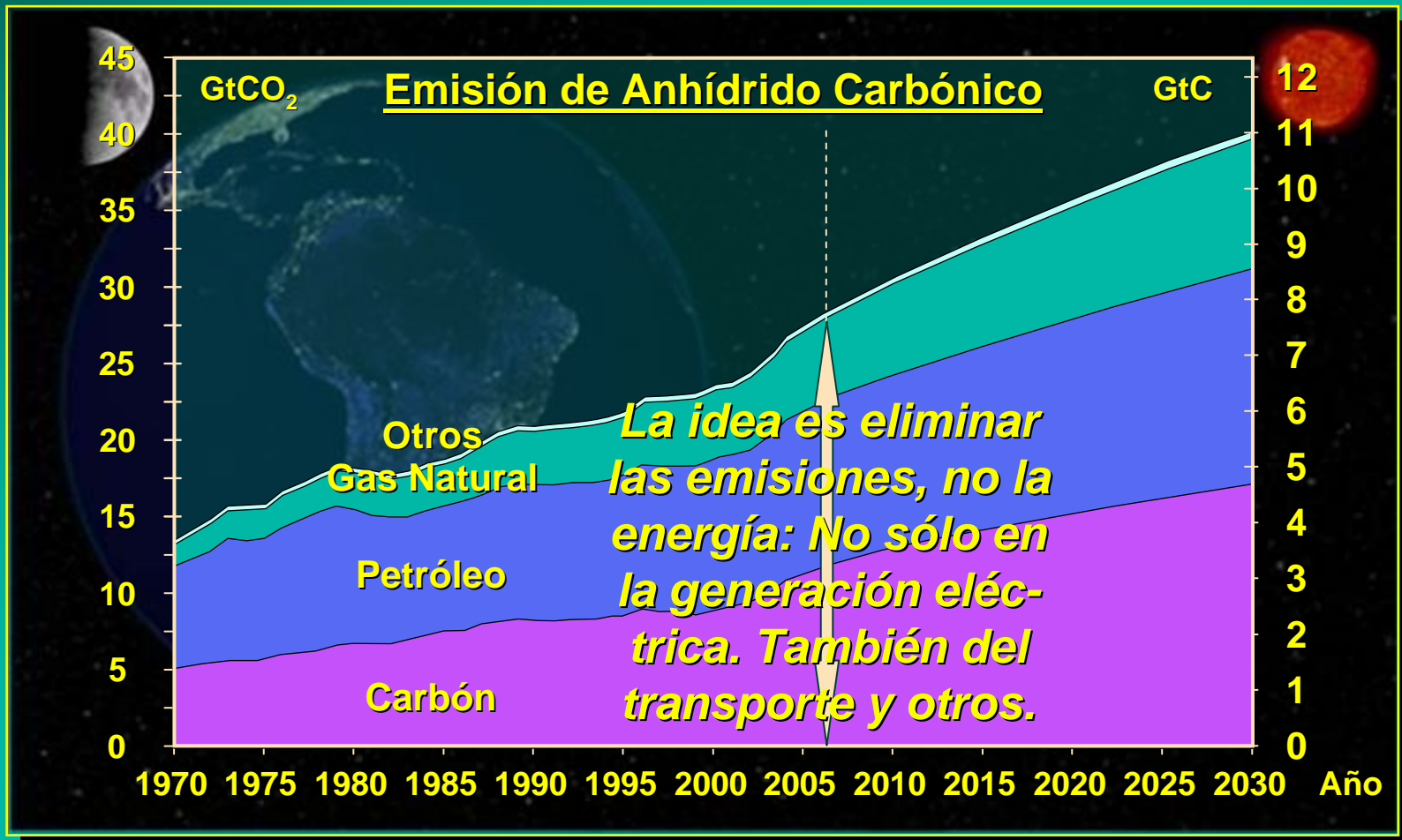




# Mercados



## Crecientes emisiones por el consumo de energía

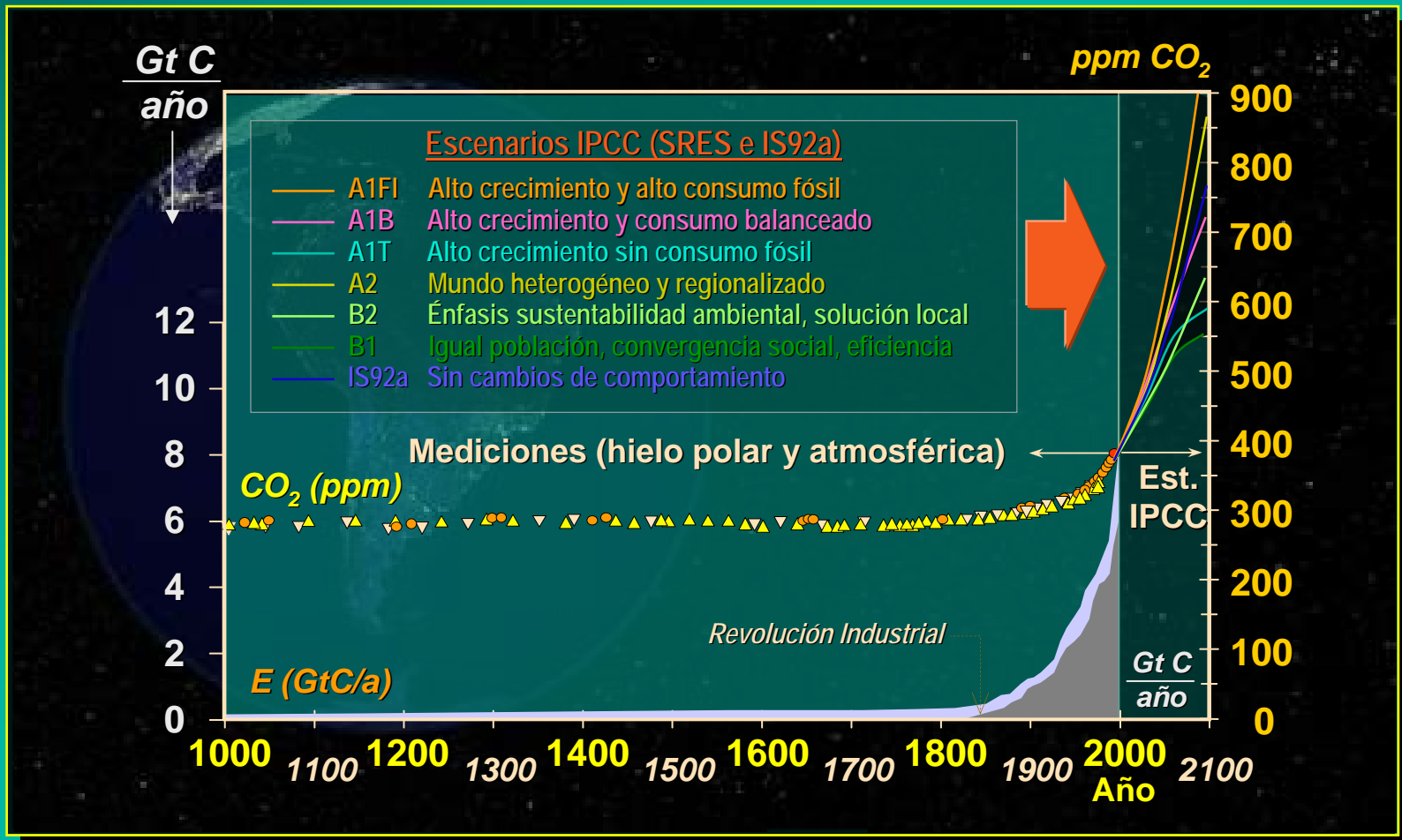




# Mercados



Si no, aumentará más aún el CO<sub>2</sub> atmosférico





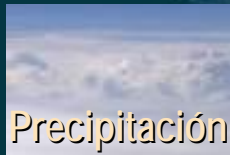
# Mercados



## Evidencia creciente de cambio climático

1er orden ● ← → ● 2° orden

**CAMBIO CLIMÁTICO**

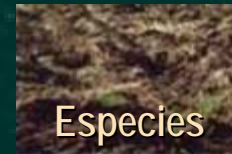
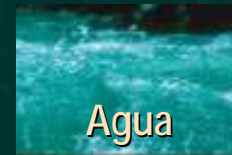


~ conocidos



*Mortalidad  
Infecciones  
Calidad aire  
Rendimiento  
Irrigación  
Calidad agua  
Composición  
Productividad  
Disponibilidad  
Erosión  
Desplazamiento  
Pérdidas*

~ desconocidos





# Tecnologías



## Tres grandes medidas para plantas de carbón

Regular industria local y pulir procesos:

- **Mejor carbón, lavar, desulfurar, atrapar PM, NOx, cenizas y gases tóxicos.**

Mejorar eficiencia térmica (“en el tubo”):

- **Elevar la eficiencia térmica de la planta (más kW / kg<sub>F</sub> ~temperatura, diseño,...).**

Mejorar eficiencia másica (“al final del tubo”):

- **Capturar CO<sub>2</sub> antes de ser emitidos a la atmósfera (CSC).**

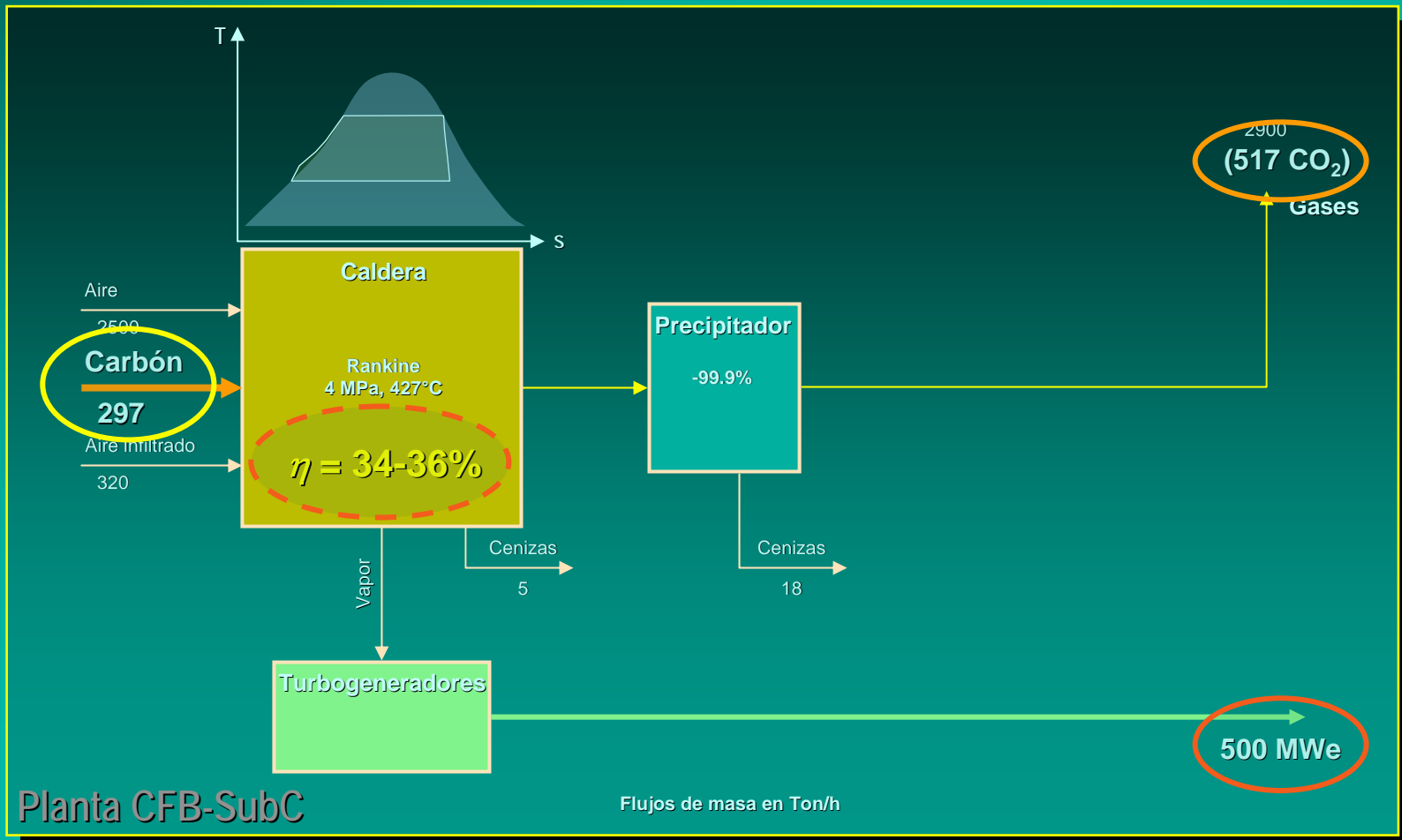




# Tecnologías



## Diagrama de una central de lecho fluidizado

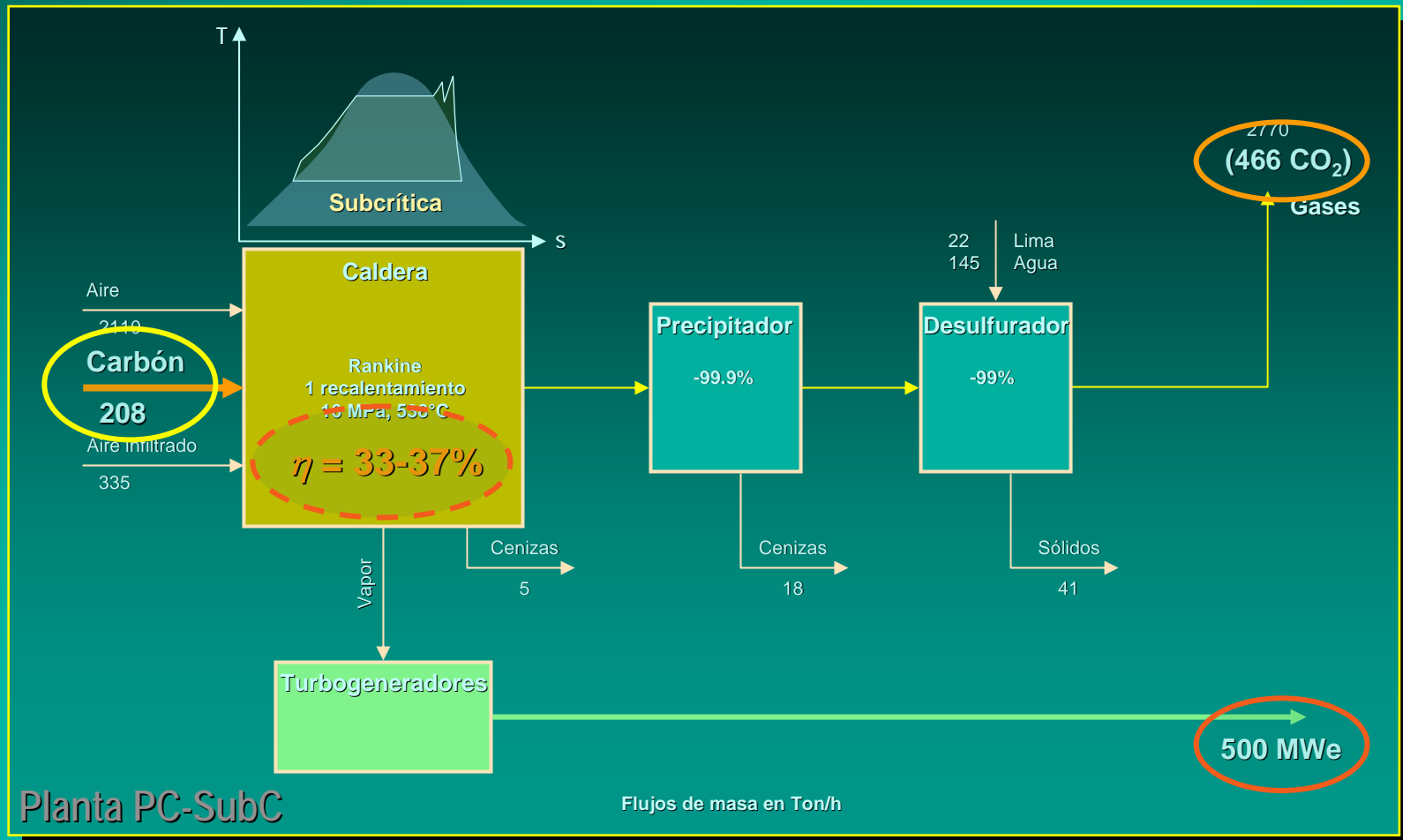




# Tecnologías



## Diagrama de central de carbón pulverizado

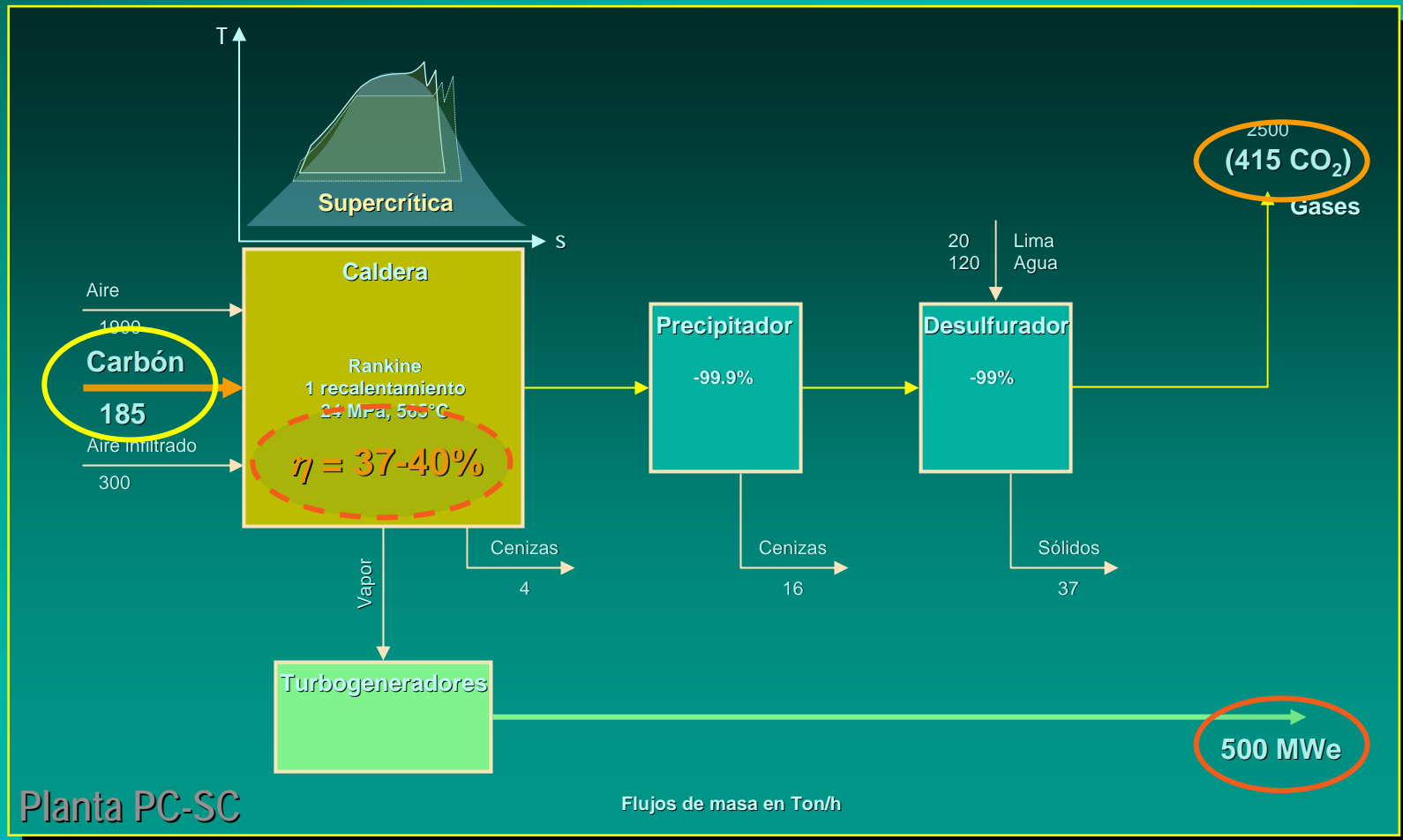




# Tecnologías



## Diagrama de central SC de carbón pulverizado

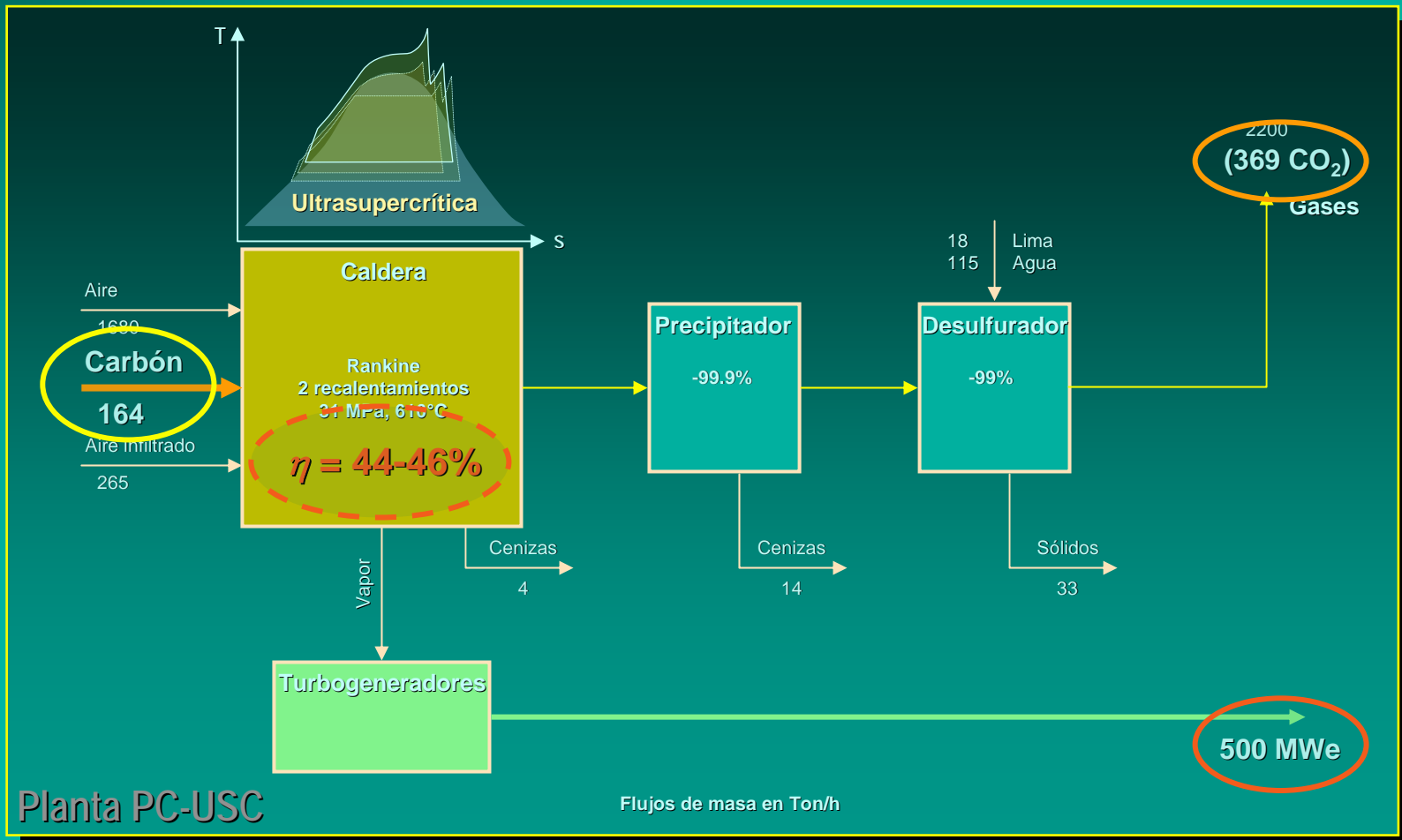




# Tecnologías



## Diagrama de central USC de carbón pulverizado

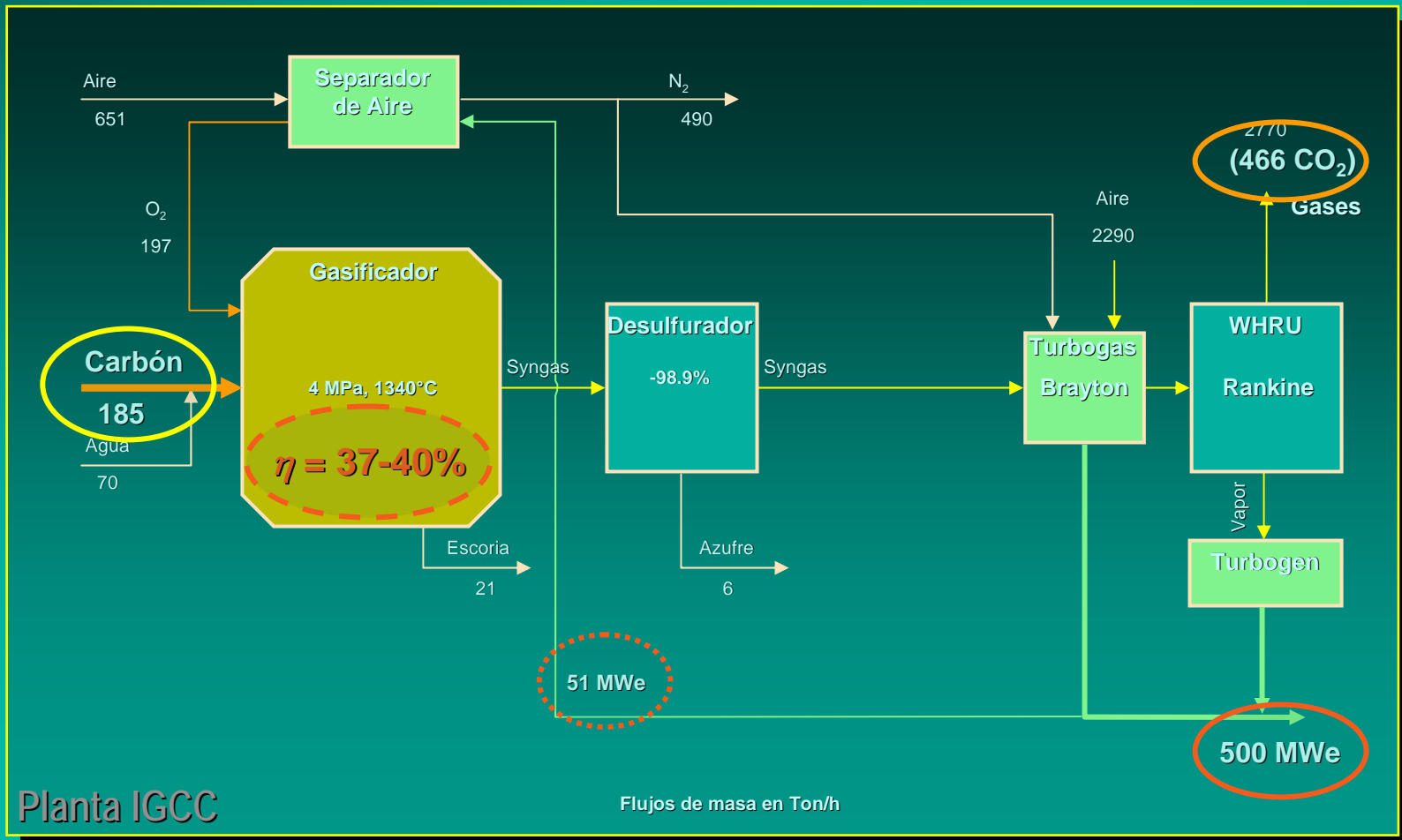




# Tecnologías



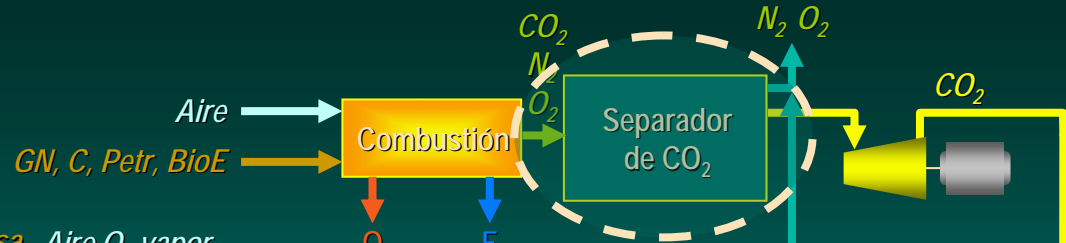
## Diagrama de una central IGCC



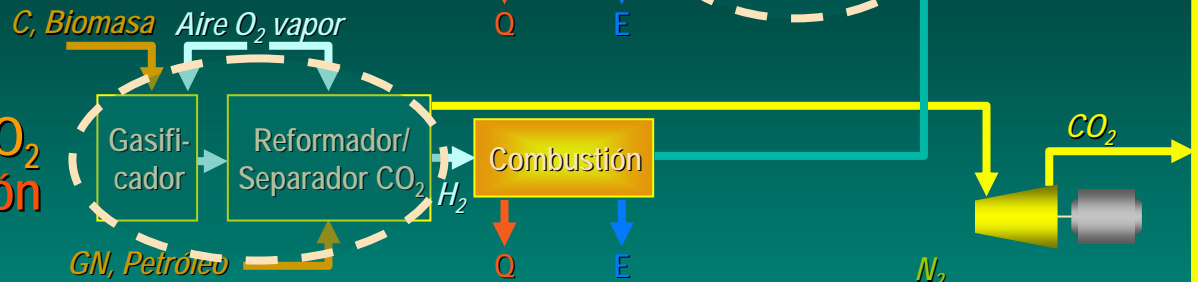


## Tres grandes opciones de captura de CO<sub>2</sub>

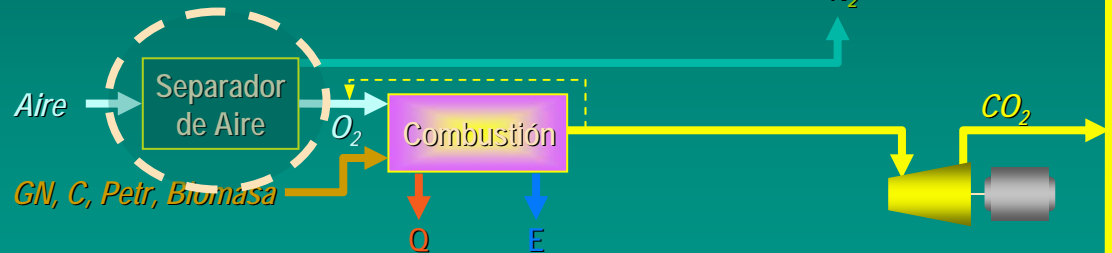
### Separación CO<sub>2</sub> post-combustión



### Separación CO<sub>2</sub> pre-combustión



### Separación O<sub>2</sub> pre-combustión



Partes críticas de cada opción

Separación y captura de CO<sub>2</sub>

A secuestro de CO<sub>2</sub>



# Tecnologías



## Separación post-combustión

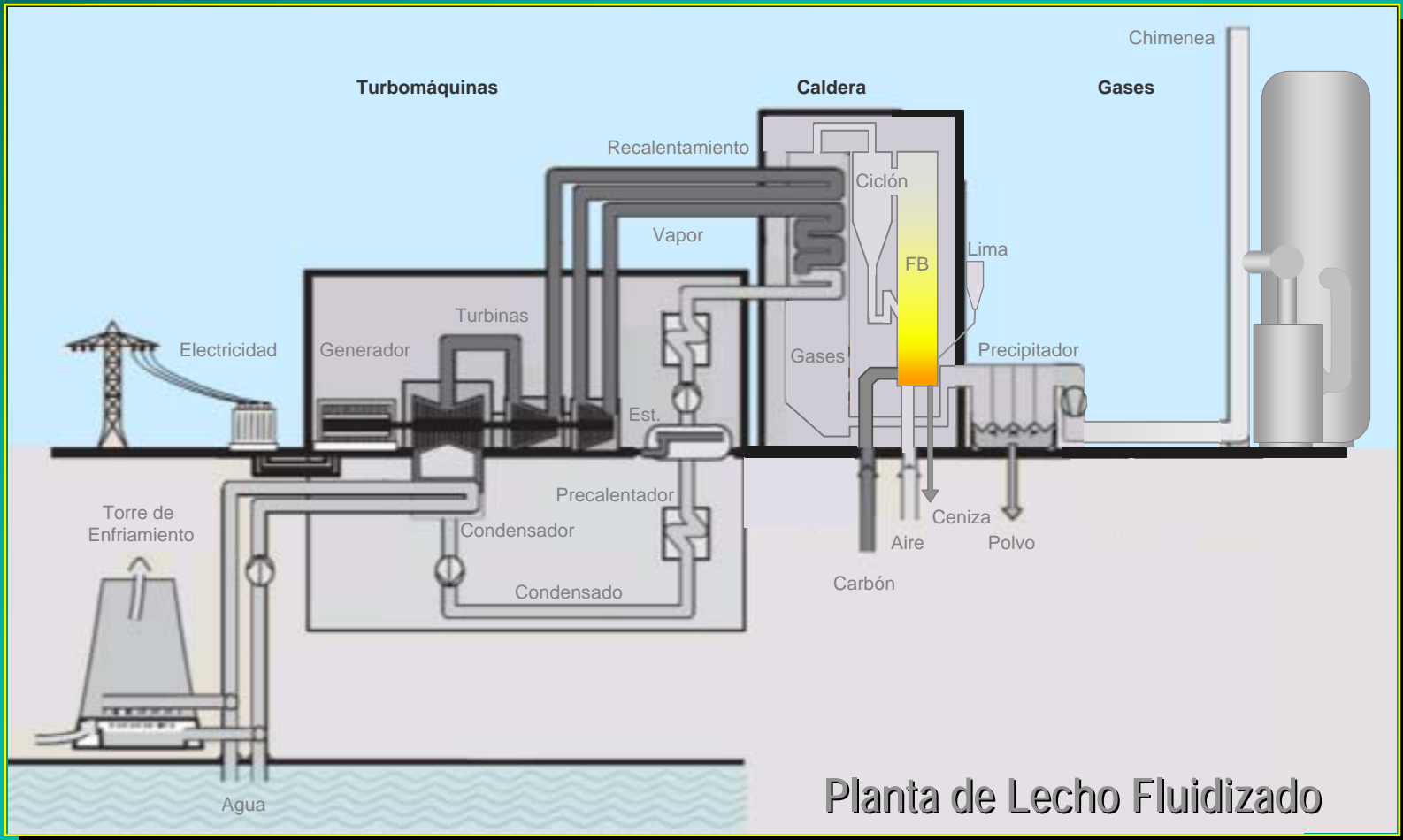
### Tecnologías:

- Uso de membranas
- Absorción física
- Procesos criogénicos
- TSA/PSA
- Procesos biológicos
- Absorción química
- Solventes
- Redes organometálicas





## Esquema de planta de CLF con captura de CO<sub>2</sub>

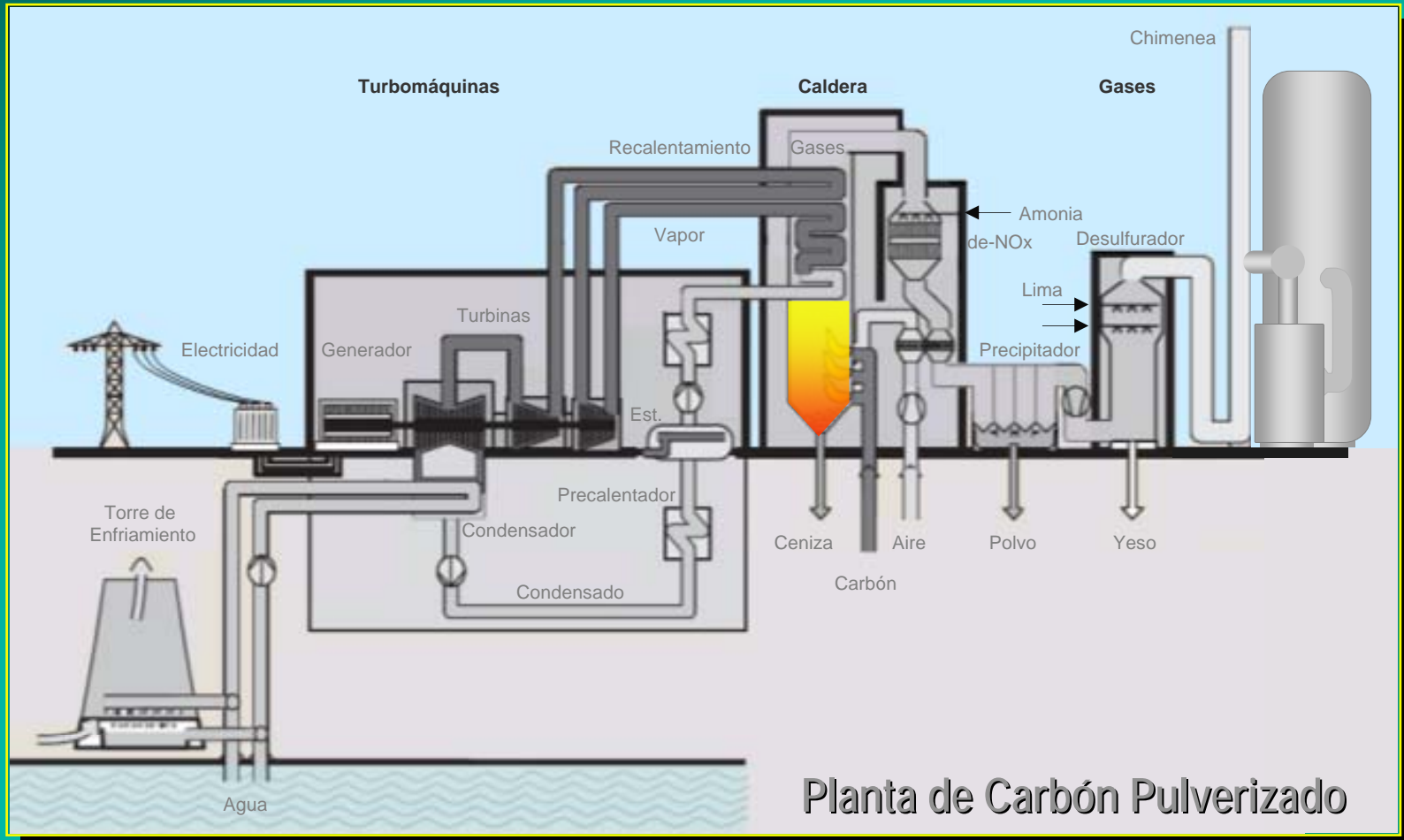




# Tecnologías

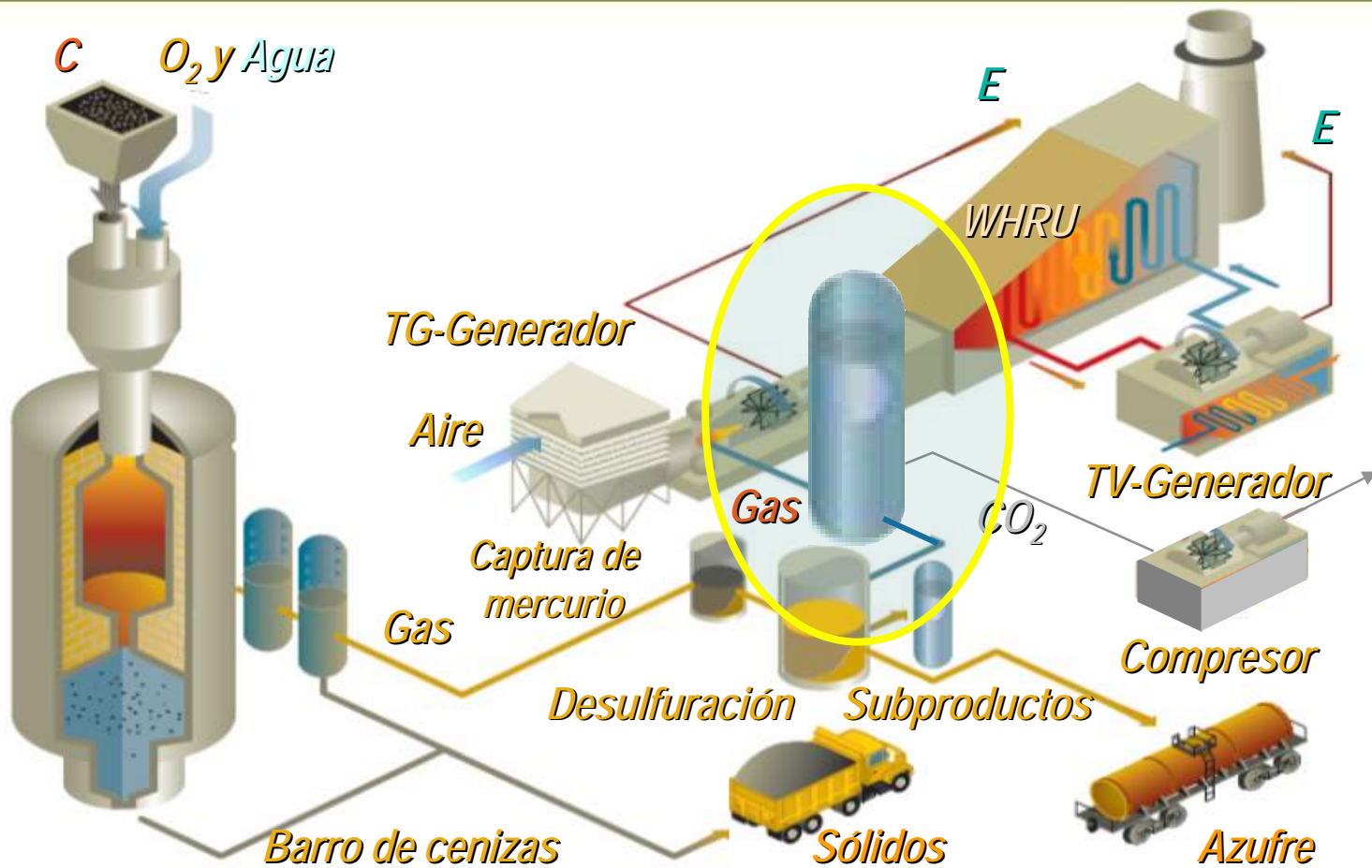


## Esquema de planta de CP con captura de CO<sub>2</sub>





## Esquema de planta IGCC con captura de CO<sub>2</sub>

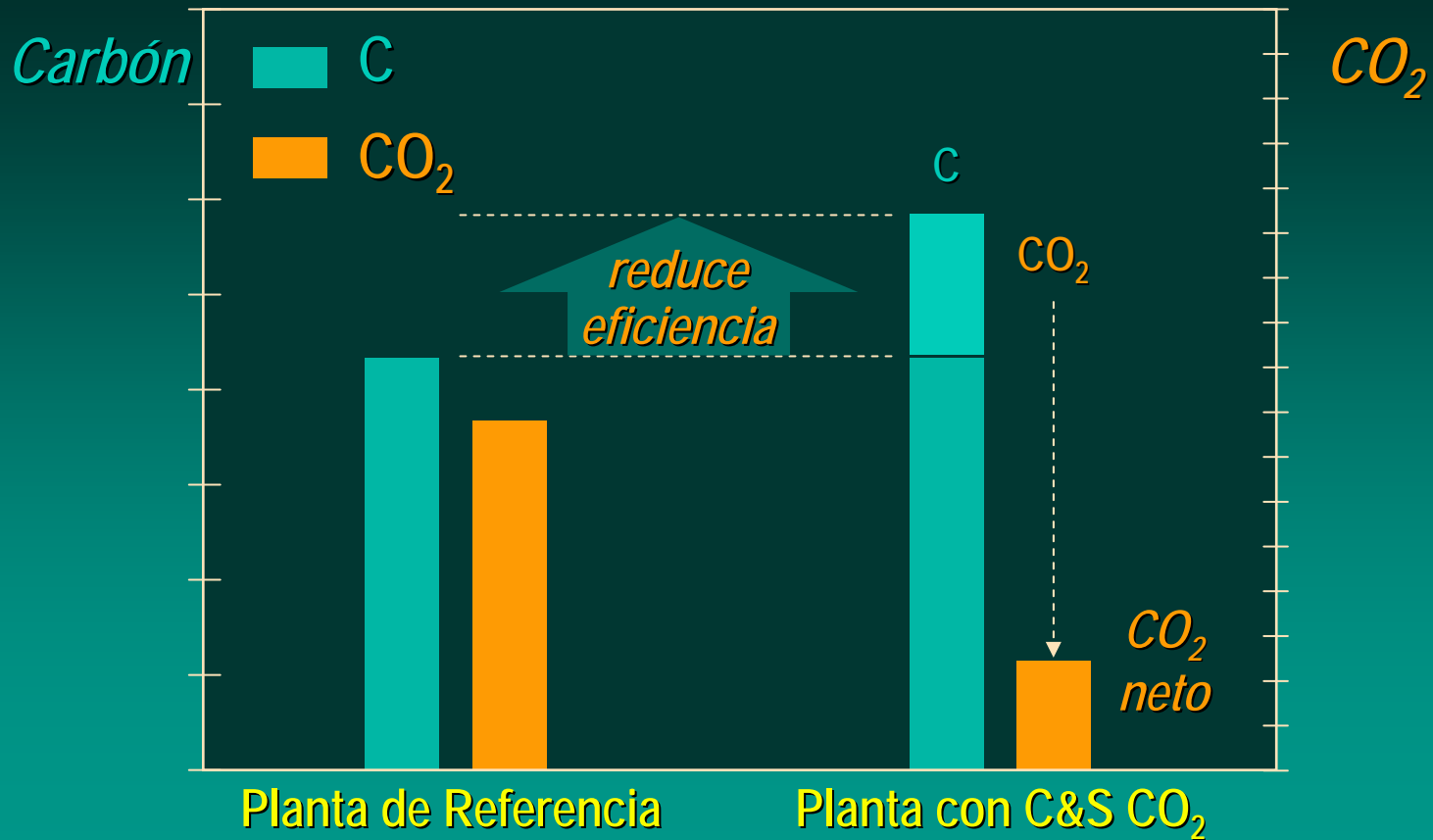




# Tecnologías



## Reducción de CO<sub>2</sub> y de eficiencia





# Tecnologías



## Costo de captura de CO<sub>2</sub> y consumo de energía

	CFB SubC		CP SubC		CP SC		CP USC		IGCC		CP O <sub>2</sub>
	s/CSC	c/CSC	s/CSC	c/CSC	s/CSC	c/CSC	s/CSC	c/CSC	s/CSC	c/CSC	c/CSC
<b>Rendimiento</b>											
Flujo Q (kJ/kWh)	9810	13400	9950	13600	8870	11700	7880	10000	8890	10940	11150
Eficiencia	34.8%	25.5%	34.3%	25.1%	38.5%	29.3%	43.3%	34.1%	38.4%	31.2%	30.6%
Carbón	297	409	208	284	185	243	164	209	185	228	233
CO <sub>2</sub> prod. (ton/h)	517	569	466	637	415	546	369	469	415	510	530
CO <sub>2</sub> emitido (ton/h)	517	71	466	64	415	55	369	46	415	51	52
CO <sub>2</sub> emit. (g/kWh)	1030	94	931	128	830	109	738	94	832	102	104
<b>Costos</b>											
Planta (\$/kW)	1330	2270	1280	2230	1330	2140	1360	2090	1430	1890	1900
Inversión (¢/kWh)	2.70	4.60	2.60	4.52	2.70	4.34	2.76	4.24	2.90	3.83	3.85
O&M (¢/kWh)	0.98	1.34	1.49	2.04	1.33	1.75	1.18	1.50	1.33	1.64	1.67
Comb. (¢/kWh)	1.00	1.85	0.75	1.60	0.75	1.60	0.75	1.60	0.90	1.05	1.45
COE (¢/kWh)	4.68	7.79	4.84	8.16	4.78	7.69	4.69	7.34	5.13	6.52	6.97



# Limitaciones



## Secuestro de CO<sub>2</sub>

Con tecnologías se puede **capturar un 80-90% del CO<sub>2</sub>**, con menos eficiencia, **mayor costo** de planta y **más carbón**.

Lo anterior se justifica para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, cumplir protocolos internacionales y **cuidar el ambiente**.

El problema principal de esta medida es qué hacer con el **carbono capturado**.



# Limitaciones



## Requisitos para el secuestro eficaz de CO<sub>2</sub>

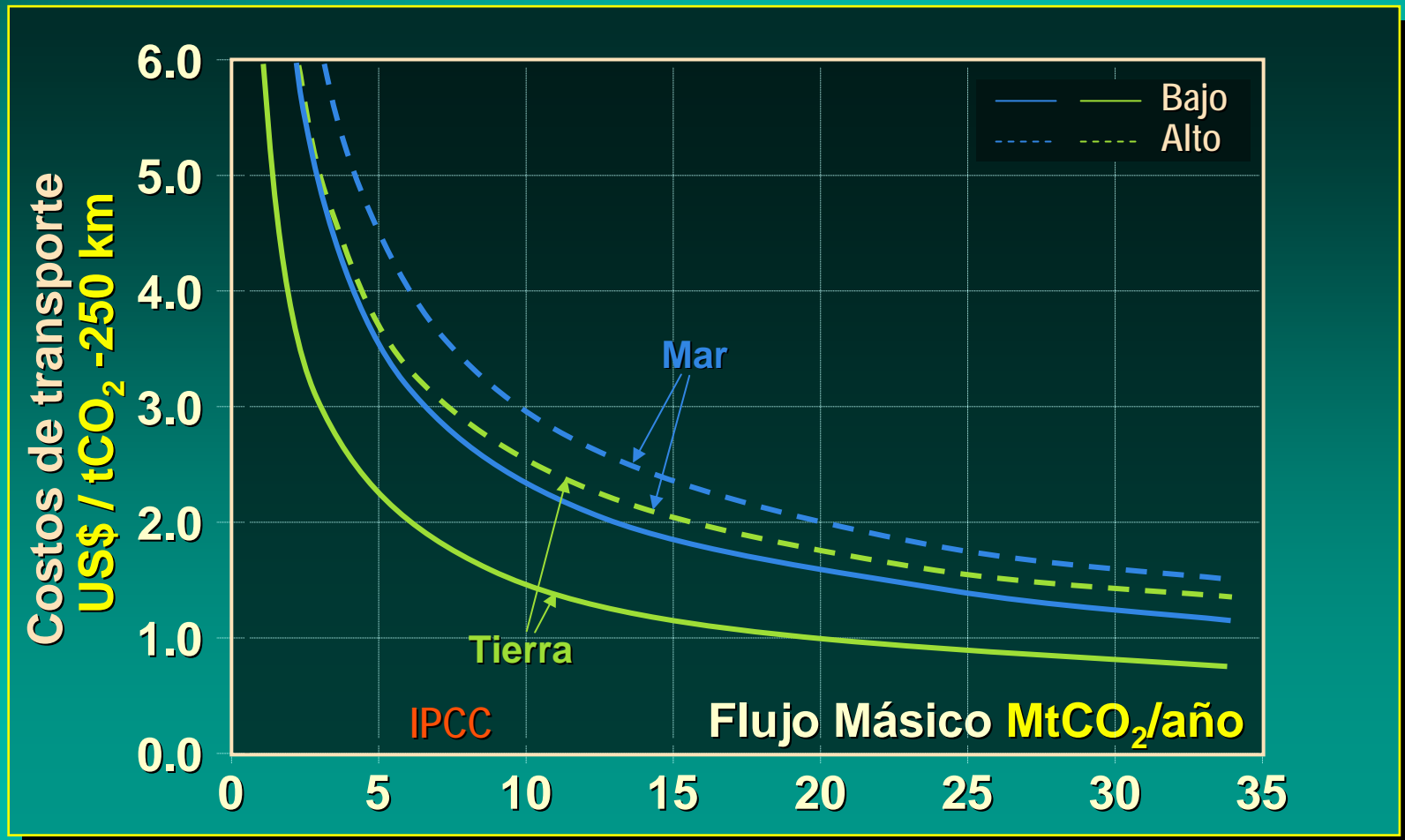
- **Sitios:** sitios caracterizados, estancos y socialmente aceptados.
- **Regulaciones:** políticas y normas técnicas para regular el proceso.
- **Monitoreo:** instrumentos de vigilancia de estanqueidad del sitio, y
- **Transporte:** ductos o buques para llevar el gas capturado al sitio.



# Limitaciones



## Costo de Transporte de CO<sub>2</sub>

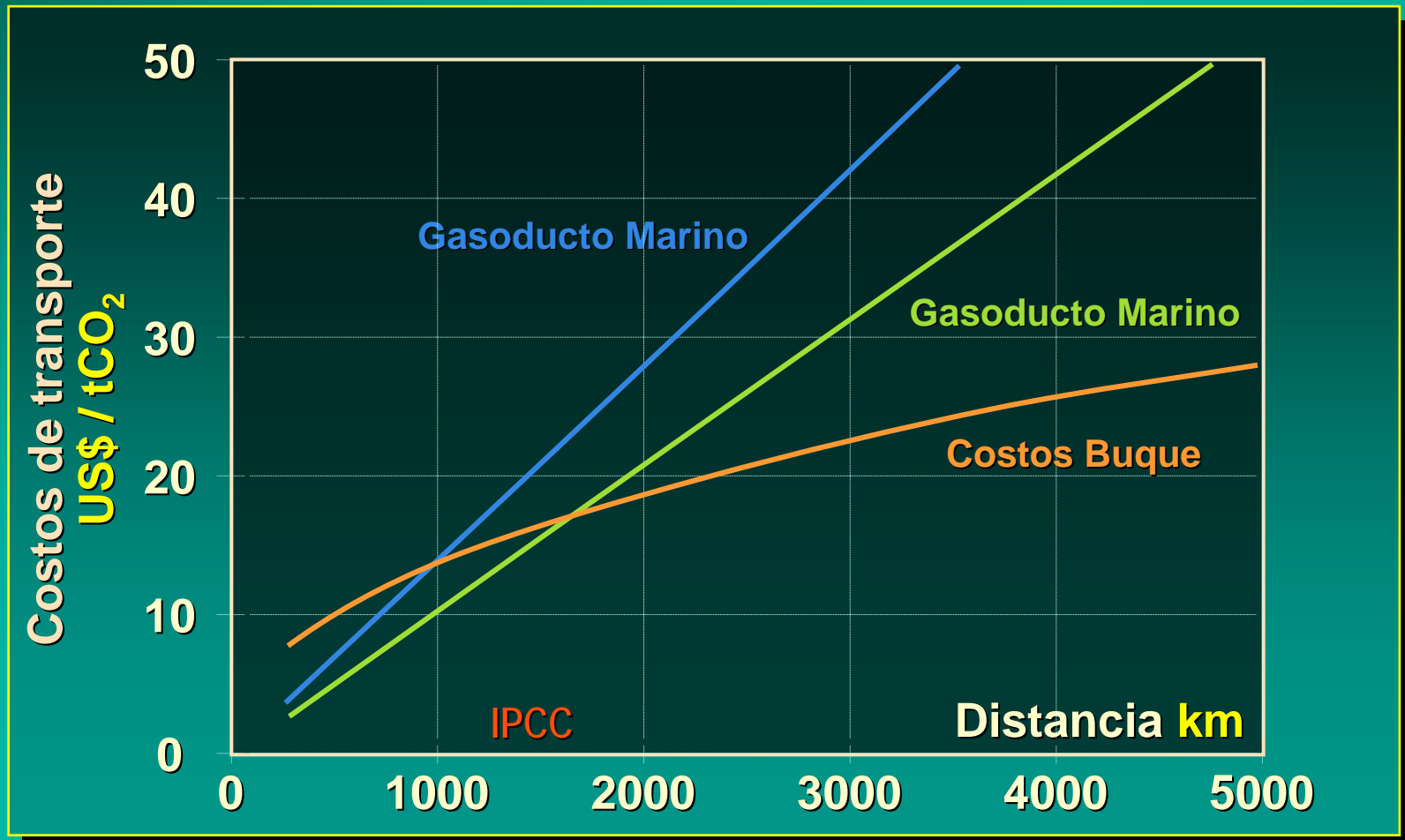




# Limitaciones

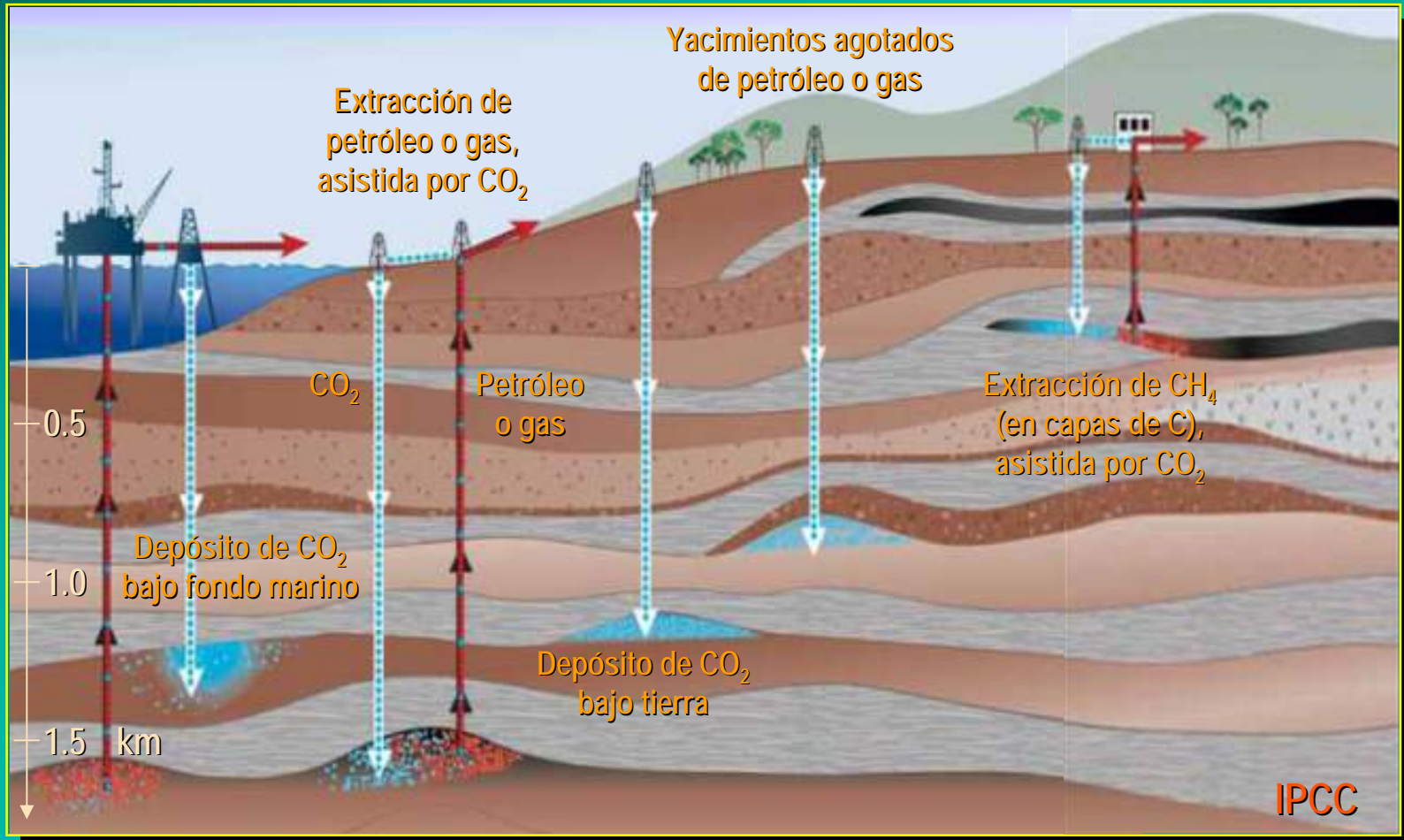


## Costo de Transporte de CO<sub>2</sub>





## Alternativas de almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>

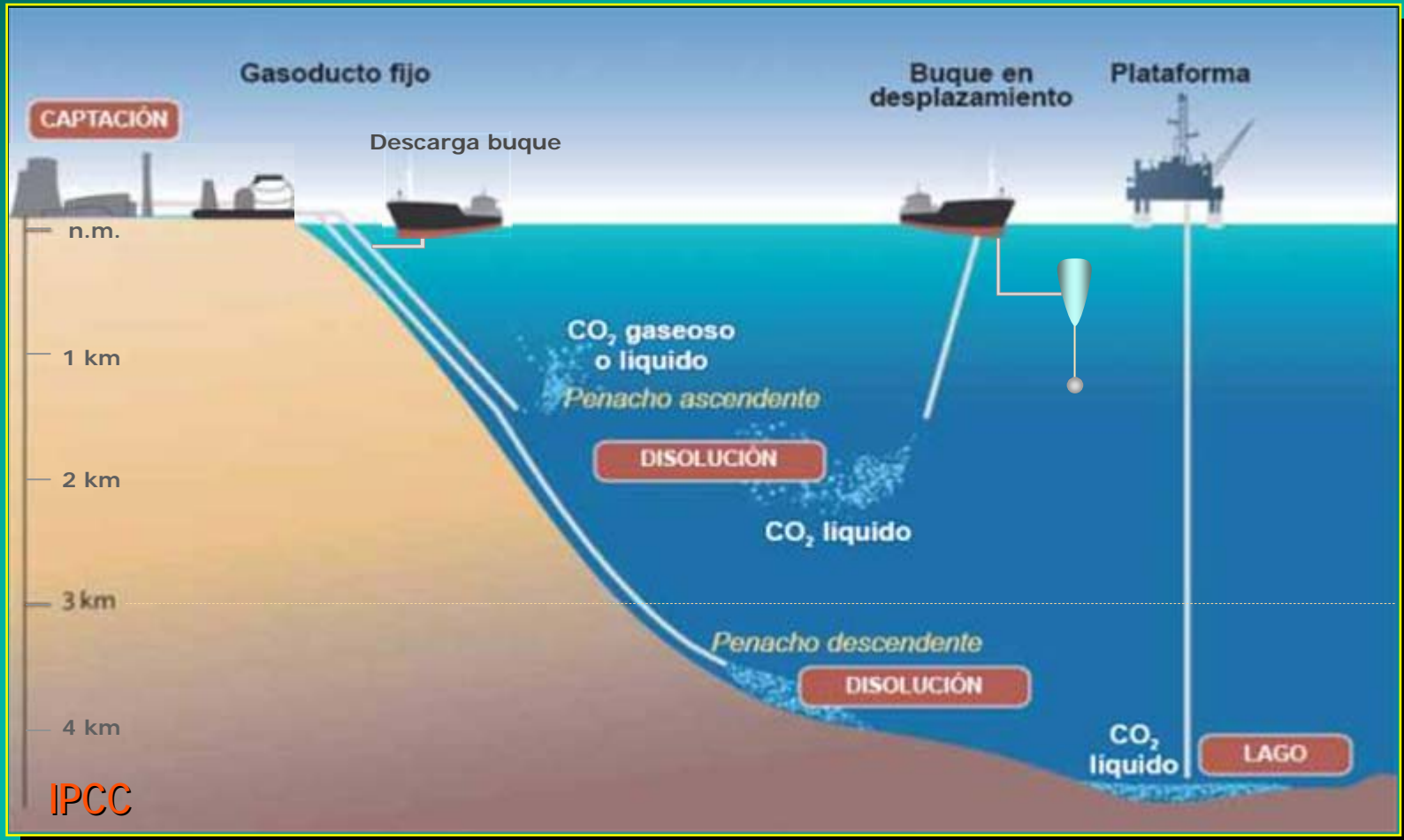




# Limitaciones



## Alternativas de almacenamiento oceánico de CO<sub>2</sub>





## Algunos proyectos de secuestro de carbono

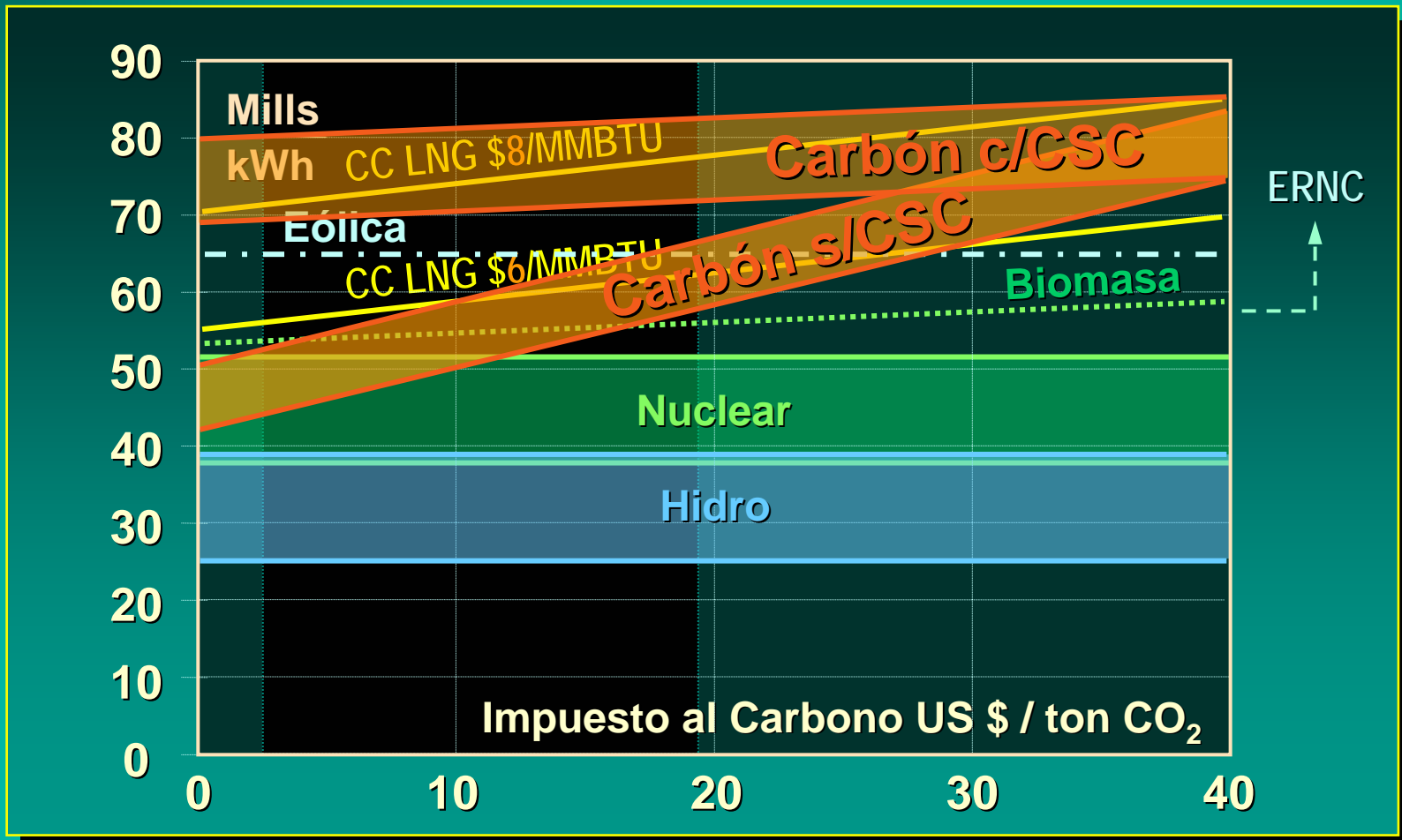




# Conclusiones



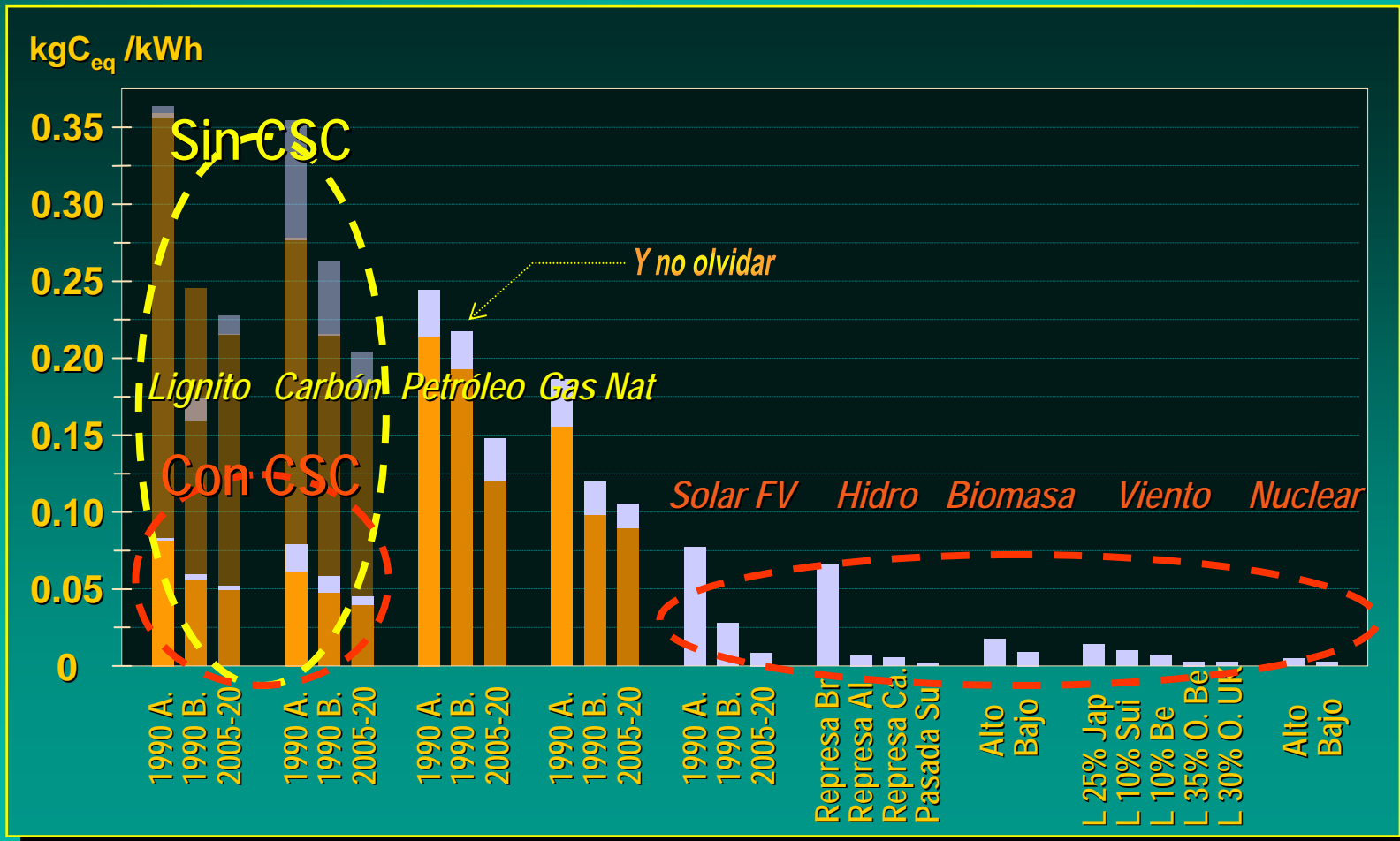
Alto costo que se evitará si no hay obligaciones



# Conclusiones



## Las mayores emisiones provienen del carbón





# Conclusiones



¿Es el carbón una forma de energía sustentable?

**Energías Sustentables:** formas que responden al concepto de **Desarrollo Sustentable:**



- *Uso de recursos energéticos naturales de mayor autonomía.*
- *Mínimo impacto ambiental en todo el ciclo de vida.*
- *Costos viables y máxima cobertura para la sociedad, con tecnologías adecuadas.*



# Conclusiones



¿Es el carbón una forma de energía sustentable?

**Energías Sustentables:** formas que responden al concepto de **Desarrollo Sustentable:**



- **Carbón:** disponible por varios siglos y posible sustituto de otros fósiles.
- **Carbón:** impactos disminuyen en un 90% con dispositivos de CSC.
- **Carbón:** costos de inversión y operación aumentan considerablemente.

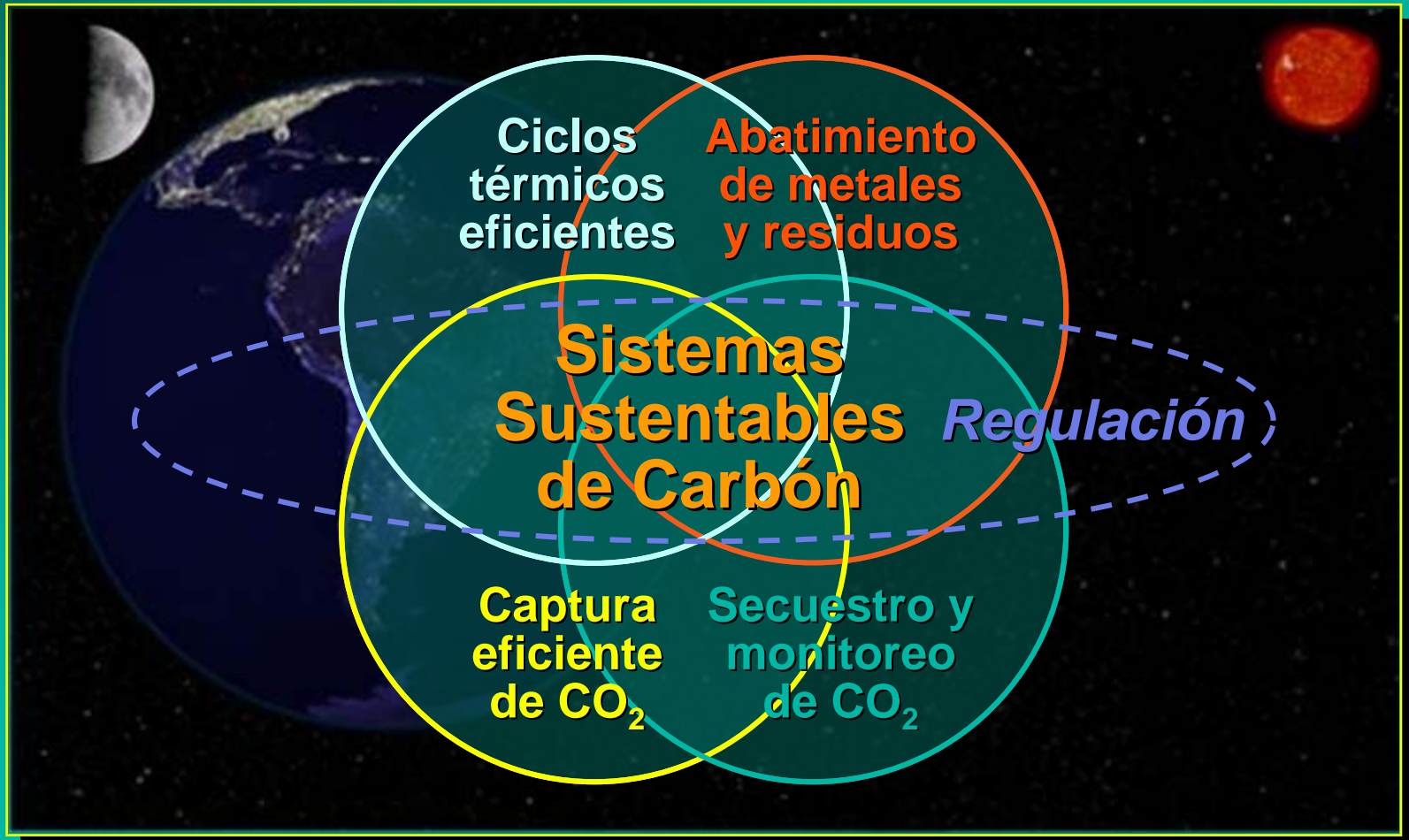




# Conclusiones



## Requerimientos para las tecnologías de carbón



## **Expositor: Julio Vergara Aimone**

**PhD, Nuclear Materials Engineering, MIT; MBA, U. Adolfo Ibáñez; MSc Nuclear Engineering, MIT; MSc Naval Architecture and Marine Engineering, MIT; MSc Materials Engineering, MIT; Ingeniero Naval Mecánico, APN, y Licenciado en Ciencias, APN.**

**Profesor de Energías Sustentables e Ingeniería Nuclear, PUC; Profesor de Gestión de la Innovación y la Tecnología, UDD, y Profesor de Arquitectura Naval, APN.**

**Figura en el “Who’s Who in the World” y “Who’s Who in Science and Engineering” de Marquis.**