

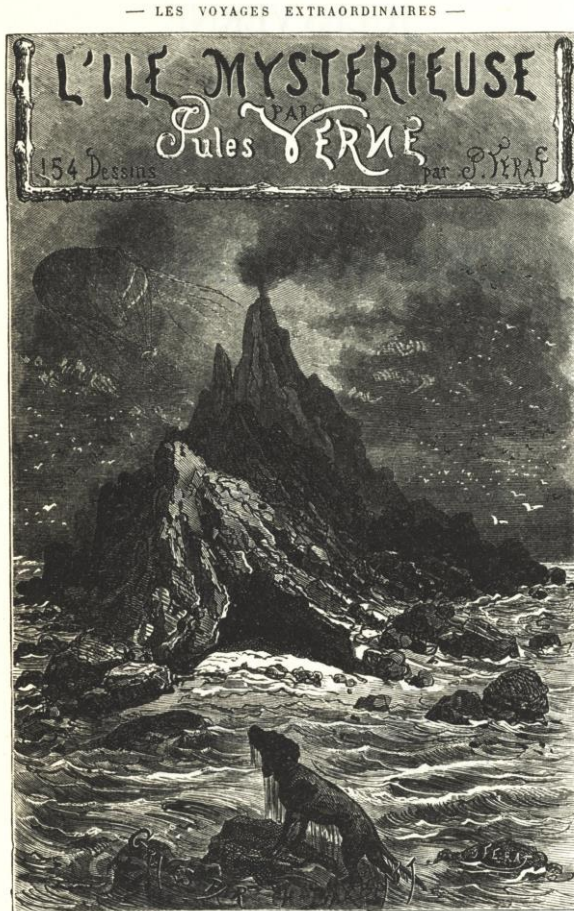
# Fotosíntesis artificial: Imitar a las plantas para cambiar nuestro modelo energético

Sixto Gimenez

[sjulia@uji.es](mailto:sjulia@uji.es)

*Universitat Jaume I  
Institute of Advanced Materials (INAM)*

- Contexto energético global
- Fotosíntesis artificial
- Estrategias de desarrollo científico y tecnológico
- El proyecto europeo A-LEAF



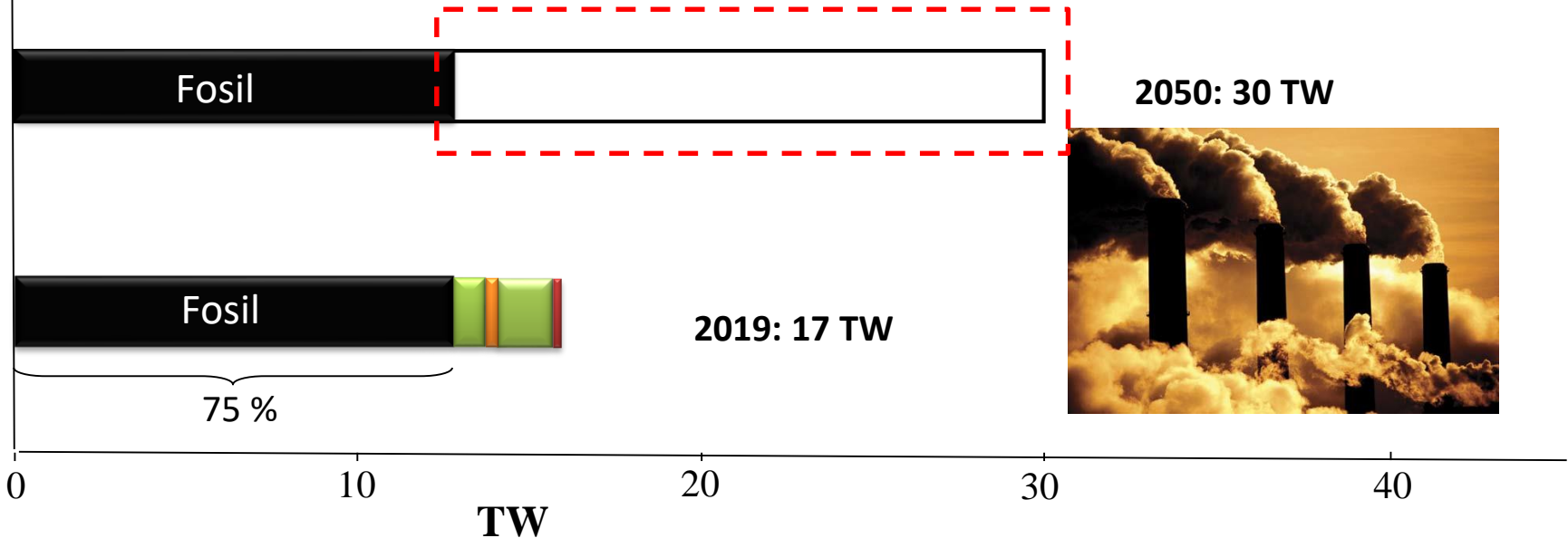
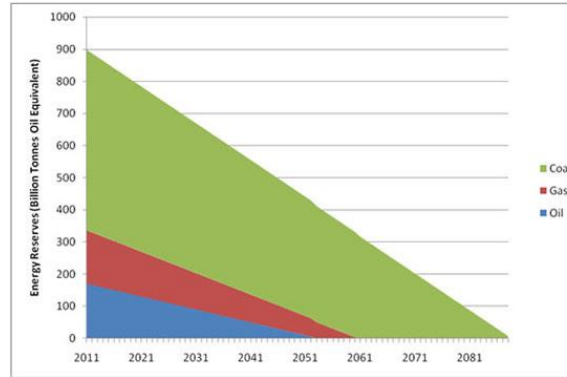
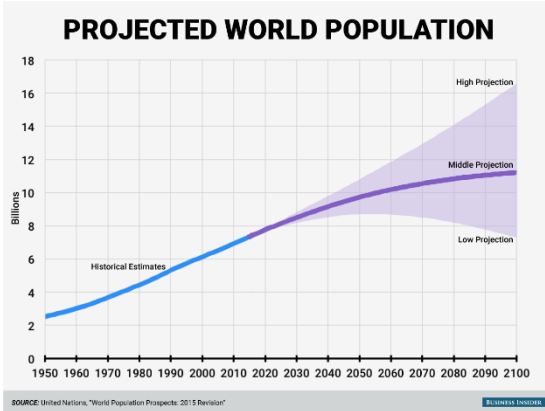
COLLECTION HETZEL

## La Isla Misteriosa, Jules Verne, 1870 2ª parte, capítulo 11

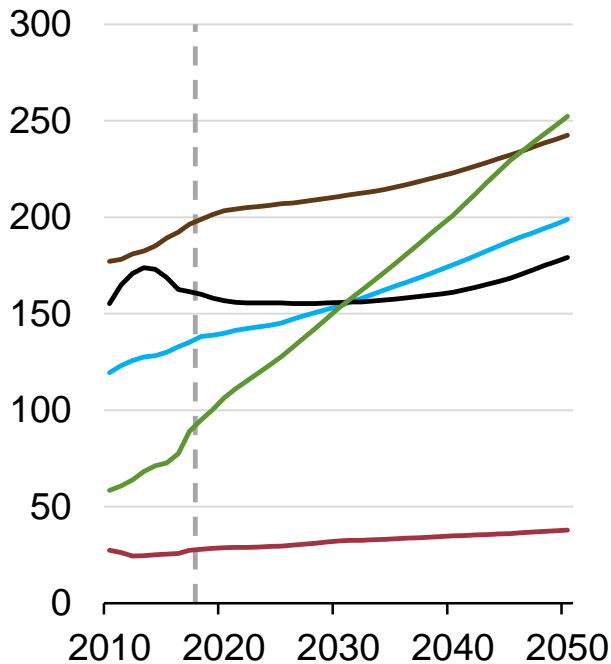
"...Con el aumento del consumo de carbón", respondió Gideon Spilett, "se puede prever que los cien mil trabajadores pronto se convertirán en doscientos mil, y que la tasa de extracción se duplicará".

"Sin duda, pero después de las minas europeas, que pronto se trabajarán más a fondo con nuevas máquinas, las minas de Estados Unidos y Australia proporcionarán durante mucho tiempo para el consumo".

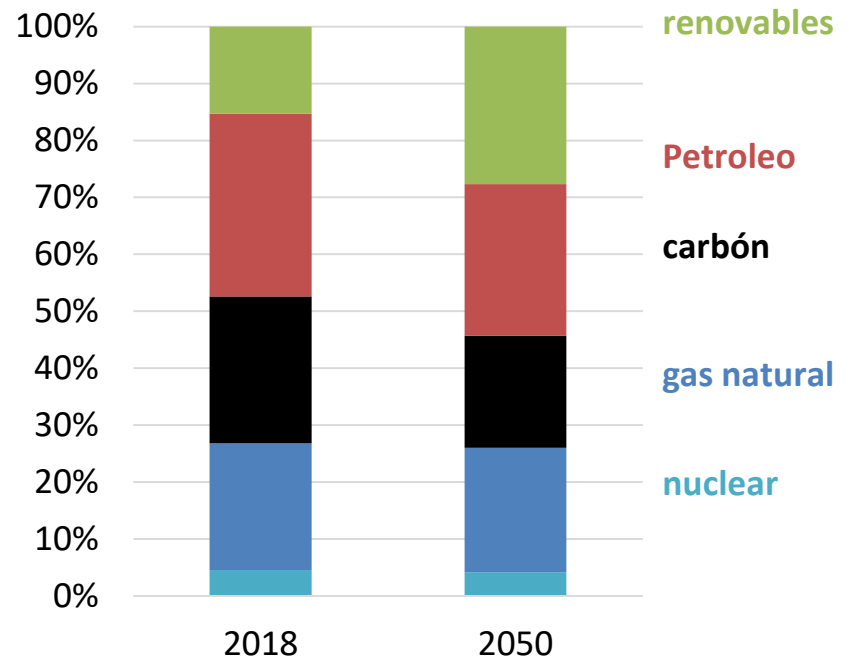
"¿Por cuánto tiempo?" preguntó el periodista. "Por al menos doscientos cincuenta o trescientos años". "¡Eso es tranquilizador para nosotros, pero es un mala noticia para nuestros bisnietos!" observó Pencroft.



**Consumo global de energía primaria por Fuente de energía**  
quadrillion British thermal units



share



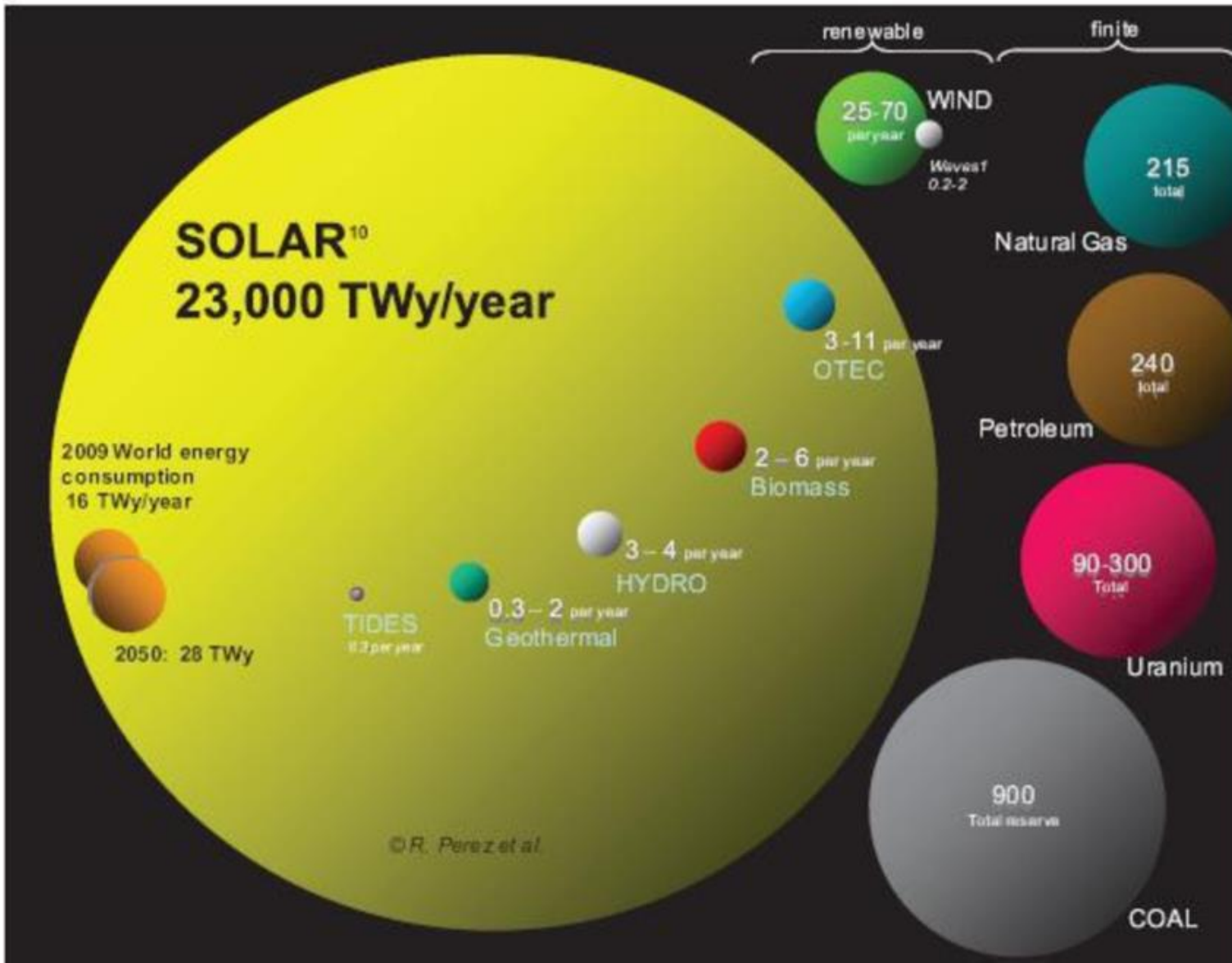
La energía renovable se convierte en la principal fuente de consumo de energía primaria para 2050.



# Combustibles fósiles e **in**sostenibilidad



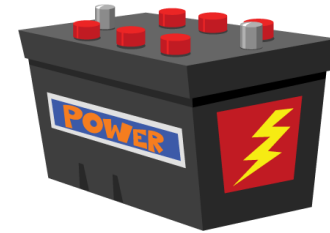
# Disponibilidad de recursos energéticos



- ✓ Limpia
- ✓ Descentralizada
- ✓ Abundante
- ✓ Gratis



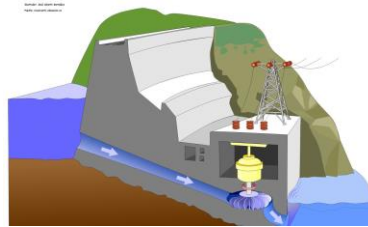
Intermitente



Baterías

CAPTURA y CONVERSIÓN

ALMACENAMIENTO



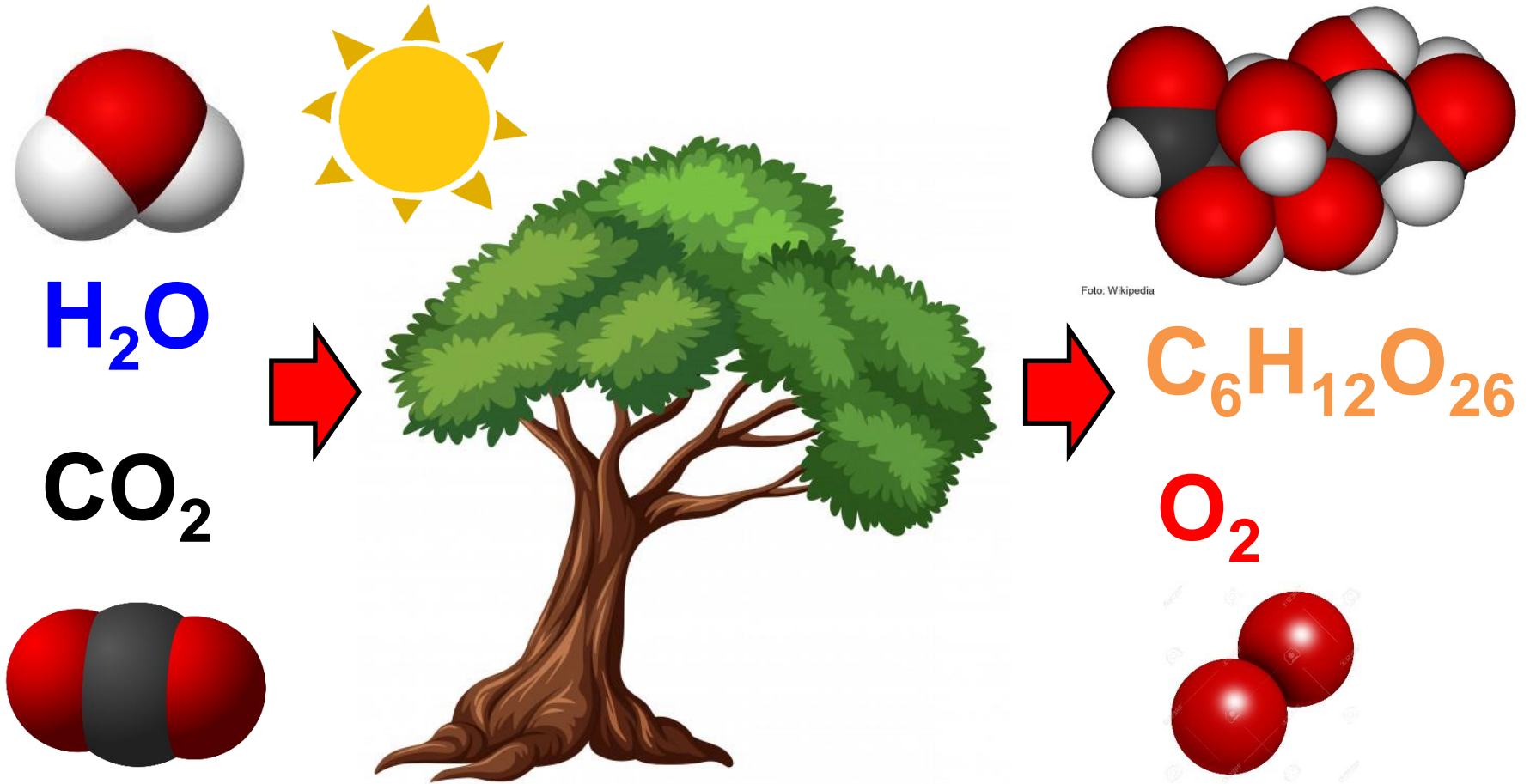
Almacenamiento mecánico

Energía solar térmica

Fotosíntesis artificial

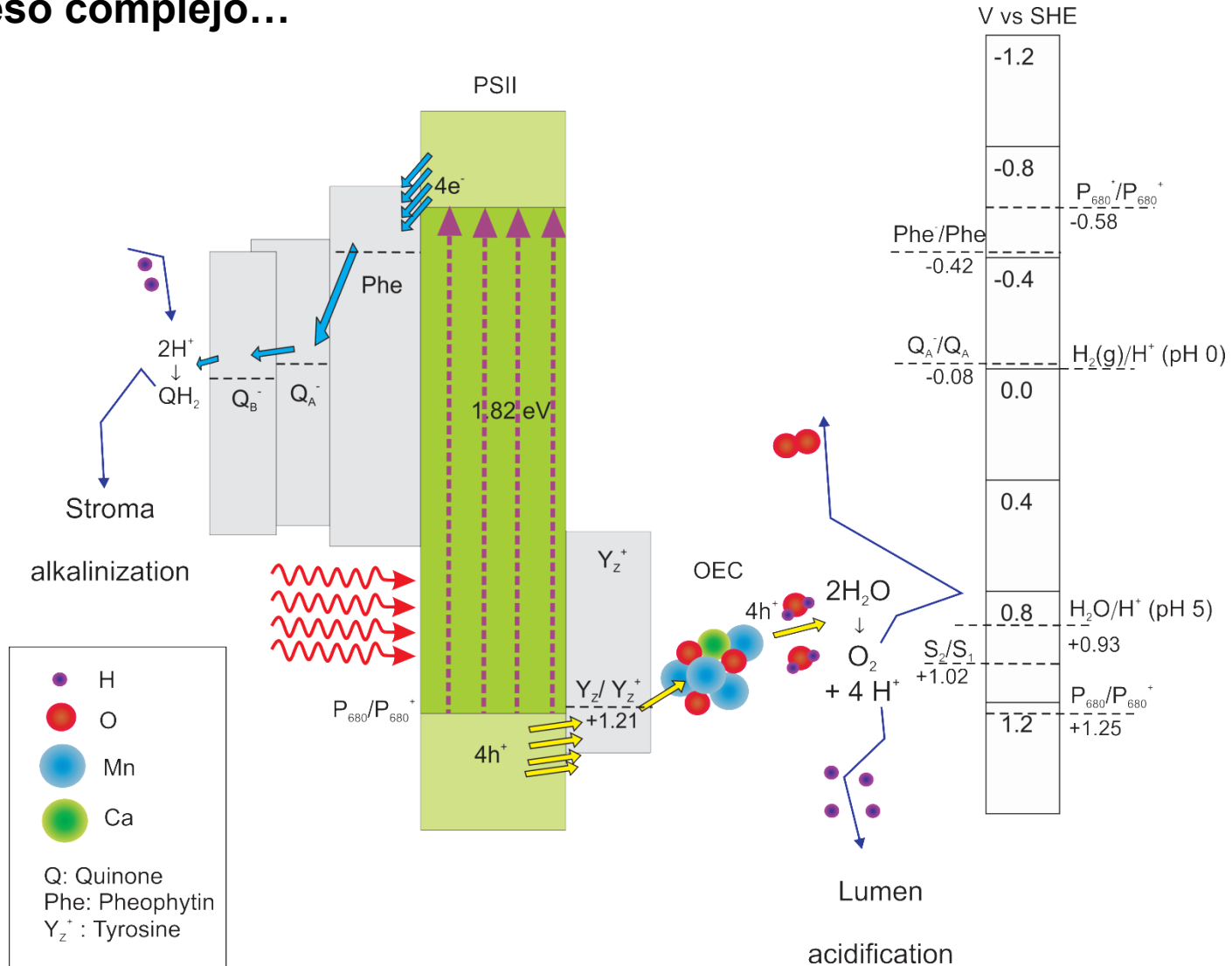
Paneles fotovoltaicos





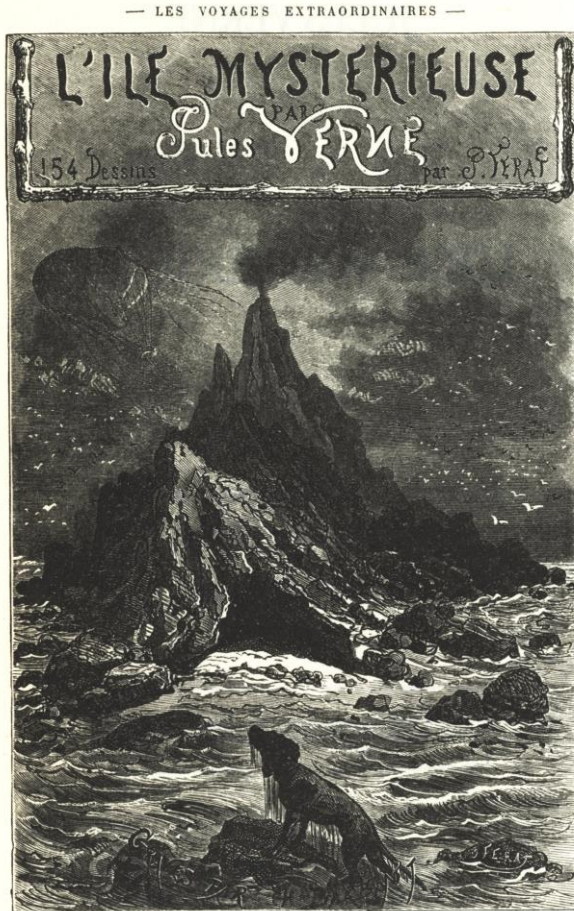
Conversión de energía solar en energía química

## Un proceso complejo...



## Algunos datos

- 8 – 10 fotones para transformar una molécula de  $\text{CO}_2$  (30% eficiencia de luz absorbida)
- Color verde = Sólo 45% del espectro solar es fotosintéticamente activo.
- La eficiencia total del proceso es de 2%.
- Si hay exceso de luz, la energía se disipa y se limita la absorción de luz.
- Daño inducido por luz irreparable: Es necesario un sistema de auto-reparación.
- ¡¡PSII se repara cada 30 minutos!!



## La Isla Misteriosa, Jules Verne, 1870 2ª parte, capítulo 11

"Descubrirán algo más", dijo Herbert.

"Es de esperar que así sea", respondió Spilett, "porque sin carbón no habría maquinaria, y sin maquinaria no habría ferrocarriles, vapores, fábricas, ¡nada de lo que es indispensable para la civilización moderna!"

"¿Pero qué encontrarán?" preguntó Pencroft. "¿Puede adivinar, capitán?"

"Casi, mi amigo".

"¿Y qué van a quemar en lugar de carbón?"

"Agua", respondió Harding.

"¡Agua!" gritó Pencroft, "¡agua como combustible para vapores y motores! ¡agua para calentar agua!"



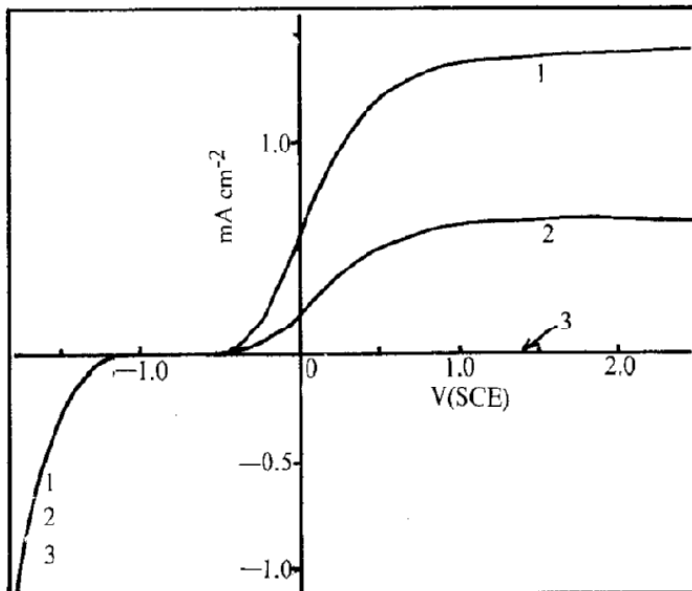
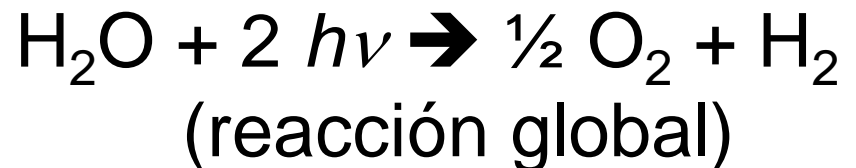
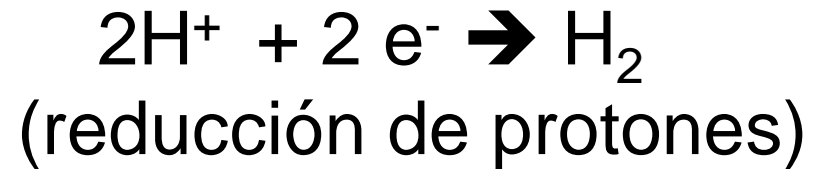
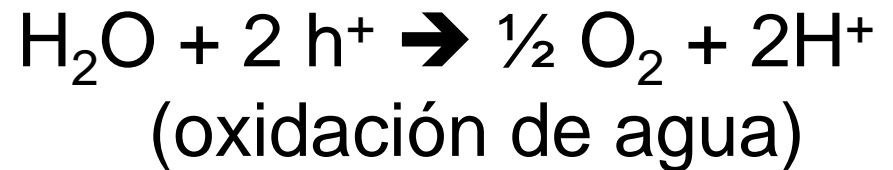
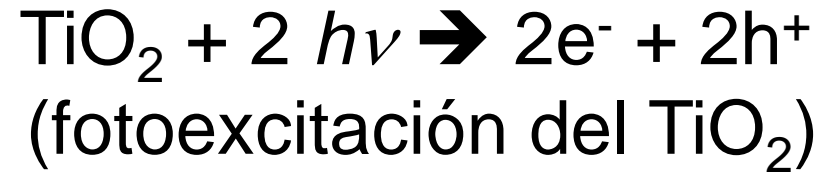
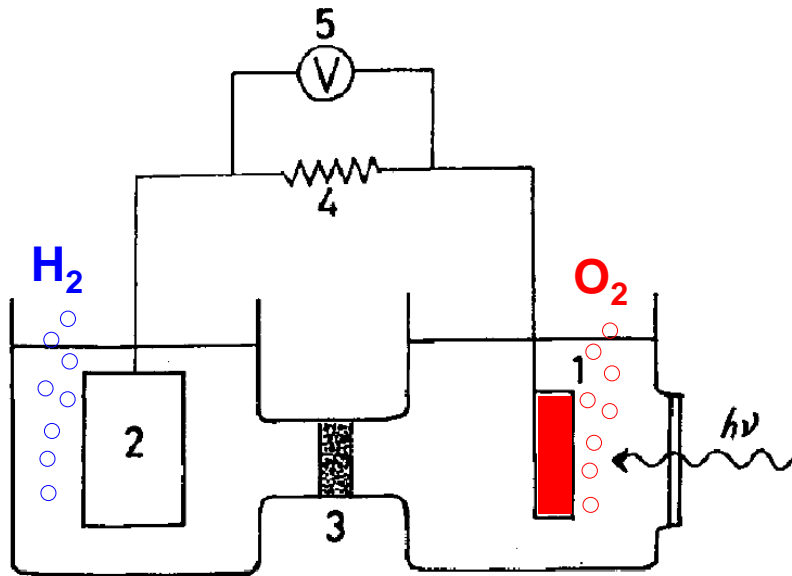
## La Isla Misteriosa, Jules Verne, 1870 2ª parte, capítulo 11



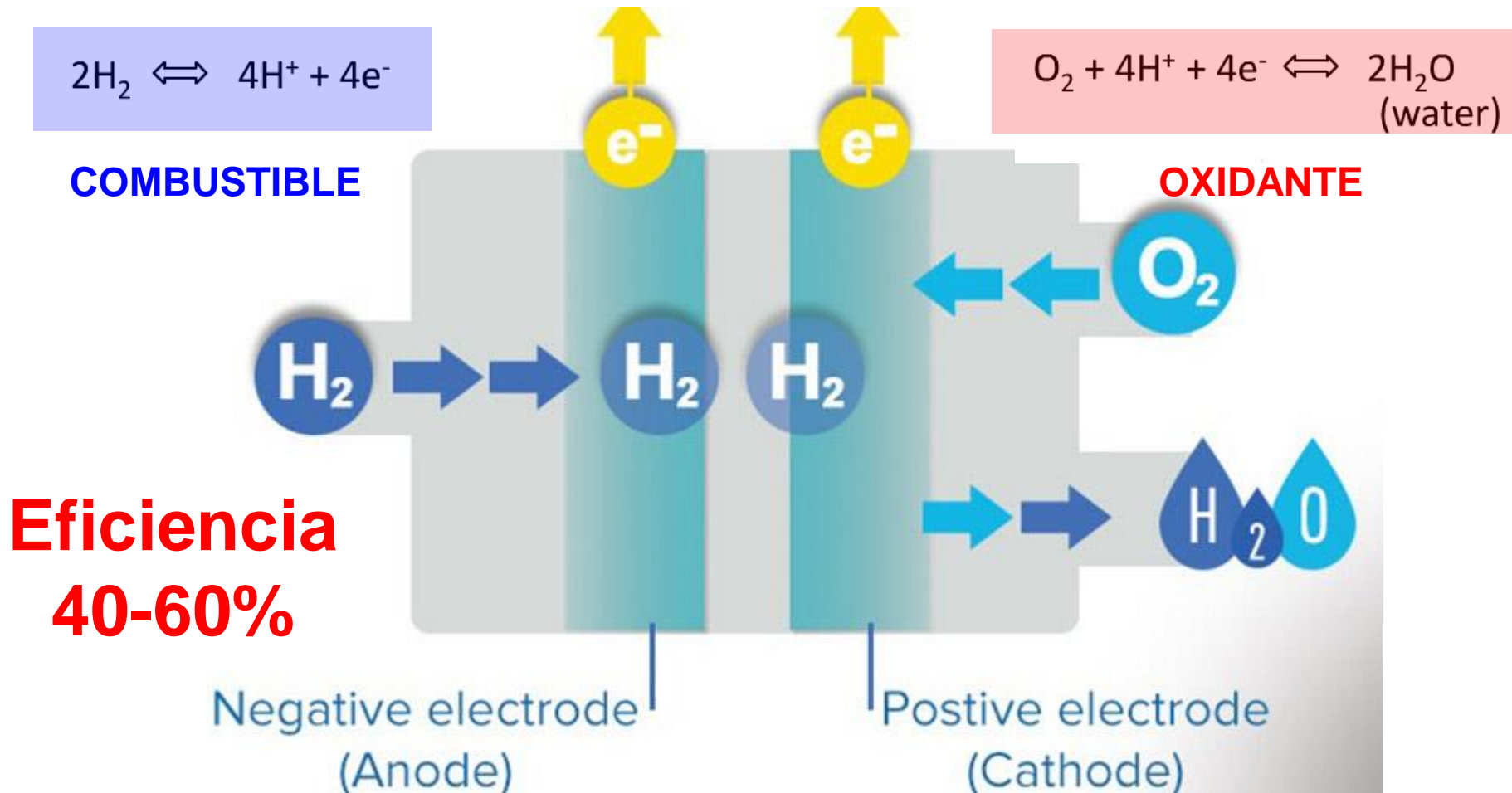
COLLECTION HETZEL

"Sí, pero agua descompuesta en sus elementos primitivos ", respondió Cyrus Harding," y descompuesta indudablemente, por electricidad, que luego se habrá convertido en una fuerza poderosa y manejable, ya que todos los grandes descubrimientos, según algunas leyes inexplicables, parecen estar de acuerdo y completarse al mismo tiempo. Sí, amigos míos, creo que algún día el agua se utilizará como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno que lo constituyen, utilizados solos o juntos, proporcionarán una fuente inagotable de calor y luz, de una intensidad de la que el carbón no es capaz. Algún día, las salas de máquinas de las locomotoras, en lugar de carbón, almacenarán estos dos gases condensados, que se quemarán en los hornos con un enorme poder calorífico. Por lo tanto, no hay nada que temer. Mientras la tierra esté habitada, satisfará las necesidades de sus habitantes, y no faltará luz ni calor mientras las producciones de los reinos vegetal, mineral o animal no nos fallen. Creo, entonces, que cuando los depósitos de carbón se agoten, nos calentaremos con agua. El agua será el carbón del futuro."





# Combustión de H<sub>2</sub>: Celda de combustible

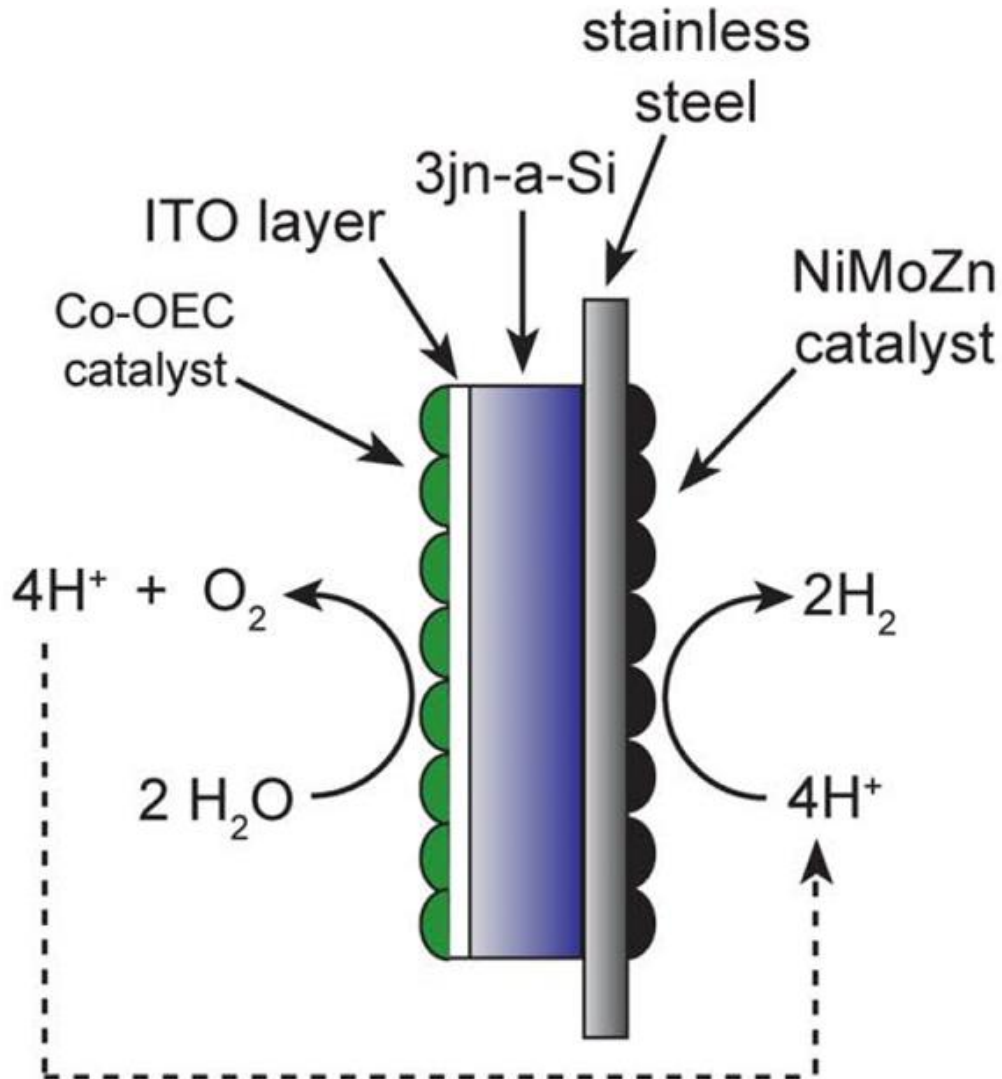


**El único residuo del proceso es H<sub>2</sub>O**





# La hoja artificial



Catalizadores basados en materiales abundantes

... pero el material absorbedor es muy caro...

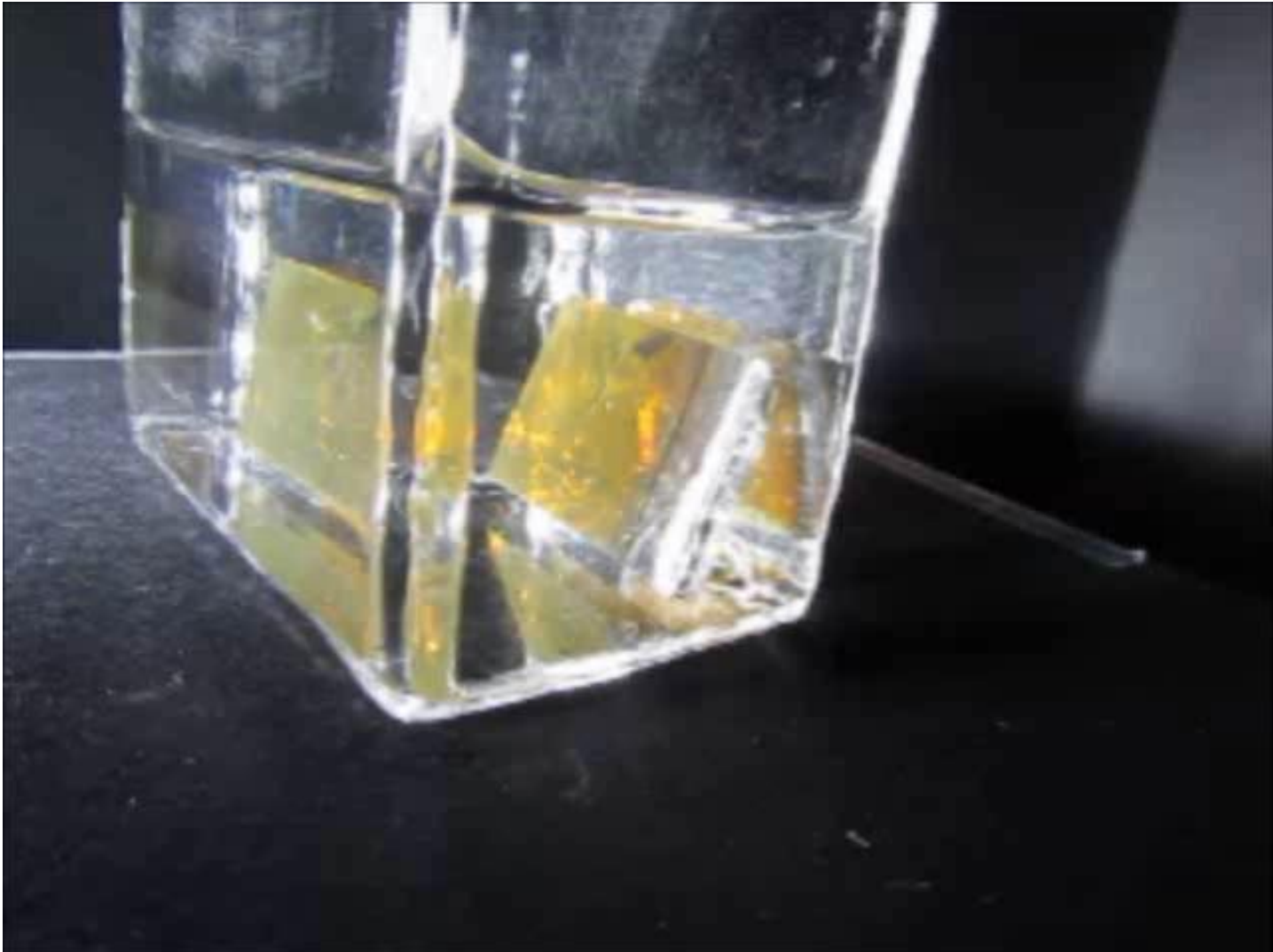


## Sun Catalytix

La hoja artificial logra la conversión directa de energía solar a combustible en condiciones benignas, utilizando materiales abundantes en la corteza terrestre y sin el uso de cables. **No es muy eficiente**, ya que solo convierte aproximadamente el **2,5%** de la energía de la luz solar en enlaces químicos

Coste del hidrógeno: Con un **panel solar** y una **unidad de electrólisis** actualmente se puede obtener alrededor de **7\$/kg**, estima la empresa; la hoja artificial vendría a **6.50 \$/kg** ... El hidrógeno a partir de combustibles fósiles cuesta solo **1–2 \$/kg**.

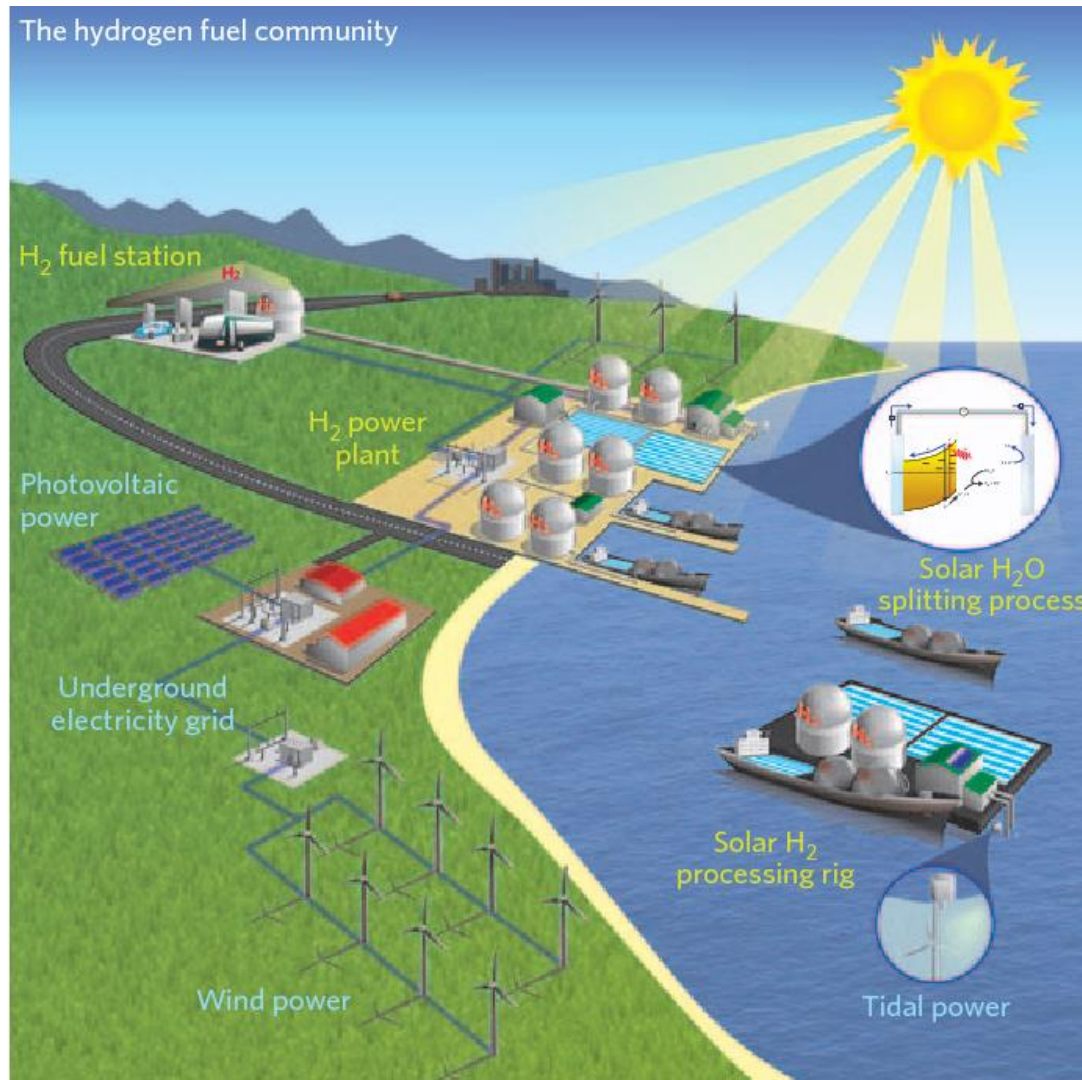
# La hoja artificial



- Eficiente 59.48 \$ / barril de petróleo (Octubre 2019)
- Robusto (10 años) 1-2 \$/kg H<sub>2</sub>
- Materiales abundantes
- Procesos escalables
- **Competitiva económicamente**



**La edad de piedra no terminó porque los gobiernos pusiesen tasas a las piedras**





Ya existen 6 modelos de automovil en el mercado con tecnología de celda de combustible alimentada por H<sub>2</sub> (Hyundai Nexu, Toyota Mirai y Honda Clarity).

Los estudios de mercado predicen 31 modelos de automóviles para 2025.

Existen 152 estaciones de hidrógeno en funcionamiento en Europa, 136 en Asia y 78 en América del Norte.

El coste de combustible se estima en 8.5 euros/100 km, para vehículos utilitarios, similar a los tradicionales vehículos diésel o gasolina.



# ... ya está aquí



# ... ya está aquí





# ... ya está aquí

El primer tren de pasajeros con celdas de combustible opera una línea regional de 100 km en Baja Sajonia

$V_{\max} = 140 \text{ km/h}$   
Autonomía = 1000 km

Usando hidrógeno verde, la emisión de  $\text{CO}_2$  es cero.



... ya está aquí



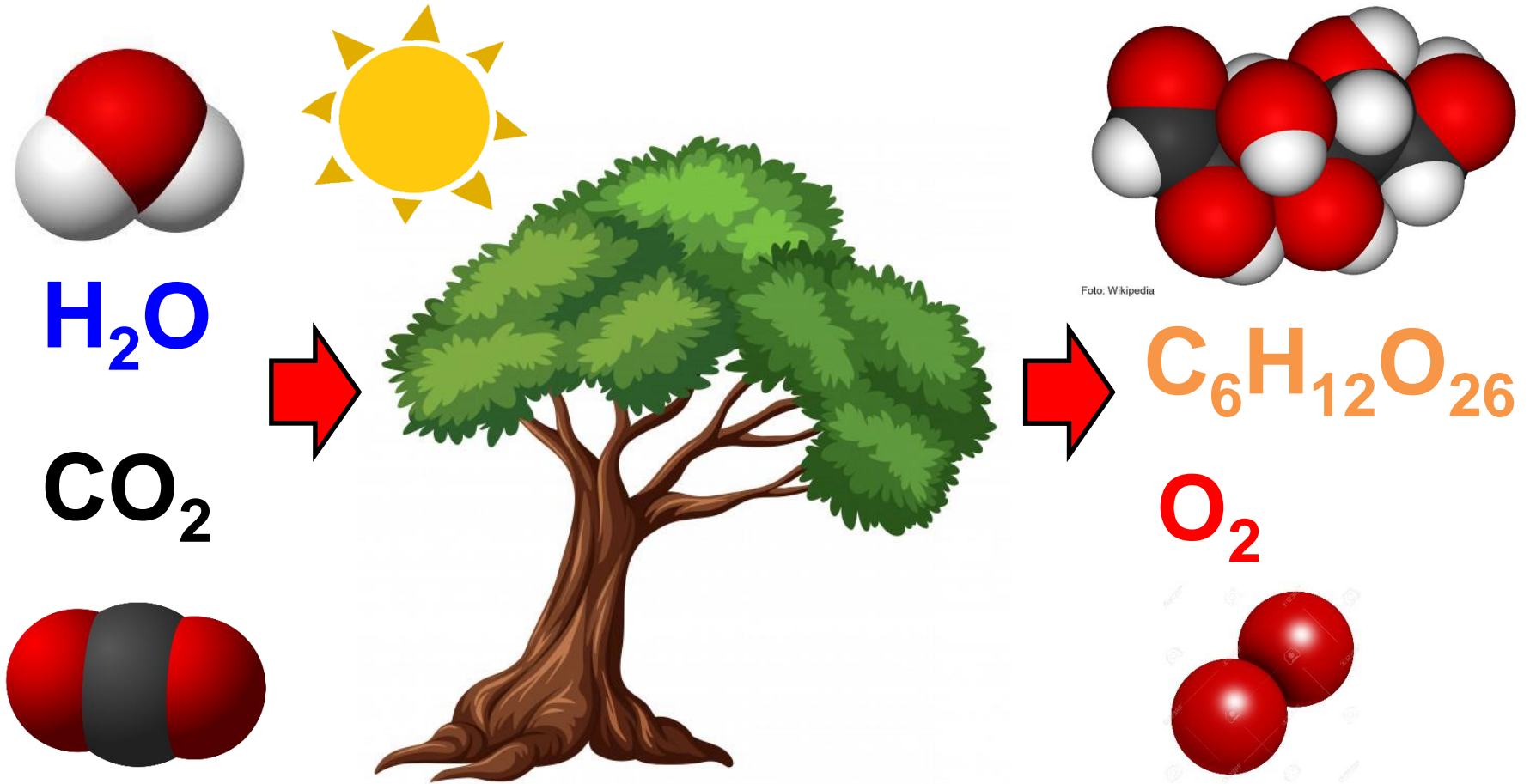


Proyecto ENE-Farm (Japón), para aumentar la autonomía energética de las familias con sistemas basados en electrolizadores y celdas de combustible.

El número total de unidades instaladas a finales de 2018 fue de 300.000.

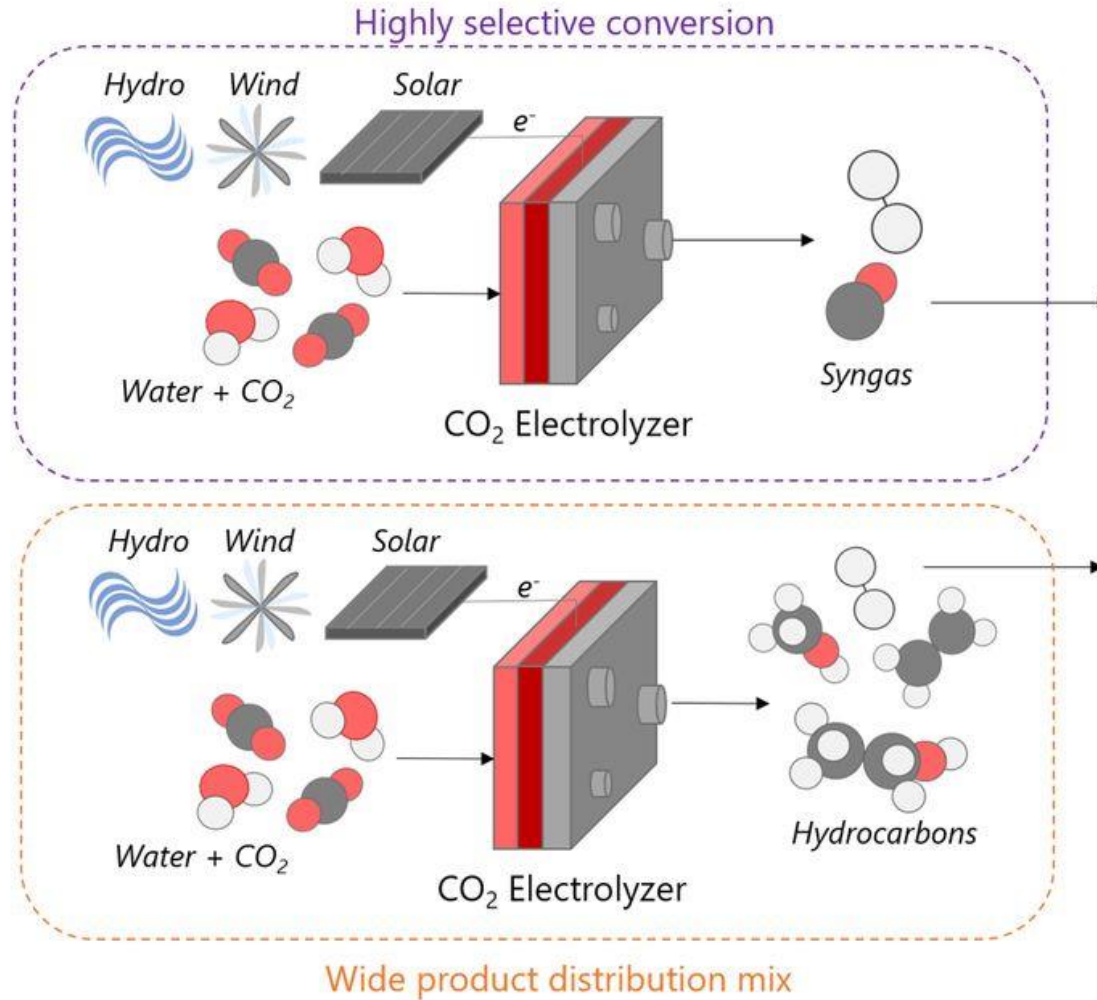






Conversión de energía solar en energía química

# Reducción de CO<sub>2</sub>

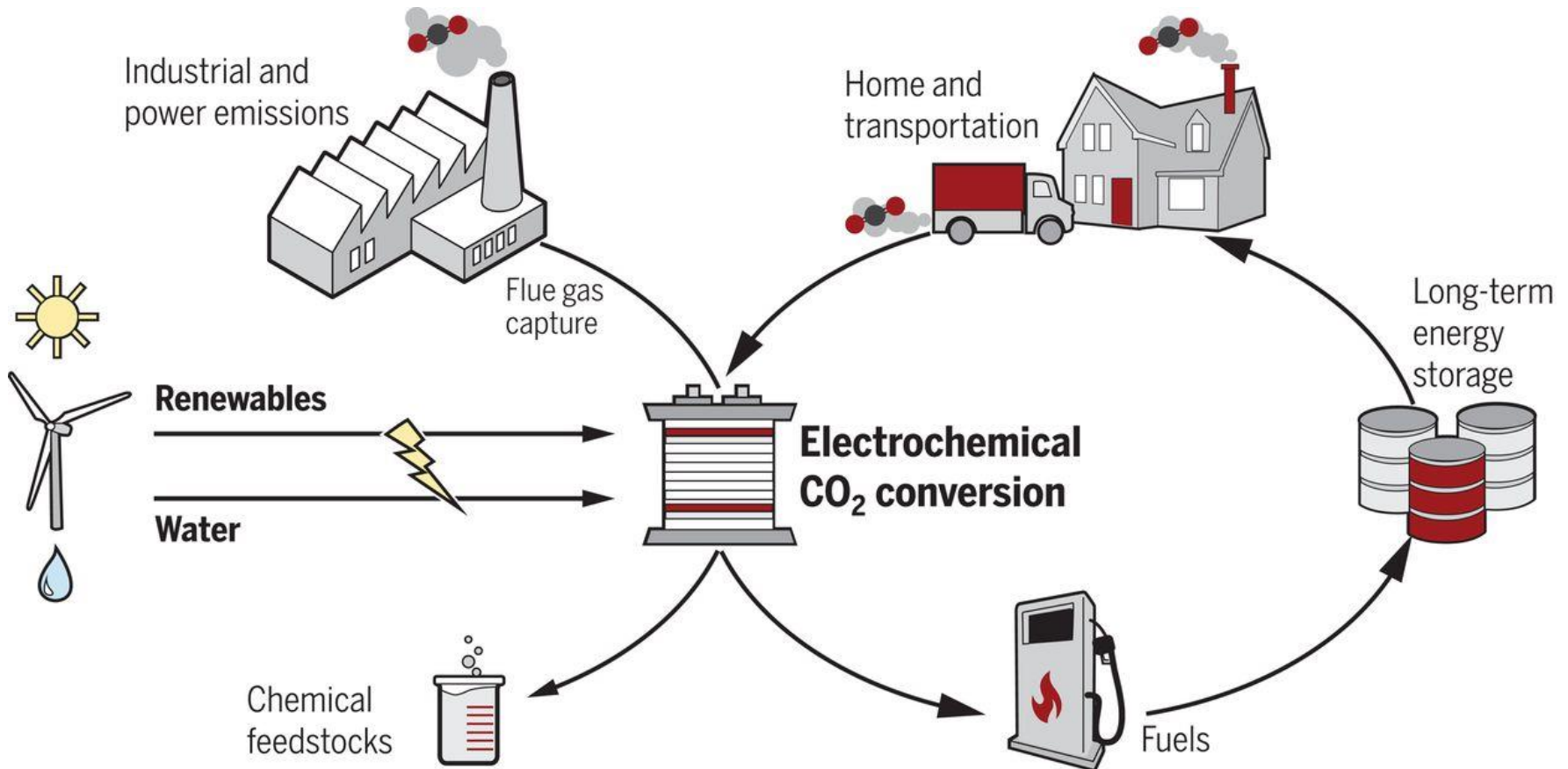


# Reducción de CO<sub>2</sub>: Actividad y Selectividad

Table 2. Electrochemical Reactions with Equilibrium Potentials

Reaction	$E^0$ /[V vs RHE]	(Product) Name, abbreviation
$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	1.23	Oxygen Evolution Reaction, OER
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0	Hydrogen Evolution Reaction, HER
$x\text{CO}_2 + n\text{H}^+ + ne^- \rightarrow \text{product} + y\text{H}_2\text{O}$		CO <sub>2</sub> Reduction, CO <sub>2</sub> R
$\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{HCOOH}_{(\text{aq})}$	-0.12	Formic acid
$\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_{(\text{g})} + \text{H}_2\text{O}$	-0.10	Carbon monoxide
$\text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}_{(\text{aq})} + \text{H}_2\text{O}$	0.03	Methanol, MeOH
$\text{CO}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow \text{C}_{(\text{s})} + 2\text{H}_2\text{O}$	0.21	Graphite
$\text{CO}_2 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_{4(\text{g})} + 2\text{H}_2\text{O}$	0.17	Methane
$2\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow (\text{COOH})_{2(\text{s})}$	-0.47	Oxalic acid
$2\text{CO}_2 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH}_{(\text{aq})} + 2\text{H}_2\text{O}$	0.11	Acetic acid
$2\text{CO}_2 + 10\text{H}^+ + 10\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{CHO}_{(\text{aq})} + 3\text{H}_2\text{O}$	0.06	Acetaldehyde
$2\text{CO}_2 + 12\text{H}^+ + 12\text{e}^- \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(\text{aq})} + 3\text{H}_2\text{O}$	0.09	Ethanol, EtOH
$2\text{CO}_2 + 12\text{H}^+ + 12\text{e}^- \rightarrow \text{C}_2\text{H}_{4(\text{g})} + 4\text{H}_2\text{O}$	0.08	Ethylene
$2\text{CO}_2 + 14\text{H}^+ + 14\text{e}^- \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6_{(\text{g})} + 4\text{H}_2\text{O}$	0.14	Ethane
$3\text{CO}_2 + 16\text{H}^+ + 16\text{e}^- \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{CHO}_{(\text{aq})} + 5\text{H}_2\text{O}$	0.09	Propionaldehyde
$3\text{CO}_2 + 18\text{H}^+ + 18\text{e}^- \rightarrow \text{C}_3\text{H}_7\text{OH}_{(\text{aq})} + 5\text{H}_2\text{O}$	0.10	Propanol, PrOH
$x\text{CO} + n\text{H}^+ + ne^- \rightarrow \text{product} + y\text{H}_2\text{O}$		CO Reduction, COR
$\text{CO} + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_{4(\text{g})} + \text{H}_2\text{O}$	0.26	Methane
$2\text{CO} + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}_{(\text{aq})} + \text{H}_2\text{O}$	0.19	Ethanol, EtOH
$2\text{CO} + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \rightarrow \text{C}_2\text{H}_{4(\text{g})} + 2\text{H}_2\text{O}$	0.17	Ethylene

## Economía circular





# Reducción de CO<sub>2</sub>: Un largo camino por recorrer...

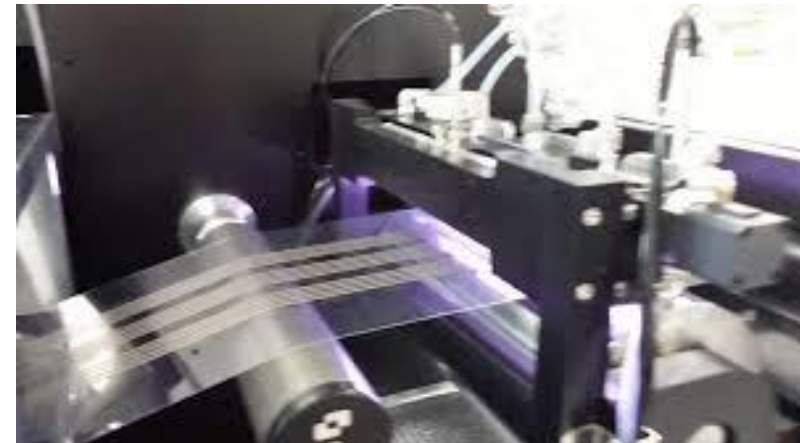
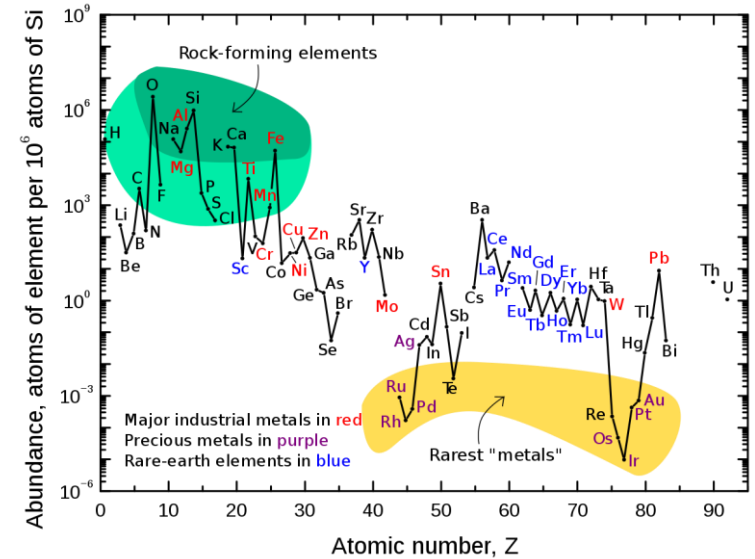
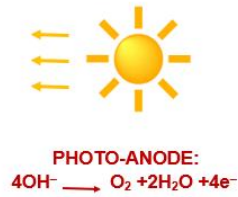
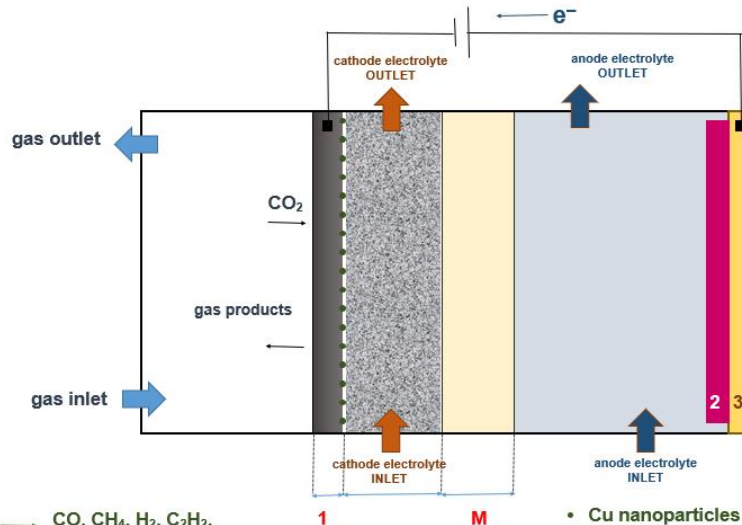




El objetivo final de



es la demostración de una  
célula fotoelectroquímica  
capaz de transformar  
radiación solar en combustibles  
A partir de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$



$\text{CO}_2 \rightarrow$  CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>,  
HCOOH, CH<sub>3</sub>COOH,  
hydrocarbons, alcohols,  
oxygenates

**1:** Gas Diffusion Layer (GDL) + CRC catalyst  
**M:** Membrane

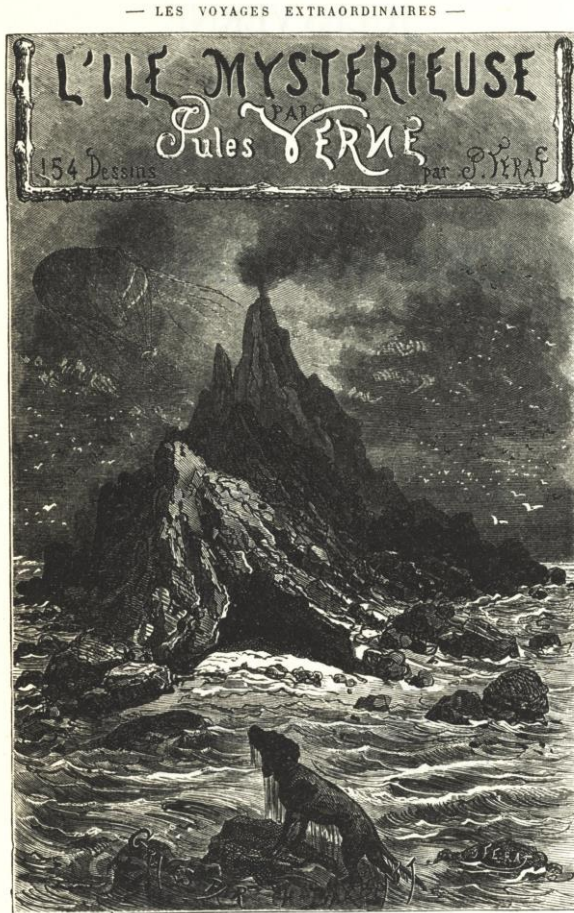
• Cu nanoparticles  
**2:** OER catalyst  
**3:** Photovoltaics

# Proyecto a-leaf



9 Universidades  
3 Centros de Investigación  
1 Socio industrial





## La Isla Misteriosa, Jules Verne, 1870 2ª parte, capítulo 11

... Cuando los depósitos de carbón se agoten, nos calentaremos y calentaremos con agua. El agua será el carbón del futuro ".

"Me gustaría ver eso", observó el marinero.

"Naciste demasiado pronto, Pencroft", respondió Neb, quien solo participó en la conversación con estas palabras ".

2019: ¿Hemos nacido demasiado pronto?

“Esa ES la cuestión”

Hamlet, William Shakespeare, 1602



e-mail: [sjulia@uji.es](mailto:sjulia@uji.es)

[www.inam.uji.es](http://www.inam.uji.es)



a-leaf







Gracias