

PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO DESCARBONIZADO

***Reformado de metano con captura,
almacenamiento y uso de CO₂ (CCUS)***

Producción y perspectivas

José Ignacio Linares

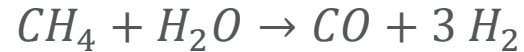
Director de la Cátedra Fundación Repsol de Transición Energética
(Comillas – ICAI)

2 de febrero de 2026

REFORMADO DE METANO CON VAPOR (SMR)

Sin captura de CO₂

- Reformado (metano como materia prima, reacción endotérmica)



- Reacción de desplazamiento (WGS, aumenta la producción)

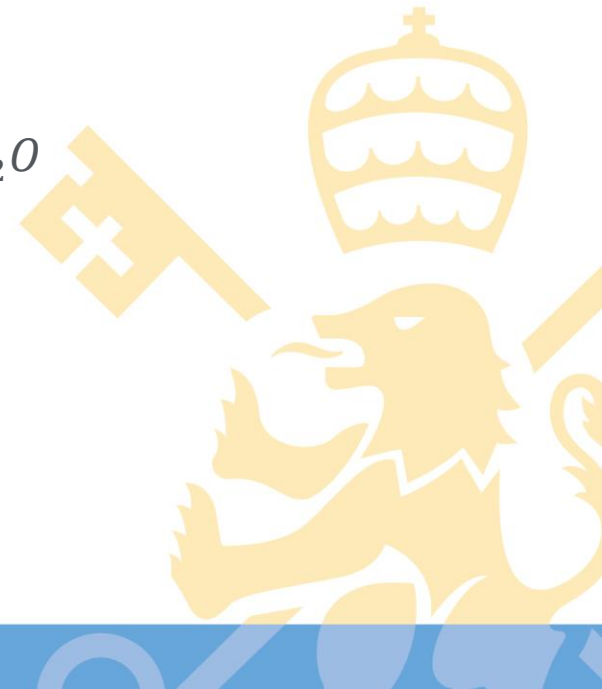


- Combustión (aporte de calor, metano como combustible)



DATOS REALES [\[Baltac et al., 2022\]](#)

- $\alpha = 0,5873$
- Emisiones: 8,73 kg CO₂ / kg H₂
- Rendimiento (PCI) = 75,9 %
- Producción = **20,36 t H₂/GWh-PCS CH₄**



REFORMADO DE METANO CON VAPOR (SMR)

Con captura de CO₂

- Las reacciones son las mismas, pero la inclusión de la captura impone una penalización en la eficiencia (crece α)
- Se puede realizar la captura en diferentes puntos, logrando distintas eficiencias
- La captura en la corriente de gases de escape suele ser la más eficaz, alcanzando eficiencias de captura del 90%

DATOS REALES [\[Baltac et al., 2022\]](#)

- $\alpha = 0,7467$
- Emisiones: 0,96 kg CO₂/kg H₂
- Rendimiento (PCI) = 69,1 %
- Producción = **18,54 t H₂/GWh-PCS CH₄**



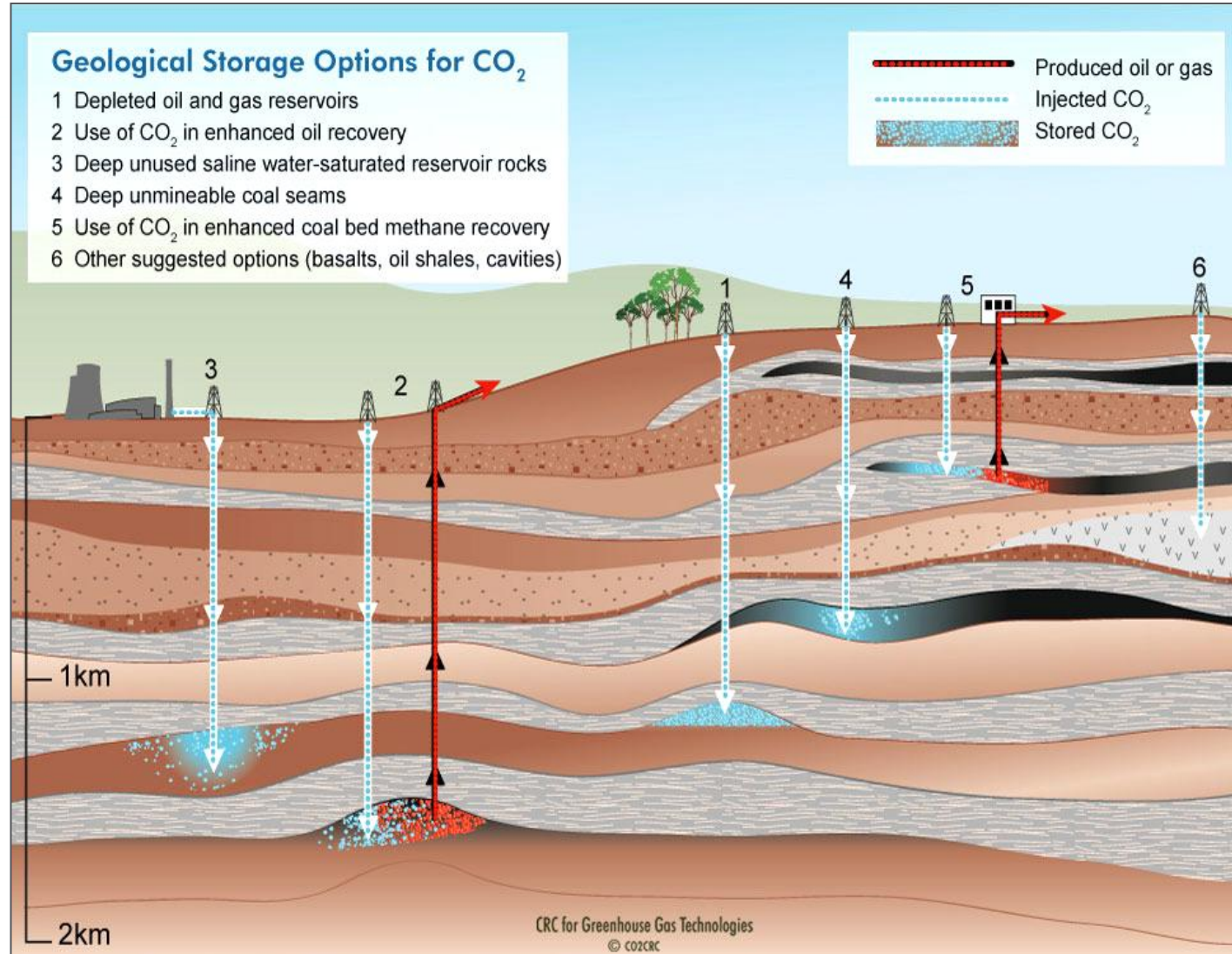
¿QUÉ HACER CON EL CO₂?

CCS vs. CCU

- CCS
 - Una vez capturado en forma de gas a presión cercana al ambiente se lleva a las condiciones de transporte:
 - Acondicionamiento y retirada de impurezas
 - Licuefacción a baja presión para transporte en barco
 - Compresión por encima del punto crítico para transporte por tubería (fluido denso)
 - En destino se inyecta en almacenamiento geológico adecuado:
 - EOR/EGR (recuperación estimulada de petróleo/gas)
 - Capas de carbón no minables
 - **Acuíferos salinos profundos** (tipo de almacén en España)



¿QUÉ HACER CON EL CO₂? CCS vs. CCU



¿QUÉ HACER CON EL CO₂?

CCS vs. CCU

- CCU
 - El CO₂ tiene valor comercial:
 - Aplicaciones industriales habituales: fertilizante, disolvente, extracción de moléculas, alimentación...
 - Creación de moléculas verdes: e-fuels, urea...
 - Generación de materiales inertes, áridos...
 - Para las moléculas verdes:
 - Se admite procedencia de sectores industriales *hard-to-abate* hasta 2040
 - A partir de ahí debe ser CO₂ biogénico, quedando el fósil confinado (geológicamente o en productos estables)



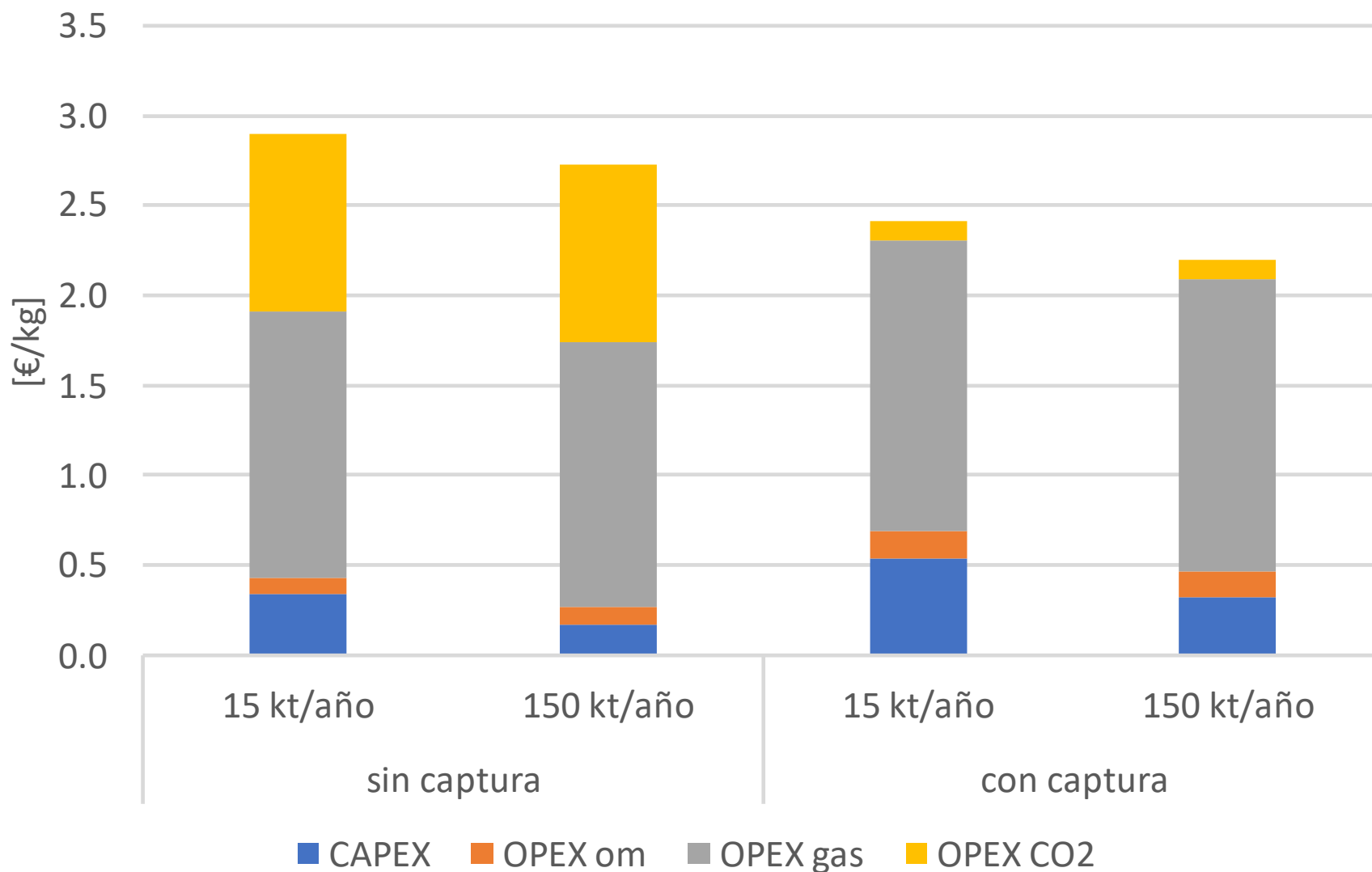
MODELO DE COSTES

	Sin captura CO ₂	Con captura CO ₂
INVERSIÓN	$INV[€] = 56.884 \cdot \{P[t/año]\}^{0,713}$	$INV[€] = 56.884 \cdot \left\{P \left[\frac{t}{año} \right] \right\}^{0,713} + 8.347 \cdot \{P[t/año]\}^{0,8592}$
MANTENIMIENTO	0,096 €/kg	0,148 €/kg
GAS NATURAL	$\frac{T_{gas} [€/MWh - PCS]}{20,36 \text{ kg/MWh} - PCS}$	$\frac{T_{gas} [€/MWh - PCS]}{18,54 \text{ kg/MWh} - PCS}$
TASA CO ₂	$T_{CO2} \left[\frac{€}{t \text{ CO}_2} \right] \cdot 0,00873 \left[\frac{t \text{ CO}_2}{kg \text{ H}_2} \right]$	$T_{CO2} \left[\frac{€}{t \text{ CO}_2} \right] \cdot 0,00096 \left[\frac{t \text{ CO}_2}{kg \text{ H}_2} \right]$

[Yagüe et al., 2024]

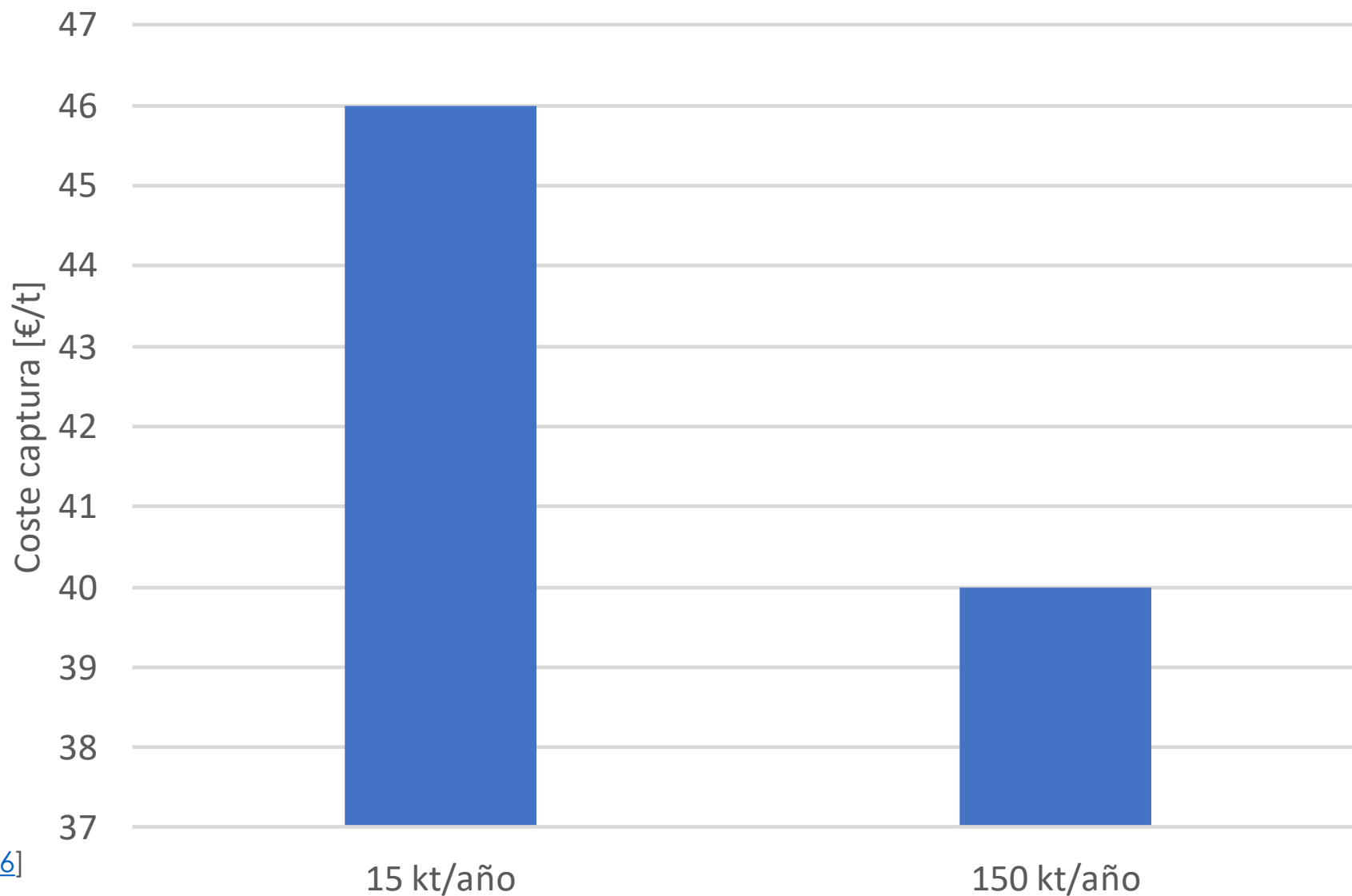
MODELO DE COSTES

- Tarifa del gas: 30 €/MWh
- Tasa del CO₂: 80 €/t
- Vida del proyecto: 25 años
- Horas de uso: 8760 h/año
- wacc: 8%
- Tasa nominal CO₂: 3,5% anual
- Tasa nominal gas: 0%
- Tasa nominal OM: 0%



COSTES DE CAPTURA (CO₂ fósil)

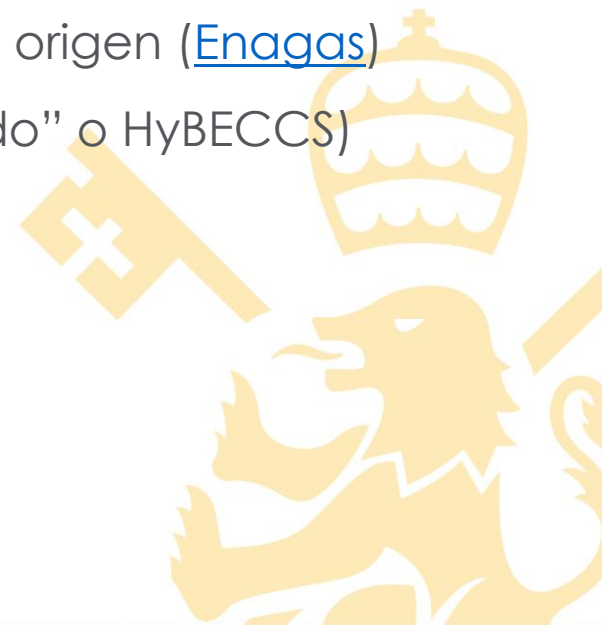
- La captura de CO₂ en el SMR es muy competitiva debido a la alta concentración de CO₂.
- En una planta de 15 kt/año de producción se capturarían 129,6 kt CO₂/año
- En una planta de 150 kt/año de producción se capturarían 1296 kt CO₂/año



[[Linares, 2026](#)]

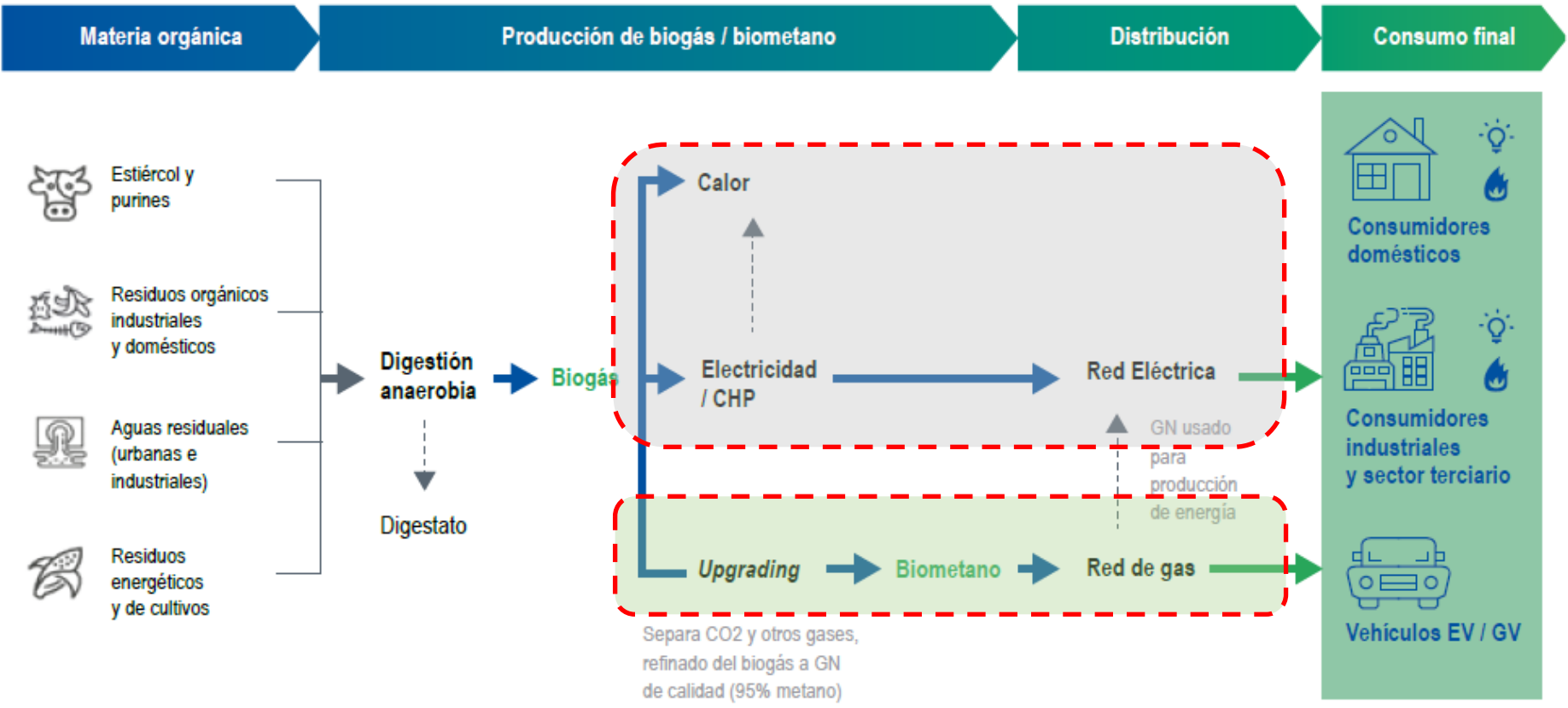
BOHIDRÓGENO

- Hasta ahora, se ha supuesto que el metano era gas natural, lo que da lugar a hidrógeno gris (gas natural sin captura) o azul (gas natural con captura).
- Se puede producir también hidrógeno verde mediante SMR:
 - Se reemplaza el gas natural por biometano (metano renovable de origen biológico)
 - Se mantiene toda la infraestructura idéntica
 - El biometano se comercializa mediante certificados de garantía de origen ([Enagas](#))
 - Si se realiza CCS se generan emisiones negativas (hidrógeno “dorado” o HyBECCS)
 - [Visión de REPSOL](#)
 - [Aplicación a la producción de HVO en Puertollano \(REPSOL\)](#)
 - [Visión de la Cátedra y estudios realizados](#)



BIOMETANO

Esquema de producción de
biogás / biometano y usos
Fuente: Análisis de PwC y Biovic



BIOMETANO en IBERIA

Plantas en explotación:

- 19 plantas
- Total: 648 GWh
- Tamaño medio: 34,1 GWh

Plantas en construcción:

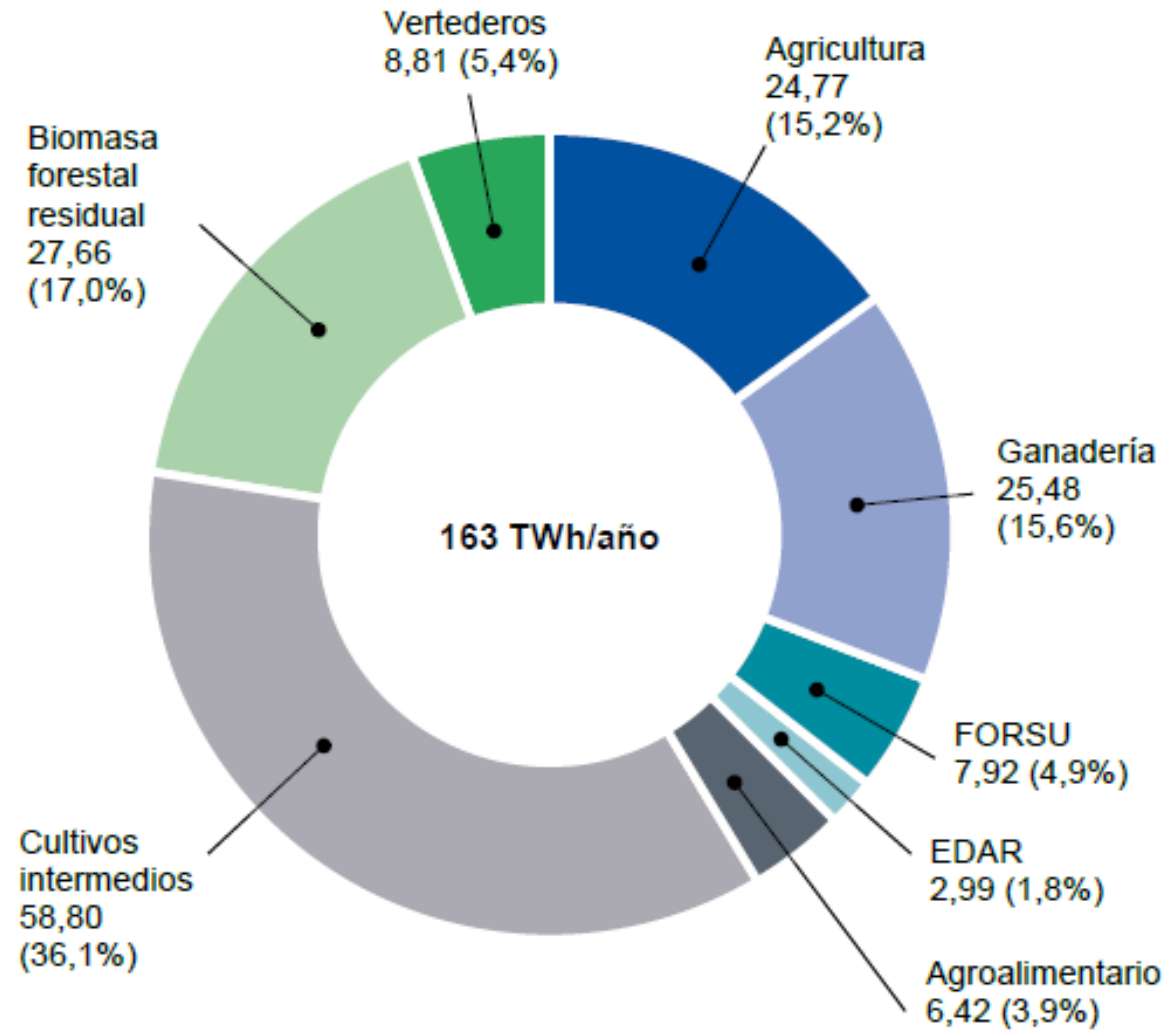
- 17 plantas
- Total: 894 GWh
- Tamaño medio: 52,6 GWh

Plantas en proyecto:

- 60 plantas
- Total: 4612 GWh
- Tamaño medio: 78,9 GWh



BIOMETANO. Potencial en España

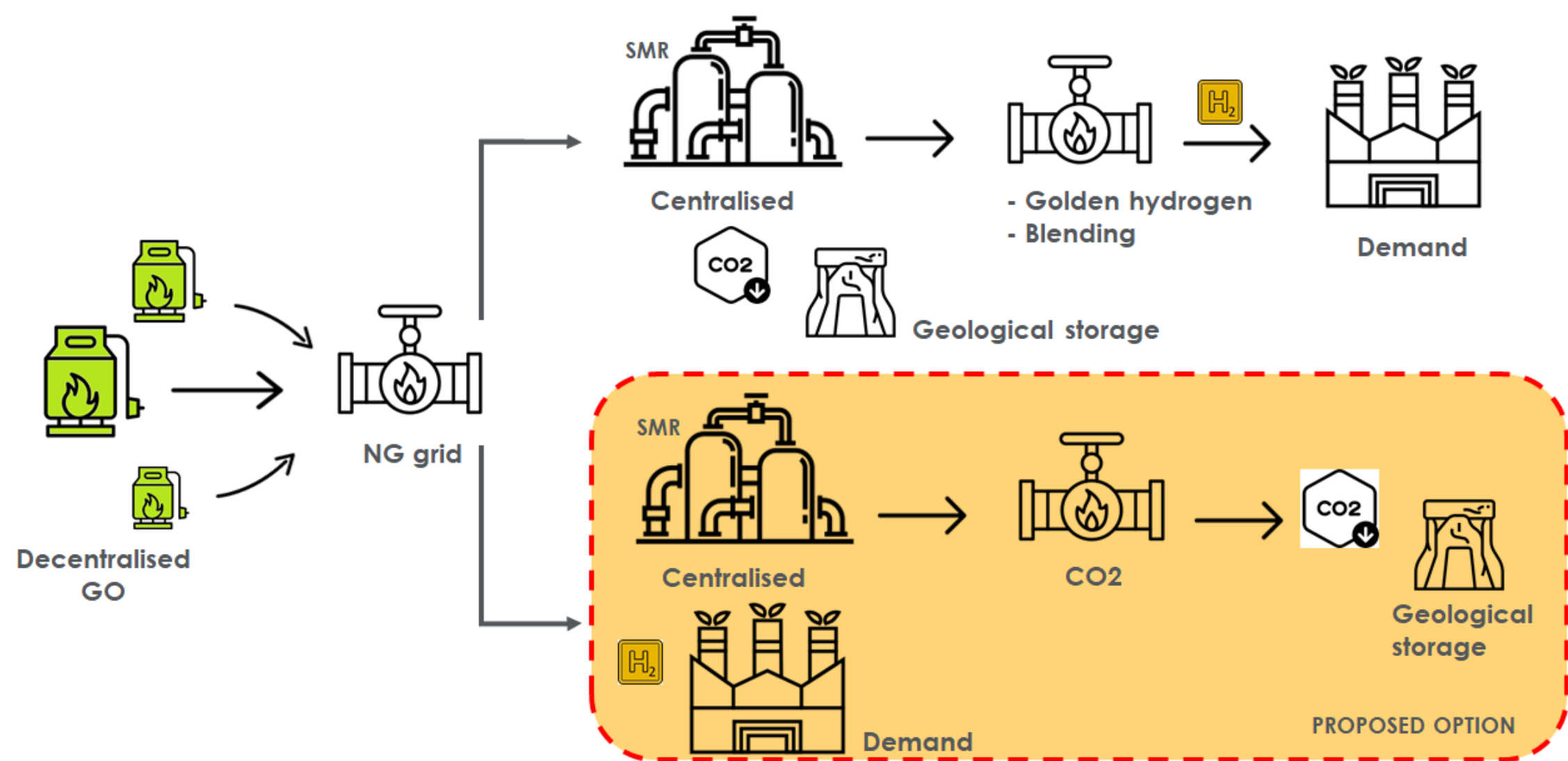


BIOMETANO. Potencial en España y costes

Substrate	Potential [TWh] Scenario 1	Potential [TWh] Scenario 2	Potential [TWh] Scenario 3	Potential [TWh] Scenario 4	Biogas cost assumed [€/MWh-LHV]
Agricultural waste		4.5	24.8	24.8	50
Manure		0.9	25.5	25.5	70
Intermediate crops		0.0	11.8	58.8	70
Forest waste		0.0	27.7	27.7	70
Industry waste		2.2	6.4	6.4	50
Organic fraction MSW	7.92	1.8	7.9	7.9	35
WWTP sludge		0.6	3.0	3.0	35
Landfill gas		1.1	8.8	8.8	8
Total	7.92	11	116	163	
Coste biogás [€/MWh-PCI]	35	44.22	56,62	60,48	
Coste biometano (bg+upg+iny) [€/MWh-PCS]	48,85	57,17	68,35	71,83	

- Coste medio upgrading: 11,65 €/MWh-PCS
- Coste medio Inyección: 5,65 €/MWh-PCS
- Coste medio bm de vertedero: 24,5 €/MWh-PCS

CADENA LOGÍSTICA DEL BOHIDRÓGENO (HyBECCS)



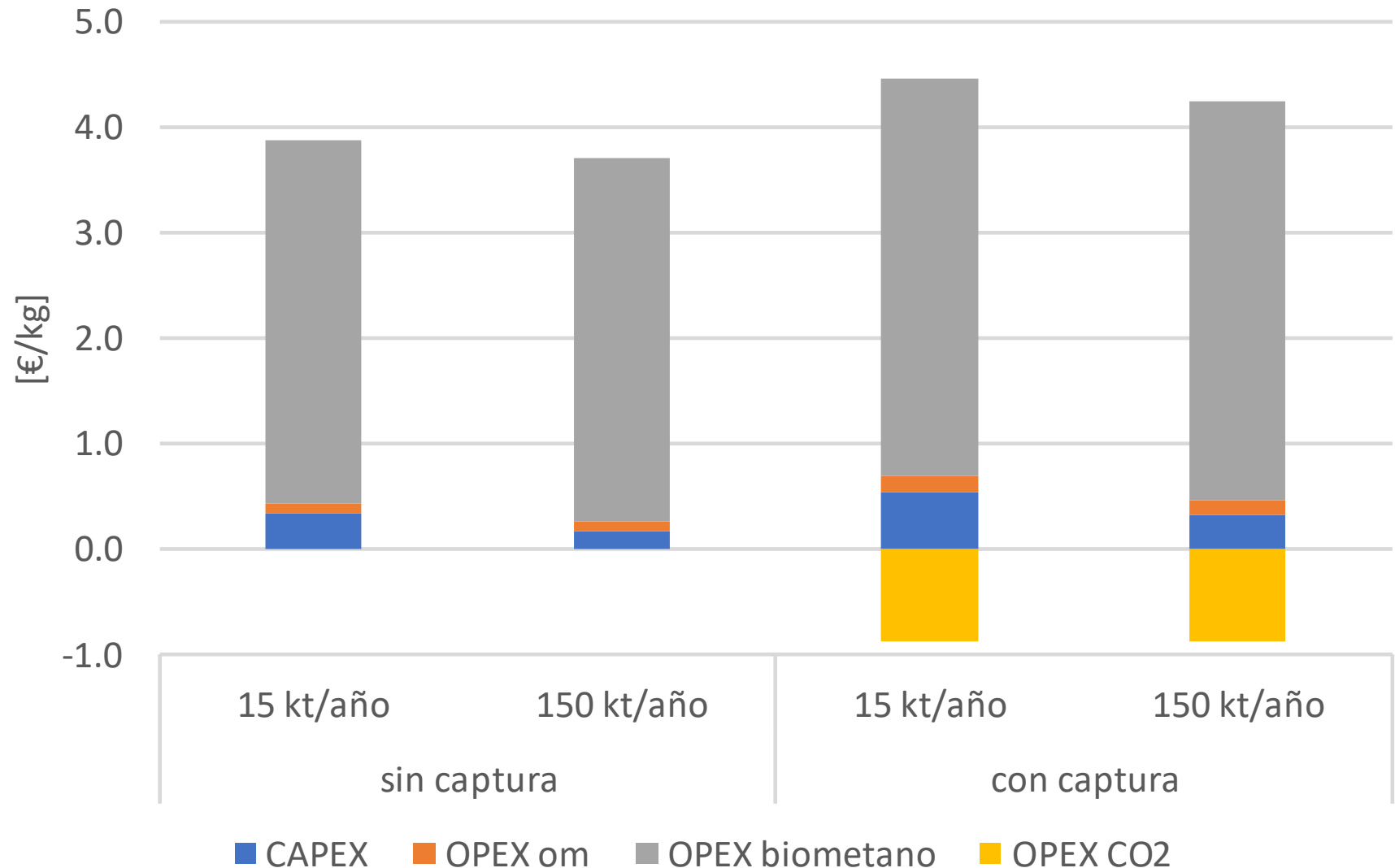
MODELO DE COSTES BIOHIDRÓGENO

	Sin captura CO ₂	Con captura CO ₂
INVERSIÓN	$INV[€] = 56.884 \cdot \{P[t/año]\}^{0,713}$	$INV[€] = 56.884 \cdot \left\{P \left[\frac{t}{año} \right] \right\}^{0,713} + 8.347 \cdot \{P[t/año]\}^{0,8592}$
MANTENIMIENTO	0,096 €/kg	0,148 €/kg
BIOMETANO	$\frac{T_{biometano} [€/MWh - PCS]}{20,36 \text{ kg/MWh} - PCS}$	$\frac{T_{biometano} [€/MWh - PCS]}{18,54 \text{ kg/MWh} - PCS}$
TASA CO ₂	0	$- T_{CO_2} \left[\frac{€}{t \text{ CO}_2} \right] \cdot 0,00864 \left[\frac{t \text{ CO}_2}{kg \text{ H}_2} \right]$

[Yagüe et al., 2024]

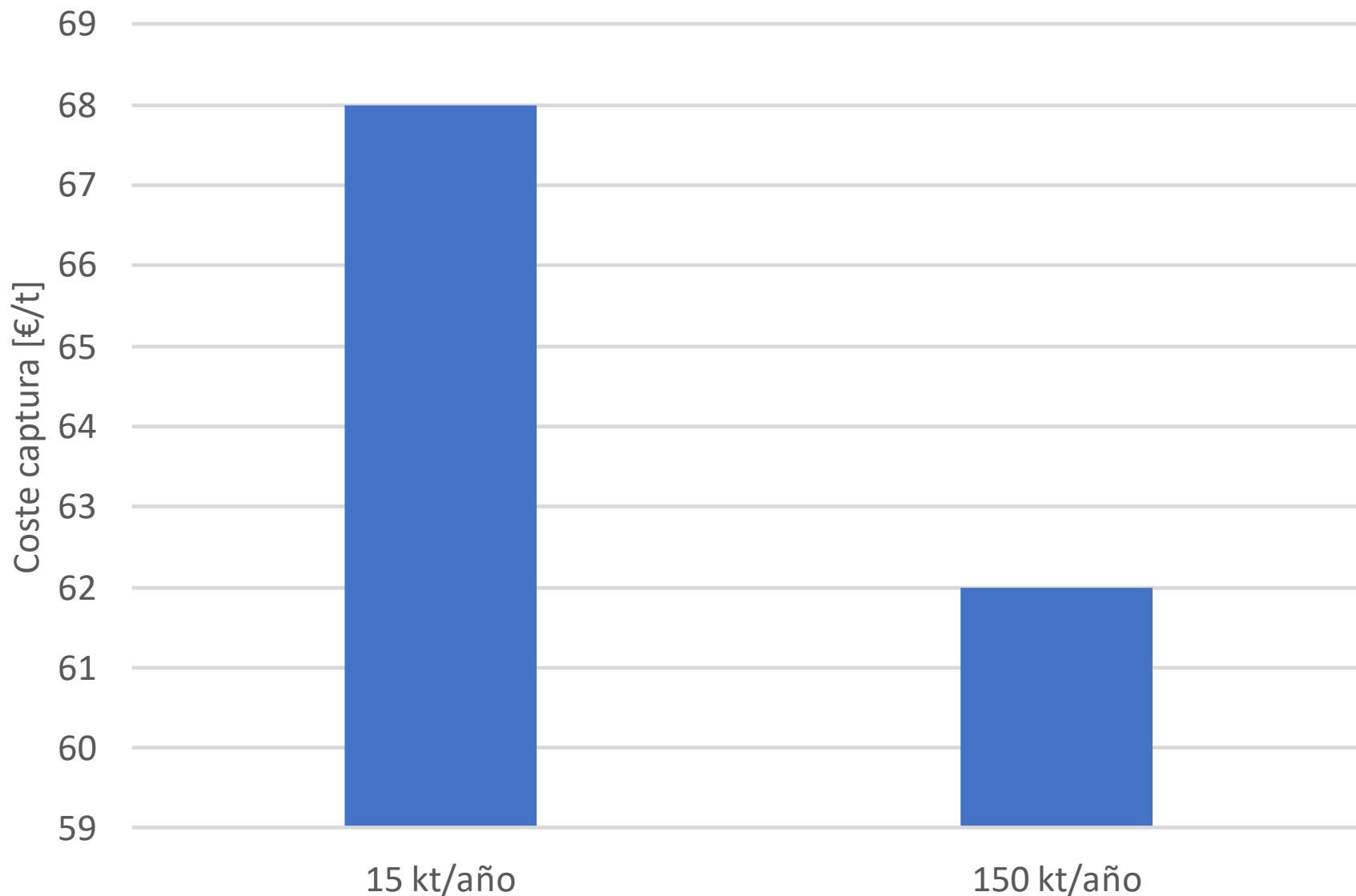
MODELO DE COSTES BIOHIDRÓGENO

- Tarifa del BM: 70 €/MWh
- Tasa del CO₂: 80 €/t
- Vida del proyecto: 25 años
- Horas de uso: 8760 h/año
- wacc: 8%
- Tasa nominal CO₂: 3,5% anual
- Tasa nominal gas: 0%
- Tasa nominal OM: 0%



COSTES DE CAPTURA (CO₂ biogénico)

- La captura de CO₂ en el SMR es muy competitiva debido a la alta concentración de CO₂.
- Costes mayores que con gas natural por mayor coste metano
- En una planta de 15 kt/año de producción se capturarían 129,6 kt CO₂/año
- En una planta de 150 kt/año de producción se capturarían 1296 kt CO₂/año



[[Linares, 2026](#)]

APLICACIÓN AL H₂ GRIS ACTUAL

- En 2023 España produjo 571 kt de Hidrógeno gris en 15 instalaciones
- 93% (531 kt) vinieron de SMR sin captura de CO₂
- Se emitieron 4.7 Mt CO₂



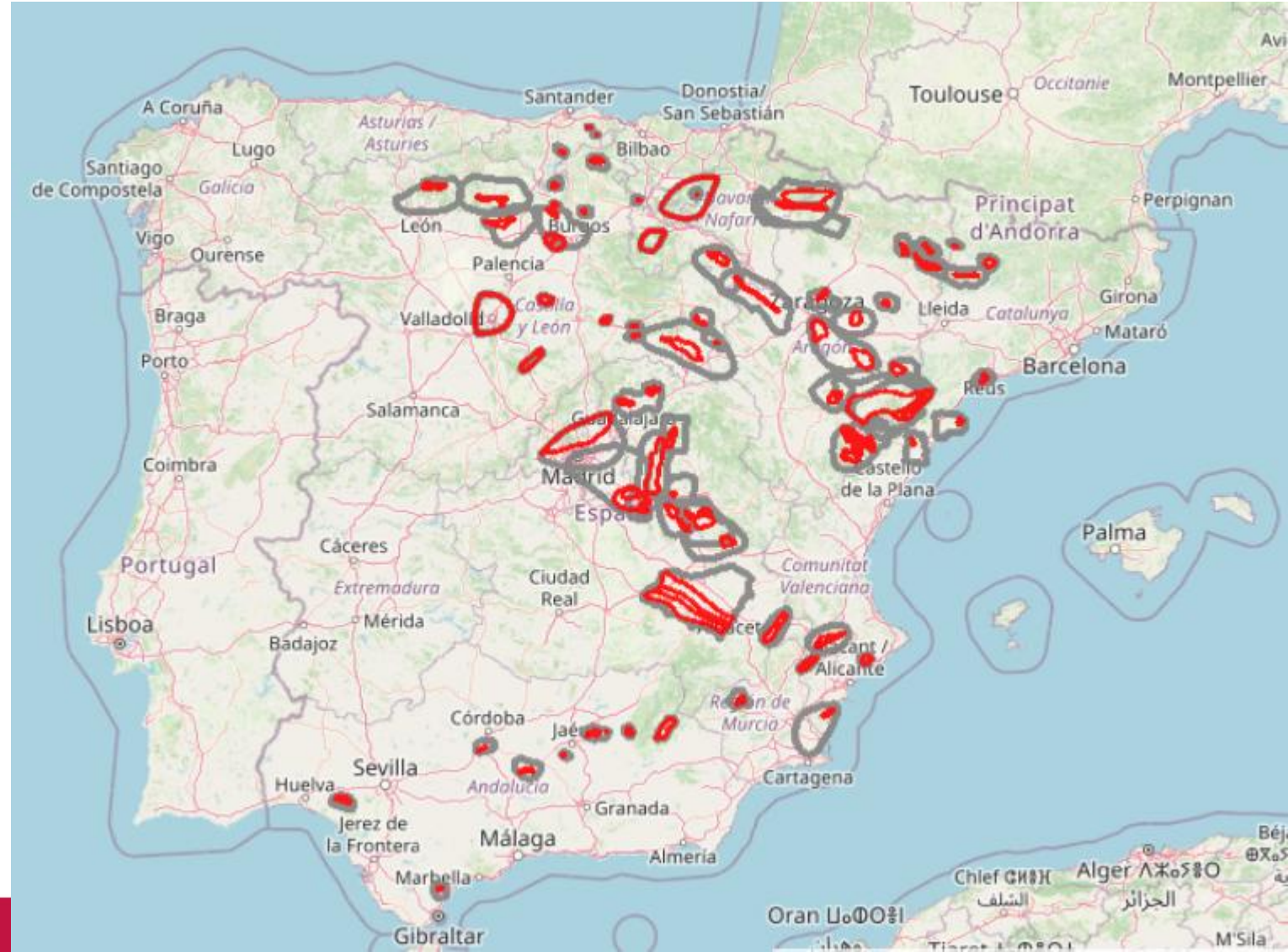
APLICACIÓN AL H₂ GRIS ACTUAL

Almacenamientos geológicos potenciales en España

- Acuíferos salinos profundos
- 103 localizaciones
- Capacidad total: 21 Gt CO₂

[IGME]

comillas.edu



APLICACIÓN AL H₂ GRIS ACTUAL

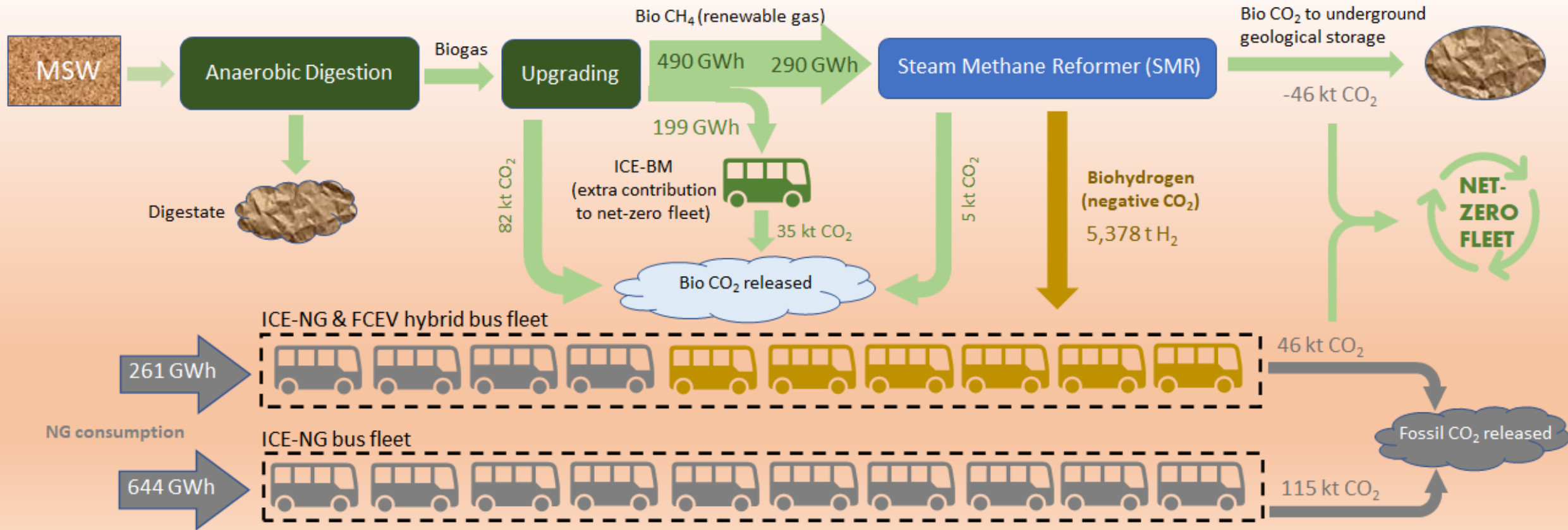
Escenario B

- Sólo en 6 plantas SMR:
 - Se reemplaza GN por biometano
 - Se añade CCS
 - Se requieren 2 almacenes (1.6 Gt CO₂)
- 14.4 TWh de biometano
- 4,65 Mt CO₂ se convierten en -8 kt CO₂
- LCOH actual: 2.61 €/kg
- LCOH en Escenario B : 3.02 €/kg
- Δ LCOH = 0.41 €/kg

Facility	H ₂ production [t]	Natural gas [GWh-HHV]	Biomethane [GWh-HHV]	CO ₂ emissions [kt]	Cost [M€]
San Roque/Algeciras CEPSA	13.688	672		119,63	37,27
Huelva Fertiberia	47.584	2.335		415,88	125,26
Huelva/La Rabida CEPSA	67.393	3.308		589,01	173,30
Cartagena Repsol	122.506		6.604	-1058,45	403,14
Puertollano Fertiberia	21.343		1.151	-184,40	78,38
Puertollano Air Liquide	29.976		1.616	-259,00	105,91
Puertollano Repsol	11.450		617	-98,93	42,53
Castellón de la Plana BP	63.989		3.450	-552,87	216,03
Tarragona Air Products	41.231	2.024		360,36	107,65
Tarragona Repsol	18.479		996	-159,66	66,45
Sabinanigo ENERG.IND.ARAGON	1.071	53		9,36	3,50
Muskiz Repsol	50.645	2.486		442,64	132,17
La Coruña Air Liquide	19.163	941		167,48	51,45
La Coruña Repsol	17.110	840		149,54	46,60
Aviles Nippon Gases Europe	5.870	288		51,30	16,76
TOTAL	531.497	12.945	14.434	-8	1.606

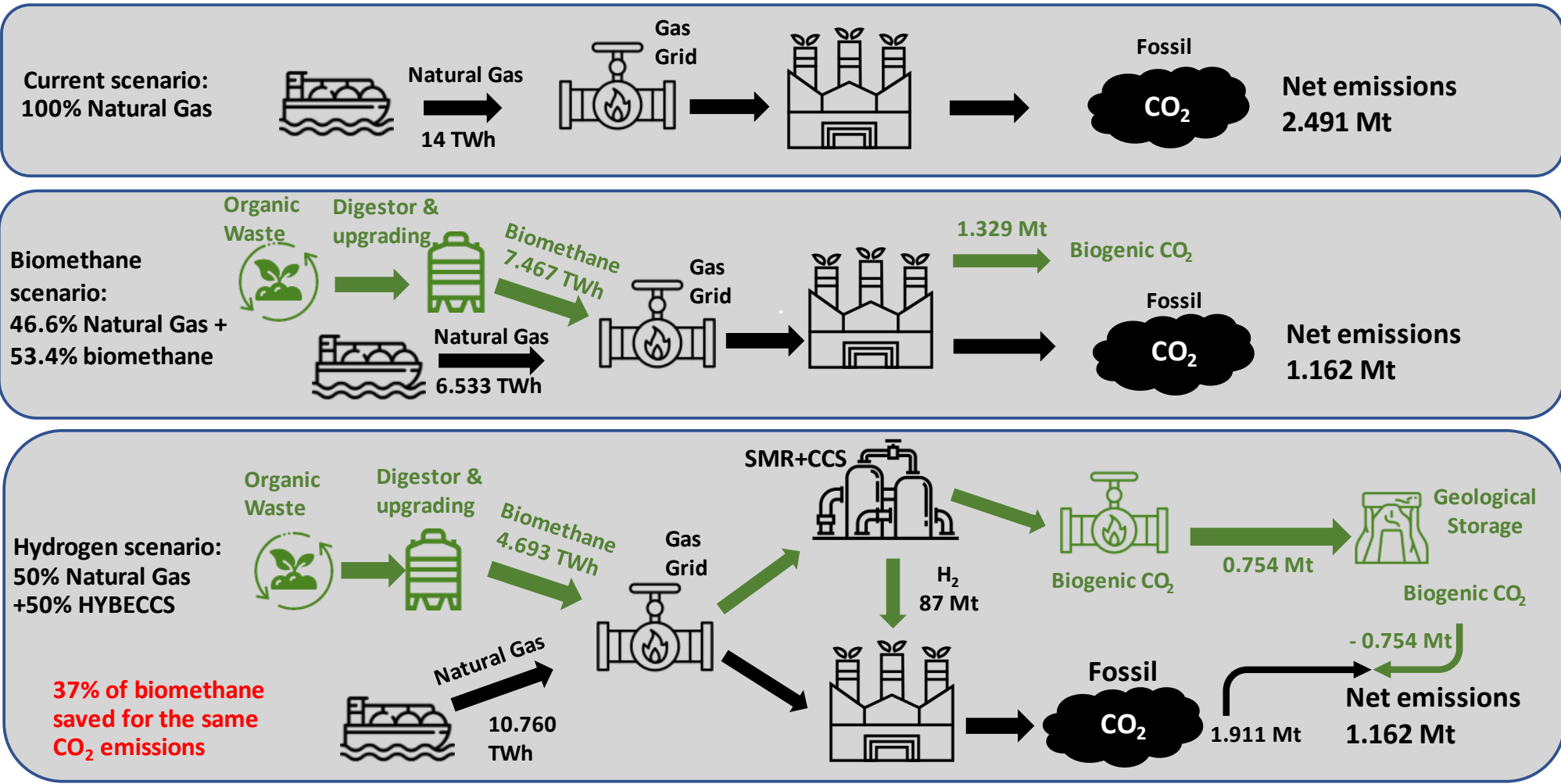
APLICACIÓN AL TRANSPORTE URBANO

Biohydrogen with negative CO₂ emissions from municipal solid waste for decarbonising the public bus fleet.
Application to the municipality of Madrid



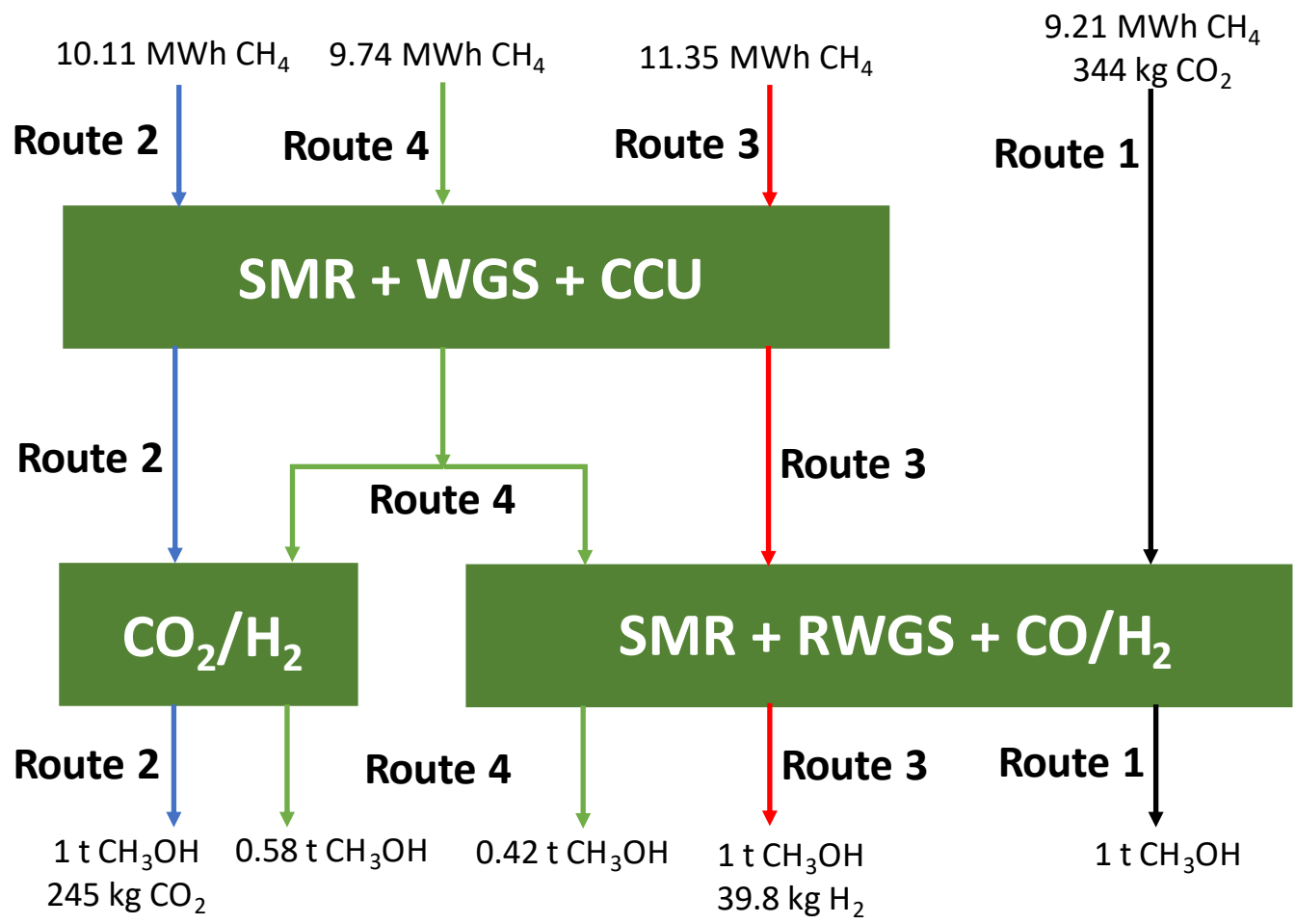
APLICACIÓN AL SECTOR CERÁMICO

Biohydrogen production through biomethane steam reforming with CCUS for decarbonizing Spain's tile industry



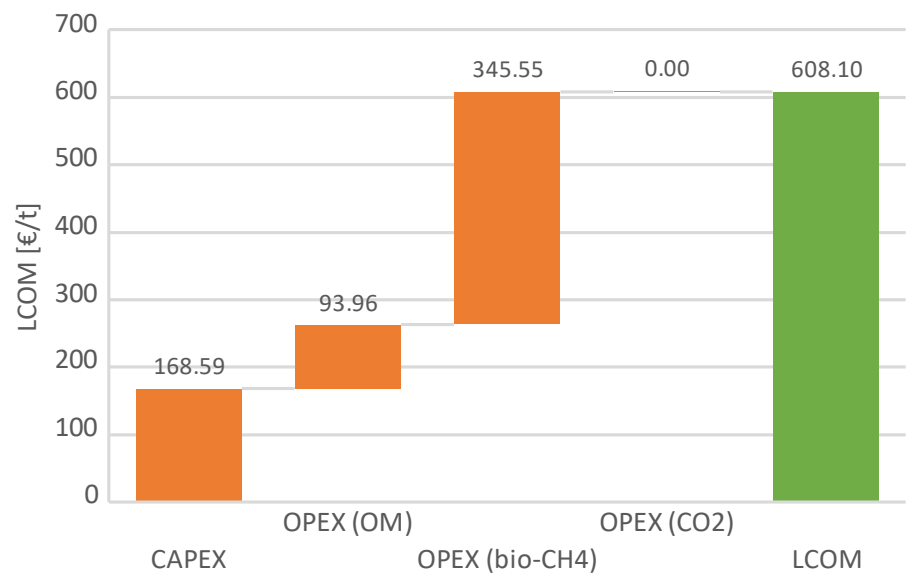
[Yagüe et al., 2024]

PRODUCCIÓN DE BIOMETANOL



POTENTIAL AND COSTS IN SPAIN WITH ROUTE 4 FROM MSW & LANDFILL GAS

- Up to 8 facilities (200 kt/year)
- Up to 1.6 Mt/year



CONCLUSIONES

- El SMR con CCS es una tecnología madura y comercial, común fuera de España.
- El SMR hasta ahora se ha empleado para convertir gas natural en **hidrógeno gris**, ante lo que hay 3 opciones:
 - Añadir captura de CO₂ fósil (**hidrógeno azul**, bajo en carbono).
 - Reemplazar gas natural por biometano (**hidrógeno verde**, biohidrógeno, neutro en carbono).
 - Usando biometano añadir captura de CO₂ (**biohidrógeno con emisiones negativas**, HyBECCS).
- El CCS empieza a despertar en España para sectores *hard-to-abate* ([almacenamiento Tarragona](#)).
- La [industria se fija en el biohidrógeno](#), aunque el [despegue del biometano en España va lento](#) en comparación con el [potencial](#).

REFERENCIAS

EFICIENCIAS

- [Silvian Baltac, Matt Wilson, Conor O'Sullivan, Cor Leguijt, Mart Beeftink, Isabel Nieuwenhuijse, Antonia Mattos, Diederik Jaspers, IEAGHG, "Low-Carbon Hydrogen from Natural Gas: Global Roadmap ", 2022-07, August 2022.](#)

COSTES

- [Luis Yagüe, José Ignacio Linares, Eva Arenas, José Carlos Romero \(2024\) Levelized Cost of Biohydrogen from Steam Reforming of Biomethane with Carbon capture and Storage \(Golden Hydrogen\). Application to Spain, Energies, 17, 1134.](#)

CCS

- Cortés, Navarrete, Captura, transporte y almacenamiento del CO₂ originado por el empleo de combustibles fósiles, Fundación Ciudad de la Energía (CIUDEN), 2011.
- [IGME, almacenes potenciales de CO₂.](#)

BIOMETANO

- [SEDIGAS, Estudio de la capacidad de producción de biometano en España, 2023.](#)
- [GASNAM, Mapa de plantas de producción de biometano.](#)



REFERENCIAS

APLICACIONES

- [Léonard Lefranc, José Ignacio Linares, Ana María Santos, Eva Arenas, Carlos Martín, Yolanda Moratilla \(2024\) Biohydrogen with negative CO2 emissions from municipal solid waste for decarbonising the public bus fleet. Application to the municipality of Madrid, Journal of Environmental Management, 371, 123258.](#)
- [Luis Yagüe, José Ignacio Linares, Eva Arenas, José Carlos Romero \(2024\), Biohydrogen production through biomethane steam reforming with CCUS for decarbonizing Spain's tile industry, Results in Engineering, 24, 103361.](#)
- [Luis Yagüe, José Ignacio Linares, Eva Arenas, José Carlos Romero, Decarbonising grey hydrogen production in Spain by means of bio-hydrogen with CCS \(HyBECCS\), XIV CNIT, Zaragoza, 2025.](#)
- [Arantza Rascón San Martín, Rutas y potencial para producir metanol verde en España. Directores: J.I. Linares, A. Santos Montes. Comillas-ICAI, 2024.](#)
- [José Ignacio Linares \(2026\), Biohidrógeno como fuente de CO2 biogénico. Una oportunidad para España, LinkedIn.](#)

Gracias por su atención

linares@comillas.edu

[Cátedra Fundación Repsol de Transición Energética](#)