

Oportunidad de producción de fertilizantes a partir de hidrógeno verde en Uruguay

Abril 2024



Revisión de la situación actual



Cámara de Comercio e Indústria
Uruguayo-Alemana
Deutsch-Uruguayische
Industrie- und Handelskammer

Publicado por

Cámara de Industria y Comercio Uruguayo-Alemana (AHK Uruguay)

Oficinas Registradas

Plaza Independencia 831, oficina 201
11100 Montevideo, Uruguay
info@ahkurug.com.uy
<https://www.uruguay.ahk.de/>

Reporte por:

Cámara de Industria y Comercio Uruguayo-Alemana (AHK Uruguay)
Plaza Independencia 831, oficina 201
11100 Montevideo, Uruguay

Autores

Luisa Rivas, Ficus Advisory S.A.

Revisores

Ficus Advisory S.A.
Cámara de Industria y Comercio Uruguayo-Alemana (AHK Uruguay)

Layout y Edición

Ficus Advisory S.A.

Copyrights

Imágenes:
Portada, Acrónimos, Pag 1, 2, 3, 5, 8, 9, 13, 19, 20, 21, 23: Canva

Figuras:

Figura 1: McKinsey y MIEM 2021.

Figuras 4, 5, 6, 14, 17: Hoja de ruta hidrógeno verde Uruguay 2023. Ministerio de Energía, Industrias y Minas del Uruguay.

Figuras 10, 11, 15: International Energy Agency

Aclaración:

Ficus Advisory es un líder en asesoría y desarrollo de proyectos de hidrógeno verde, especializado en la estructuración de proyectos que abarcan diversas regiones y tecnologías para la producción y uso de hidrógeno bajo en carbono. Con una amplia experiencia en el sector de las energías renovables, la empresa se destaca por su compromiso con el desarrollo sostenible y la innovación, posicionándose como referente en la industria. Ficus Advisory es el Líder del sector de “Transición Energética” de la red internacional de bancas asesoras de M&A “Globalscope Partners”, contribuyendo significativamente al avance de proyectos en todo el mundo.

El Programa Internacional de Fomento del Hidrógeno (H2Uppp) del Ministerio Federal de Economía y Protección del Clima (BMWK) de Alemania promueve proyectos y el desarrollo del mercado del hidrógeno verde en determinados países en desarrollo y emergentes como parte de la Estrategia Nacional del Hidrógeno.

La ejecución de H2Uppp corre a cargo de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH en nombre del Ministerio Federal de Economía y Acción por el Clima (BMWK). Las opiniones y recomendaciones expresadas no reflejan necesariamente las posiciones de las instituciones encargantes o de la agencia ejecutora.

Montevideo, Abril, 2024

Tabla de Contenido

Prólogo	1
Resumen ejecutivo	
Visión General	2
Hidrógeno verde	
Rol del hidrógeno verde en la descarbonización	3
Oportunidad para Uruguay	5
Amoníaco y Fertilizantes Verdes	
Contexto Global	9
Contexto Uruguay	13
Desafíos y Oportunidades	19
Conclusiones	20
Referencias	22

Tabla de Figuras

Figura 1. Trayectorias de emisiones de CO2 por año	3
Figura 2. Consumo en toneladas mundiales de hidrógeno para el año 2050	4
Figura 3. Generación de energía eléctrica en Uruguay 2016-2022	5
Figura 4. Capacidades potenciales (GW) según fuente renovable en Uruguay.	6
Figura 5. Costo nivelado de electricidad (LCOE) para Uruguay	6
Figura 6. Curva de costos nivelados de producción de hidrógeno en Uruguay (LCOH)	7
Figura 7. Mercado doméstico total abordable para el Hidrógeno y derivados, Uruguay, 2040.	7
Figura 8. Tren de proceso de producción de amoníaco y urea verde	9
Figura 9. Demanda proporcional mundial de amoníaco por sector en el año 2021	10
Figura 10. Emisiones mundiales directas de CO2 de producción de químicos primarios	11
Figura 11. Tipo de Amoníaco (color) según su método de producción	12
Figura 12. Importación de fertilizantes anual en Uruguay periodo 2012 - 2019	13
Figura 13. Importación de fertilizantes en Uruguay durante el 2019 vs el amoníaco necesario para su producción local)	14
Figura 14. Disponibilidad de CO2 biogénico en Uruguay nacional de distintas fuentes	15
Figura 15. Costo nivelado de producción de amoníaco (LCOA) en diferentes vías de precios de gas, electricidad y CO2	15
Figura 16. Costos de captura de CO2 dependiendo de la fuente	16
Figura 17. Costo de producción de amoníaco verde en Uruguay	18

Acrónimos

BCU: Banco Central del Uruguay

CAPEX: Capital Expenditure (Gastos de Capital)

CCUS: Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono

CO₂: Dióxido de Carbono

DAC: Captura Directa de Aire

EPC: Engineering, Procurement and Construction (Ingeniería, Adquisiciones y Construcción)

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GtCO₂: Gigatoneladas de Dióxido de Carbono

GW: Gigawatt

GWh: Gigawatt hora

H₂: Hidrógeno

IEA: Agencia Internacional de Energía

IPCC: Panel Intergubernamental del Cambio Climático

LCOA: Costos Nivelados de Amoníaco (del inglés Levelized Cost of Ammonia)

LCOE: Costos Nivelados de Energía (del inglés Levelized Cost of Energy)

LCOH: Costos Nivelados de Hidrógeno (del inglés Levelized Cost of Hydrogen)

MEF: Ministerio de Economía y Finanzas de Uruguay

MGAP: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (Uruguay)

MIEM: Ministerio de Industria, Energía y Minería (Uruguay)

MtCO₂e: Millones de toneladas de CO₂ equivalente

MW: Megawatt

MWh: Megawatt hora

NH₃: Amoníaco

NH₂CONH₂: urea

OPEX: Operational Expenditure (Gastos de Operaciones)

SMR: Reformado de Metano con Vapor

USD: Dólares Estadounidenses

UTE: Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (Uruguay)

WACC: Weighted Average Cost of Capital (Costo Promedio Ponderado de Capital)



Prólogo

La transición hacia una economía más sostenible y respetuosa con el medio ambiente se ha convertido en un imperativo global, y Uruguay no es la excepción. Dentro de este contexto, el hidrógeno verde emerge como una solución prometedora, capaz de revolucionar sectores industriales enteros con su potencial para la descarbonización. Uno de los campos más prometedores para su aplicación es la industria de los fertilizantes, un sector crítico para el mundo y la economía uruguaya.

Uruguay, con su sólido historial en el desarrollo y la implementación de energías renovables, se posiciona como un candidato ideal para liderar esta transformación hacia la producción de fertilizantes verdes basados en hidrógeno. Este enfoque no solo alinea al país con los objetivos globales de sostenibilidad y reducción de emisiones de carbono, sino que también presenta una oportunidad única para redefinir su industria agrícola, reducir la dependencia de importaciones de fertilizantes de origen fósil, y abrir nuevos mercados de exportación.

El presente reporte se enfoca en analizar el potencial de Uruguay para desarrollar una industria de fertilizantes verdes a partir del hidrógeno verde. A través de un estudio bibliográfico y detallado, se exploran las ventajas competitivas del país, incluyendo su capacidad para generar energía limpia, ventajas competitivas y el marco regulatorio favorable. Se considera, asimismo, el contexto global y las tendencias emergentes en la producción de hidrógeno verde, así como las barreras y desafíos a superar para realizar plenamente este potencial.

Este reporte busca proporcionar una base preliminar para la toma de decisiones estratégicas, destacando la importancia de invertir en investigación y desarrollo, y en la creación de políticas públicas que incentiven la producción y el uso de fertilizantes verdes. Al hacerlo, Uruguay no solo podría avanzar hacia la autosuficiencia en un recurso crítico sino también posicionarse como líder en la economía verde global, generando beneficios ambientales, económicos y sociales tanto a nivel local como internacional.





Resumen Ejecutivo

Con más del 90% de su matriz eléctrica derivada de fuentes renovables, Uruguay apunta a convertirse en un jugador competitivo en el mercado de hidrógeno verde. Se proyecta que para 2030, el país podría alcanzar costos de producción de hidrógeno verde (H₂) entre 1,2 y 1,4 USD por kilo, lo que lo posiciona favorablemente para generar un mercado local de fertilizantes verdes valorado entre 600 y 1.000 millones de dólares.

La Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde de Uruguay estima que para 2030, los costos nivelados de energía (LCOE) de la energía solar y eólica terrestre estarán entre los rangos de 16 y 19 USD/MWh y 26 - 28 USD/MWh, respectivamente, lo que es altamente competitivo y se encuentra dentro de los valores estimados por las agencias internacionales para lograr entrar en el mercado de amoníaco y urea verdes.

Se estima que se requeriría una producción de aproximadamente 218 mil toneladas de amoníaco verde para producir la misma cantidad de fertilizantes nitrogenados que se importaron en Uruguay durante el año 2019, lo que demuestra la existencia de un mercado local para estos productos.

Los estudios muestran que los costos nivelados de producción de amoníaco verde (LCOA) en Uruguay estarían (año 2022) en el rango de 1.138 - 1.215 USD por tonelada, y para la urea verde, entre 685 – 728 USD por tonelada. Se espera que para 2030, el LCOA caiga a 480 USD por tonelada y, para 2050, a 310 USD por tonelada de amoníaco, costos altamente competitivos con los valores actuales de amoníaco “gris”.

El principal desafío para Uruguay radica en los altos costos actuales de producción y la necesidad de infraestructura para el hidrógeno verde y la captura de Dióxido de Carbono (CO₂). Sin embargo, la proyección de baja de costos en la energía renovable y la tecnología de electrolizadores, junto con la ventaja de disponer de CO₂ biogénico, favorecen la producción de urea verde en el país.

Uruguay tiene acceso a CO₂ biogénico a través de la biomasa, con costos de captura que pueden ser competitivamente bajos, entre 30 – 60 USD por tonelada según valores referenciales, favoreciendo la producción de urea verde.

Uruguay se encuentra ante una oportunidad única para liderar la producción de fertilizantes verdes en la región, aprovechando su capacidad para generar energía limpia a precios competitivos y su compromiso con la sostenibilidad. Enfocarse en descarbonizar el sector agrícola se alinea con las prioridades del país y lo posiciona como un líder potencial en el sector de fertilizantes verdes a nivel mundial.

Hidrógeno verde

Tomando el papel protagónico en la descarbonización

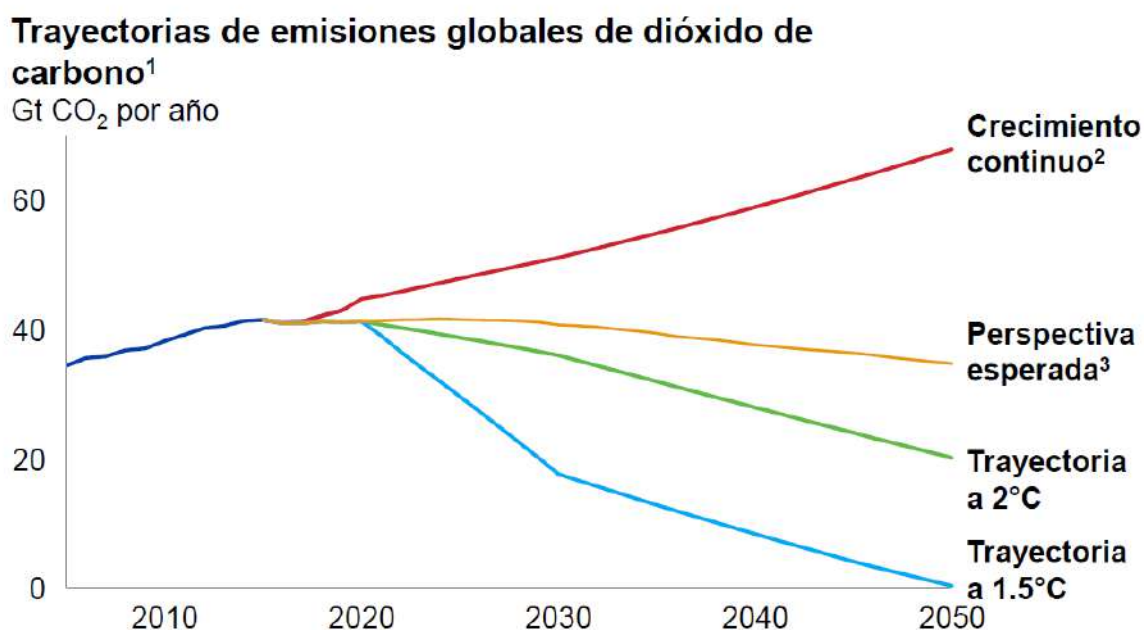
El hidrógeno verde está asumiendo un papel protagonista en la descarbonización global, especialmente en sectores industriales clave como el sector agroindustrial. El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) subraya la necesidad urgente de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la mitad para 2030, para limitar el calentamiento global a 1,5 °C [1] (Figura 1).

En este contexto, el hidrógeno verde, producido exclusivamente a partir de energías renovables, se perfila como una solución crucial. Actualmente, el 99,6% del hidrógeno mundial proviene de hidrocarburos, principalmente a través de métodos que generan emisiones GEI, como el hidrógeno gris y marrón [2].

La demanda actual se centra en refinerías, producción de amoníaco y otros usos industriales. En contraste, el hidrógeno verde se produce mediante electrólisis del agua, evitando emitir CO₂ durante su producción, y su uso se considera sostenible.

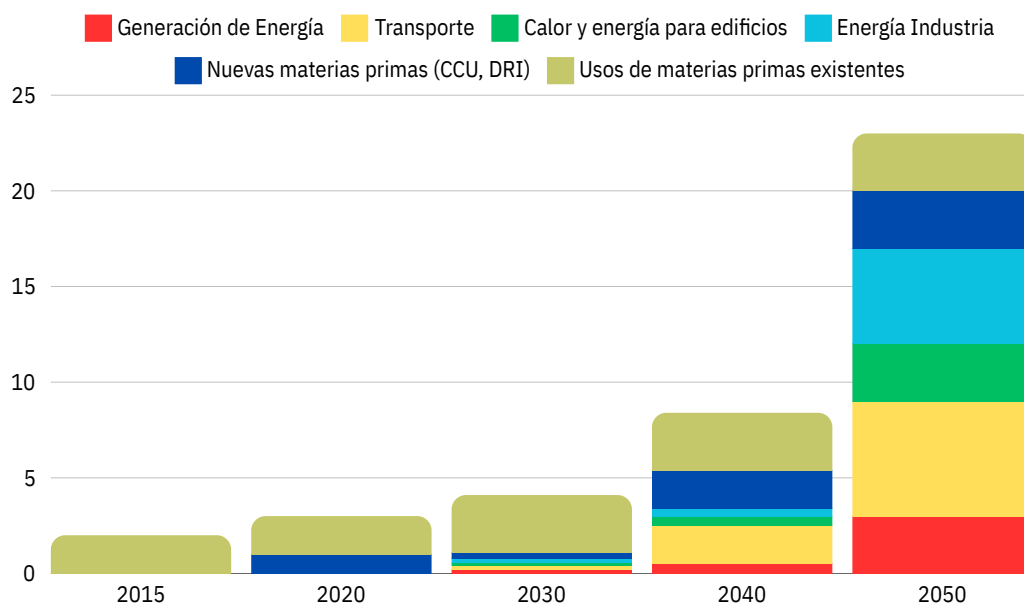
Se espera que la producción de hidrógeno verde aumente y reemplace progresivamente al hidrógeno gris. Según McKinsey, las estimaciones de la demanda mundial de hidrógeno hasta 2050 varían, pero se prevé un crecimiento constante, especialmente después de 2030 [3] tal como se observa en la Figura 2, con un crecimiento que puede multiplicarse por 10 para el año 2050.

Figura 1 . Trayectorias de emisiones de CO₂ por año.



Fuente: McKinsey y MIEM 2021

Figura 2 . Consumo en toneladas de hidrógeno para el año 2050



Fuente: Elaboración propia a partir de información de McKinsey y MIEM 2021.

El transporte del hidrógeno verde sigue siendo un desafío, pero se están estudiando distintas opciones y mecanismos que faciliten su transporte. El amoníaco se perfila como una solución viable, especialmente en el transporte marítimo, sin embargo, la descarbonización de la cadena de valor del amoníaco tiene mucho más potencial que solo ser un carrier de hidrógeno, teniendo un gran beneficio en la descarbonización de fertilizantes en la agricultura.

Los fertilizantes derivados del amoníaco verde se producen en su gran mayoría a partir de hidrógeno verde, nitrógeno atmosférico y CO₂ biogénico, utilizando procesos de síntesis con bajas emisiones de gases de efecto invernadero. El amoníaco verde, obtenido a través de la electrólisis del agua y la captura de nitrógeno del aire, es fundamental en la fabricación de estos fertilizantes. Su producción libre de carbono ofrece una alternativa sustentable a los fertilizantes tradicionales, que suelen basarse en la síntesis de amoníaco a partir de gas natural, un proceso intensivo en emisiones de CO₂.

Según la Food and Agriculture Organization (FAO), "los fertilizantes verdes, derivados del amoníaco verde, tienen el potencial de reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción de alimentos, al tiempo que mejoran la eficiencia de los nutrientes en la agricultura" [4].

Uno de los mayores beneficios de los fertilizantes verdes es su capacidad para reducir la dependencia de los fertilizantes tradicionales basados en combustibles fósiles. Sin embargo, la adopción a gran escala de los fertilizantes verdes enfrenta desafíos, entre ellos se encuentran los costos de producción, la disponibilidad de hidrógeno verde a gran escala y la necesidad de infraestructuras y cadenas de suministro adaptadas.

Para superar estos desafíos, es necesario invertir en investigación y desarrollo, así como en políticas que fomenten la transición hacia una agricultura más sostenible y baja en carbono. Con el apoyo adecuado, los fertilizantes verdes podrían desempeñar un papel crucial en la transformación de la agricultura y en la mitigación de los efectos del cambio climático.

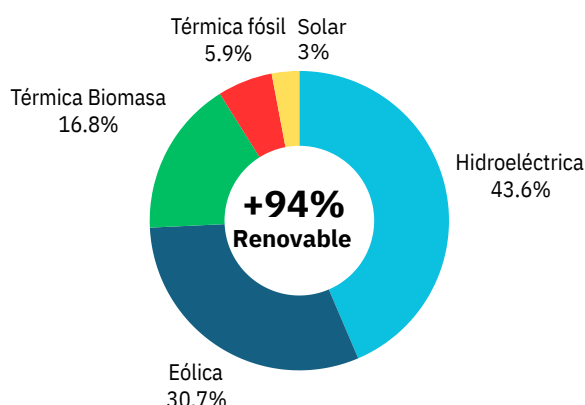
Oportunidad para Uruguay



De acuerdo con el Ministerio de Industrias, Energía y Minas del Uruguay (MIEM) el país está culminando la primera etapa de su transformación de energía a partir de la descarbonización casi total de la matriz eléctrica.

En el promedio de los últimos cuatro años la participación de las renovables en la matriz eléctrica ha sido mayor al 90% (94% en el período entre 2016 y 2022) [3] tal como se puede observar en la Figura 3.

Figura 3. Generación de energía eléctrica en Uruguay 2016-2022.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del MIEM.

La segunda etapa de la transición de Energía en Uruguay incluye diversos desafíos, entre los cuales se encuentran el desarrollo de una economía del hidrógeno y la continuación de la descarbonización del sector energético y de producción de materias primas.

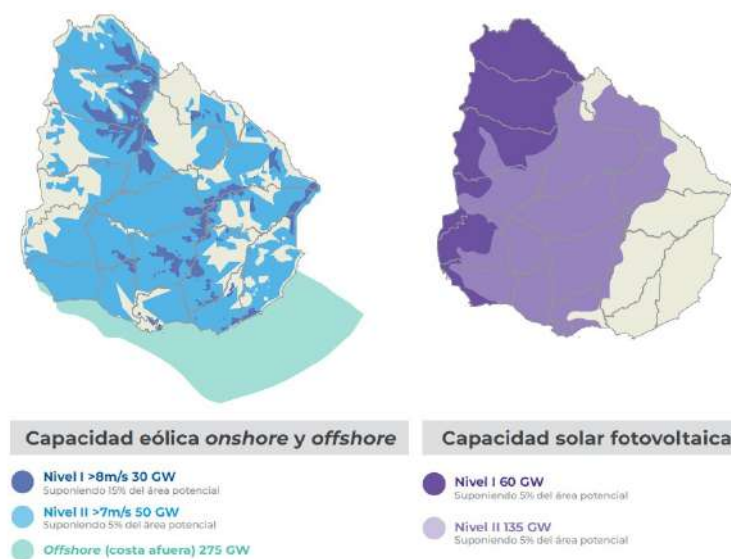
En cuanto al desarrollo de una economía del hidrógeno, Uruguay tiene muchos atributos para ser un productor de bajo costo de hidrógeno y fertilizantes verdes. Ello redunda en un buen potencial para ser exportado -a la vez que consumido localmente- de forma directa y ser utilizado en industrias relacionadas a la producción de materias primas y química verdes, quienes, a su vez, podrán ser consumidas localmente o exportadas.

Entre los principales atributos del país se pueden mencionar sus excelentes condiciones de recursos naturales para la producción de energías renovables, su reconocida estabilidad institucional, su atractivo para inversores de primer nivel en energías y su acceso a financiamiento con términos y condiciones favorables.

Todo lo anterior se traduce en condiciones macro y microeconómicas, que permiten la producción de energía eléctrica a bajo costo. En este sentido, Uruguay ha anunciado recientemente su intención de comenzar a recorrer un camino de aprendizaje en lo que refiere a la producción hidrógeno verde y su potencial uso en sectores no industriales.

De acuerdo con la Estrategia País de Hidrógeno Verde del MIEM los costos de producción de hidrógeno verde ubican a Uruguay entre los más bajos a nivel mundial. Estiman asimismo que los recursos naturales energéticos del país puedan representar un potencial de hasta +70 GW eólico onshore (en tierra) y +140 GW solar, con excelentes factores de potencia. Del mismo modo, para la parte offshore del país su estimación es de un potencial de 275 GW eólicos. (Figura 4)

Figura 4 . Capacidades potenciales (GW) según fuente renovable.



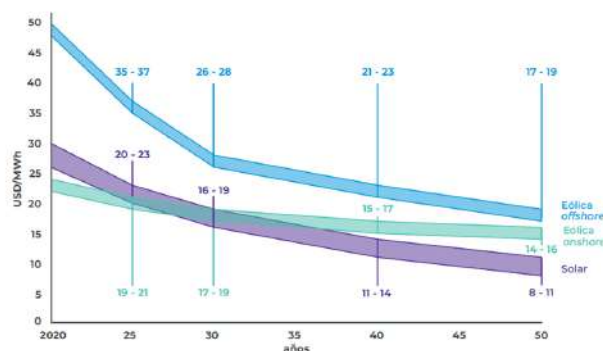
Fuente: Hoja de Ruta Hidrógeno verde MIEM 2023.

Según los datos publicados por McKinsey, las características de las energías solar y eólica en Uruguay permitirían alcanzar, en 2030, costos nivelados de energía (LCOE), con valores que se ubicarían en el rango comprendido entre 16 y 19 USD/MWh.

Por su parte, la energía eólica offshore presentaría costos comprendidos en el rango entre 26 y 28 USD/MWh, impulsada por reducciones del CAPEX y mejoras tecnológicas.

La tendencia de costos decrecientes se mantendría en el tiempo (aunque moderando su caída), y permitiría alcanzar en 2040 costos de hasta 11 USD/MWh para el aprovechamiento del recurso solar a través de la tecnología fotovoltaica, 15 USD/MWh para el eólico y 21 USD/MWh para el eólico offshore, tal como se puede observar en la Figura 5.

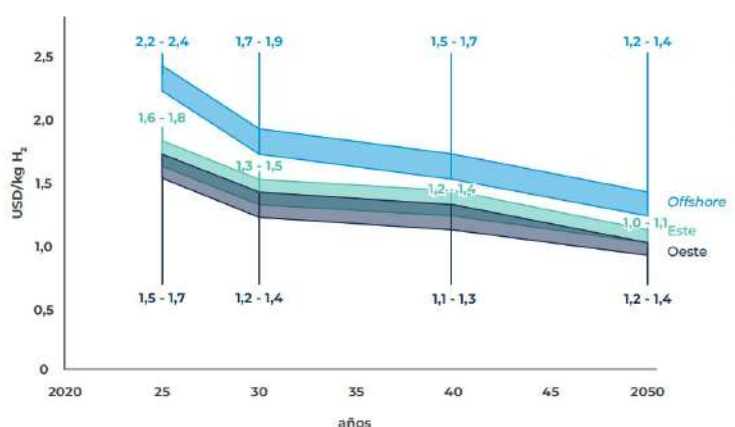
Figura 5 . Costo nivelado de electricidad para Uruguay (basado en el 5% WACC, no incluye costos de transporte) a escala (+500 MW), USD/MWh.



Fuente: Hoja de Ruta Hidrógeno verde MIEM.

A partir de ello, se proyectan para 2030 costos de producción de hidrógeno que podrían llegar a 1,2-1,4 USD por kilo, tal como se puede apreciar en la Figura 6.

Figura 6 . Curva de costos nivelados de producción de hidrógeno en Uruguay (LCOH).



Fuente: Hoja de Ruta Hidrógeno verde MIEM 2023.

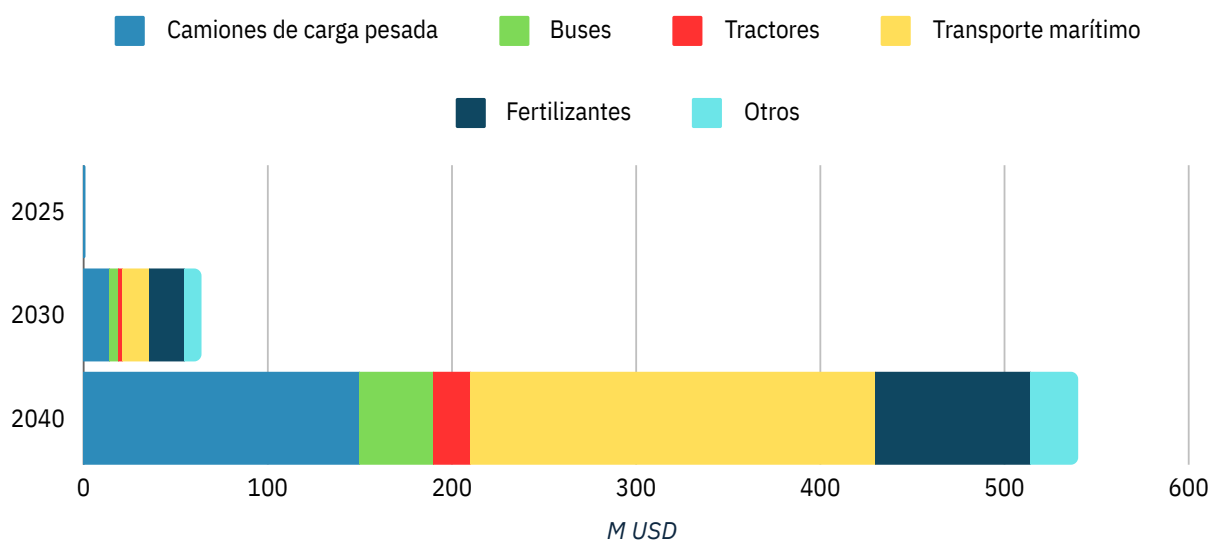
Logrando estos costos de producción, Uruguay se posicionaría como un exportador natural de hidrógeno, pudiendo producirlo a gran escala, especialmente para transporte y materias primas, pero también, como un potencial productor de amoníaco como materia prima para fertilizantes verdes.

En este sentido, Uruguay está desarrollando una economía del hidrógeno tanto para el mercado local como para la exportación, el cual se espera para 2040 podría alcanzar de 600 a 1.000 millones de dólares impulsado por el transporte marítimo doméstico, la generación de energía eléctrica y la producción

de amoníaco; y de más de 500 millones de dólares en el mercado doméstico, tal como se puede observar en la Figura 7.

Los fertilizantes verdes se posicionan como uno de los principales mercados domésticos, considerando la intensidad del uso de fertilizantes en el país y el hecho de que, hoy en día son de origen fósil y se importan casi en su totalidad; la posibilidad de crear una industria nacional de este insumo de origen renovable resulta fundamental.

Figura 7 . Mercado doméstico total abordable para el Hidrógeno y derivados, Uruguay, 2040.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del MIEM

Además, Uruguay se posicionará ventajosamente frente a los países de la región ya que se destaca en los siguientes aspectos:

- **Matriz eléctrica con alta participación de energías renovables:** Los sistemas y equipos de producción de hidrógeno verde o sus derivados requieren de fuentes continuas de electricidad. Uruguay cuenta con una de las redes eléctricas más descarbonizadas del mundo, llegando hasta un 100% de producción renovable en días particulares. Esto permitirá que los parques de producción puedan estar conectados a la red y aún así asegurar su certificación de “Hidrógeno Verde”. [3]
- **Marco institucional favorable:** En 2021 Uruguay elaboró la hoja de ruta para la producción de hidrogeno verde en el país. El Banco Central del Uruguay (BCU) presentó una estrategia para la diversificación de las reservas internacionales a partir de fondos de inversión de bonos verdes. El BCU y el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF) acordaron implementar una Mesa de Finanzas Sostenibles y se aprobó un impuesto sobre las emisiones de CO2 por el uso de combustibles fósiles. [19]
- **Certificados de energía renovable:** Son un mecanismo de acreditación, que entregará UTE junto con el MIEM en formato electrónico, para asegurar que el consumo de energía eléctrica corresponde a generación de fuentes renovables. Esto asegurará la trazabilidad de la energía y resultará clave para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde y sus derivados. [3]
- **Disponibilidad de CO2 biogénico:** Los proyectos de fertilizantes verdes, como la urea, necesitarán CO2 para su producción, pero esta fuente de CO2 debe ser biogénica para garantizar las bajas emisiones en el proceso. El país cuenta con disponibilidad de CO2 biogénico, asociado a instalaciones industriales que explotan biomasa proveniente de producción sostenible, en la proximidad de zonas de buena disponibilidad de recursos renovables. [18]



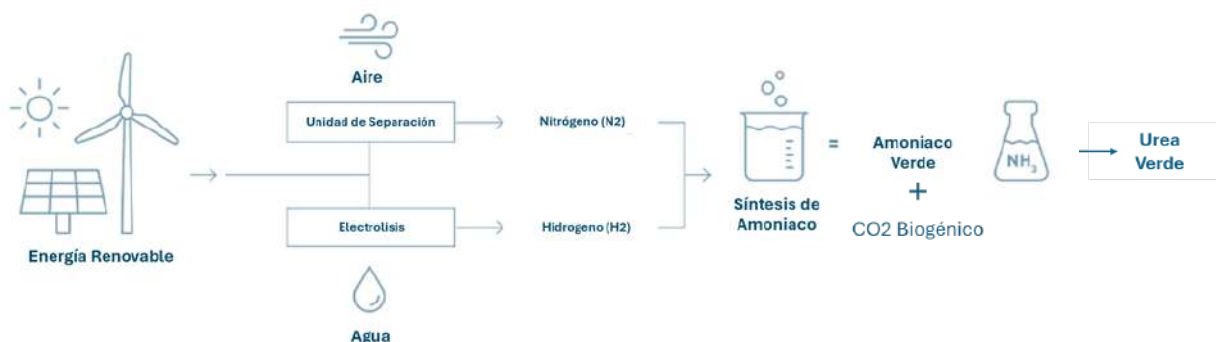
Amoníaco “verde” y Fertilizantes Sustentables

Contexto Global

El amoníaco es un compuesto químico crucial en la industria de los fertilizantes, se utiliza principalmente como materia prima de los fertilizantes nitrogenados. El amoníaco se produce a través del proceso Haber-Bosch, que combina hidrógeno y nitrógeno en condiciones de alta presión y temperatura en presencia de un catalizador [5], tal como se observa en la Figura 8. Éste proceso puede utilizar diferentes fuentes de hidrógeno, lo que da lugar a diferentes "colores" de amoníaco, tal como se explica en la página 12. El amoníaco verde es el producido a partir de hidrógeno verde, obtenido a su vez mediante electrólisis del agua utilizando energías renovables.

El mercado del amoníaco consume 33 millones de toneladas de hidrógeno anualmente, siendo el segundo sector más demandante de hidrogeno después de la refinación de petróleo para el año 2021, que alcanzó 94 millones de toneladas [6].

Figura 8. Tren de proceso de producción de amoníaco verde y urea Verde



Fuente: Elaboración propia.

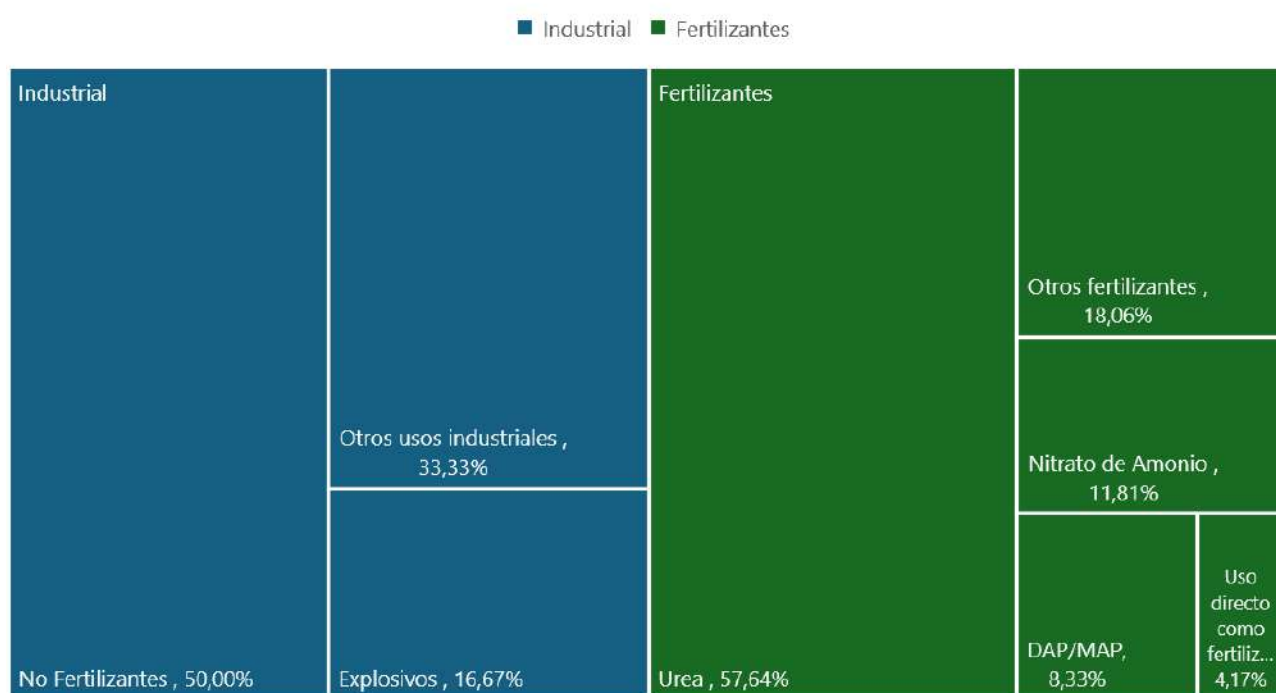
El amoníaco en su forma directa rara vez se usa en los campos debido a la necesidad de equipos especializados y condiciones climáticas particulares [6], por lo que generalmente se transforma en otros fertilizantes.

Aproximadamente el 54% de todos los fertilizantes se fabrican con amoníaco, representando el 77% de la demanda mundial de NH₃, mientras que el 23% restante se utiliza en aplicaciones industriales como la fabricación de productos químicos, explosivos y plásticos (Figura 9) [6].

Dentro de la demanda mundial de NH₃ destinada a fertilizantes para el año 2021, más del 57% fue para la producción de urea (Figura 9).

La urea (NH₂CONH₂) se produce a partir de la combinación de amoníaco junto con CO₂ (Figura 8). Para asegurar que sea un proceso bajo en emisiones, se debe utilizar amoníaco “verde” y CO₂ de origen biogénico. Dada la importancia del amoníaco para la industria de la urea, los niveles de producción de ambos productos están fuertemente relacionados. [14]

Figura 9. Demanda mundial proporcional de amoníaco por sector en el año 2021



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de BloombergNEF (6).

En términos de producción mundial, durante el año 2023 la capacidad de producción de NH₃ alcanzaba los 243 millones de toneladas al año, con China representando casi un tercio de esta. Los siguientes mayores productores son Rusia, India y los EE. UU. [6]

Entre los principales importadores de amoníaco a nivel mundial destacan la Unión Europea, India y Estados Unidos. En LATAM el principal país importador es Brasil. [9]

En términos de exportación, los principales países y regiones exportadores son Arabia Saudita, Rusia y Trinidad y Tobago, con más del 50% de las exportaciones totales de amoníaco a nivel mundial, esto se debe principalmente a las importantes reservas de gas natural con las que cuentan estos países [9].

En términos de costos de producción, éstos varían ampliamente por región, desde alrededor de 100 a 1.000 USD por tonelada, dependiendo de los costos y fuentes de energía de la región, pero han promediado 305 - 500 USD por tonelada desde 2013. [6]

Asia Occidental, Europa Oriental y América del Norte son las áreas más económicas para producir amoníaco, siendo China normalmente el productor marginal (por lo tanto, estableciendo el precio global). Europa Occidental está en el extremo superior de los costos, debido a los altos precios de la energía.

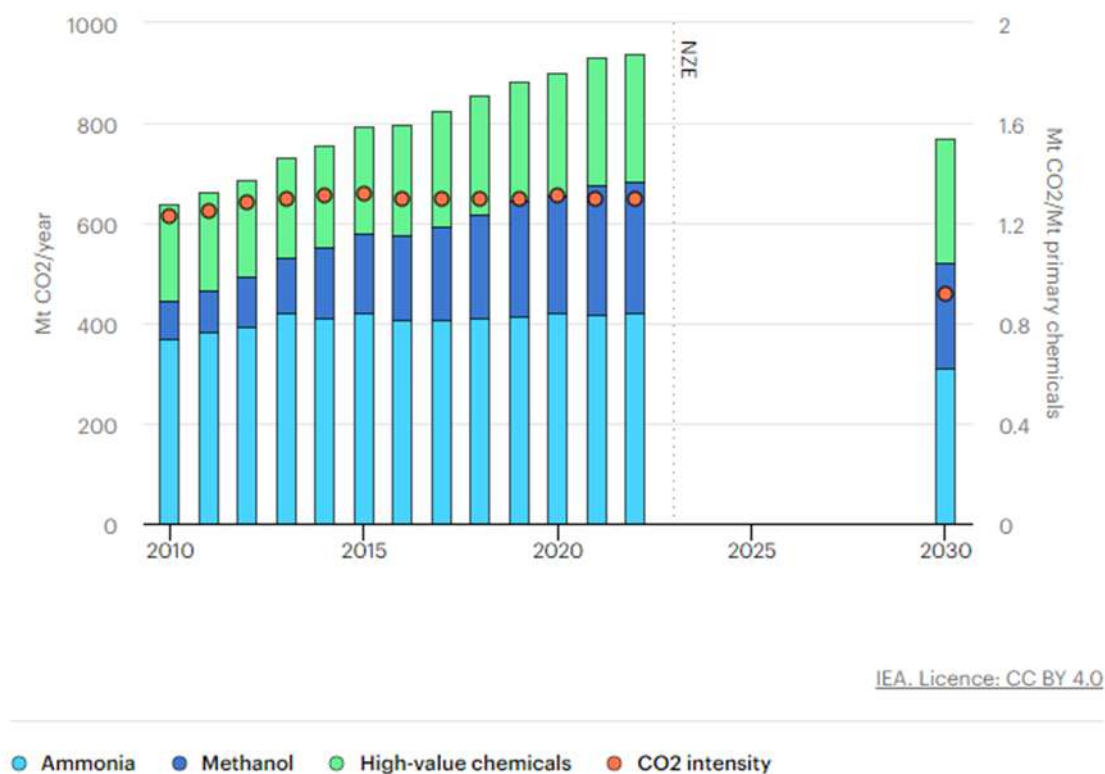
En términos de emisiones de CO₂, la producción de amoníaco emite aproximadamente el 2%, o 500 millones de

toneladas, de las emisiones globales equivalentes de CO₂ (MtCO₂e) [6].

Entre los químicos primarios, el amoníaco es el mayor emisor según la Agencia Internacional de Energía [7], con alrededor del 90% de las emisiones provenientes de la producción de hidrógeno utilizado como materia prima [8]

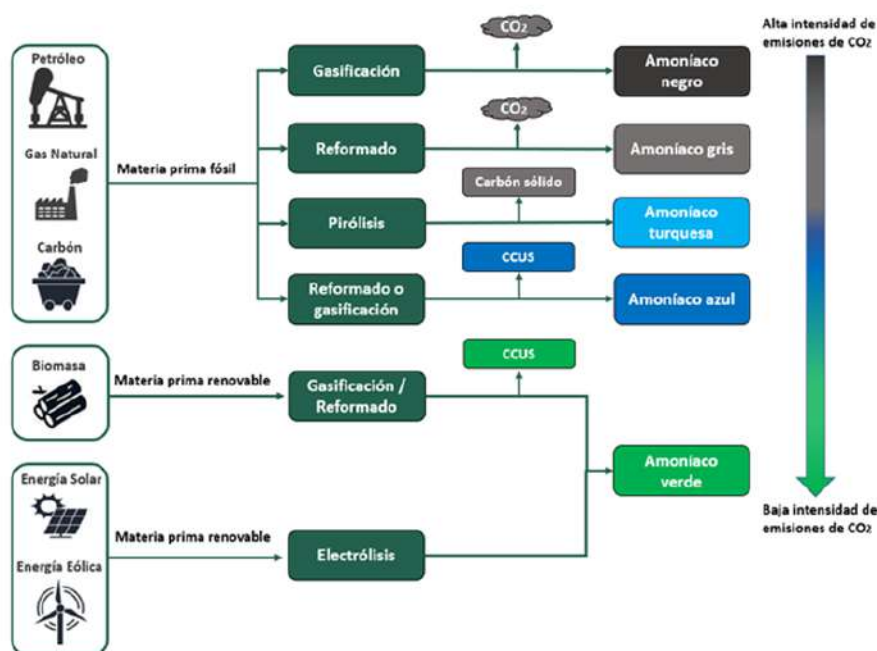
Dado que el proceso de producción de amoníaco es básicamente estándar, el “color” del amoníaco, o las emisiones asociadas varían según la fuente de energía primaria y los métodos utilizados en su producción.

Figura 10. Emisiones directas de CO₂ de producción de químicos primarios



Fuente: IEA (7)

Figura 11. Tipo de amoníaco según su método de producción



Fuente: IEA (7)

El amoníaco "gris" se produce a partir del reformado de gas natural mediante vapor de agua a temperaturas entre 700-1.000°C. Esta reacción descompone el gas en monóxido de carbono e hidrógeno, y luego el CO se convierte en dióxido de carbono e hidrógeno al reaccionar con vapor. También es posible obtener hidrógeno a partir del reformado de petróleo o carbón, pero en menor medida. Este proceso emite aproximadamente 9 kg de CO₂ por cada kg de hidrógeno generado.

El amoníaco azul se produce de manera similar al gris, utilizando gas natural (SMR), pero con la diferencia de que el CO₂ emitido se captura, reutiliza o almacena (CCUS) como subproducto, que puede destinarse a la producción de urea, por ejemplo.

El amoníaco negro y turquesa se obtienen mediante la gasificación y pirólisis del carbón, respectivamente.

El amoníaco verde se produce utilizando hidrógeno verde, que a su vez se obtiene mediante electrólisis con electricidad proveniente de fuentes renovables, como se puede observar en la Figura 11.

Es importante mencionar que para que el amoníaco sea considerado completamente "verde", el nitrógeno también debe obtenerse utilizando electricidad renovable. En este proceso, tanto el hidrógeno como el nitrógeno se introducen en el proceso Haber-Bosch tradicional, lo que resulta en la ausencia de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de hidrógeno, nitrógeno y amoníaco.

Actualmente, la producción de amoníaco verde es casi inexistente en todo el mundo [9], pero se espera que esto cambie en la próxima década. Varios proveedores de combustibles y tecnología están trabajando en soluciones para producir amoníaco verde a escala comercial.

En el contexto de Uruguay, la producción y uso de amoníaco sería una oportunidad para el sector de fertilizantes verdes, especialmente la urea verde, significando una mejora en la sostenibilidad de la agricultura y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con este sector.

Amoníaco “verde” y Fertilizantes Sustentables

Contexto Uruguay

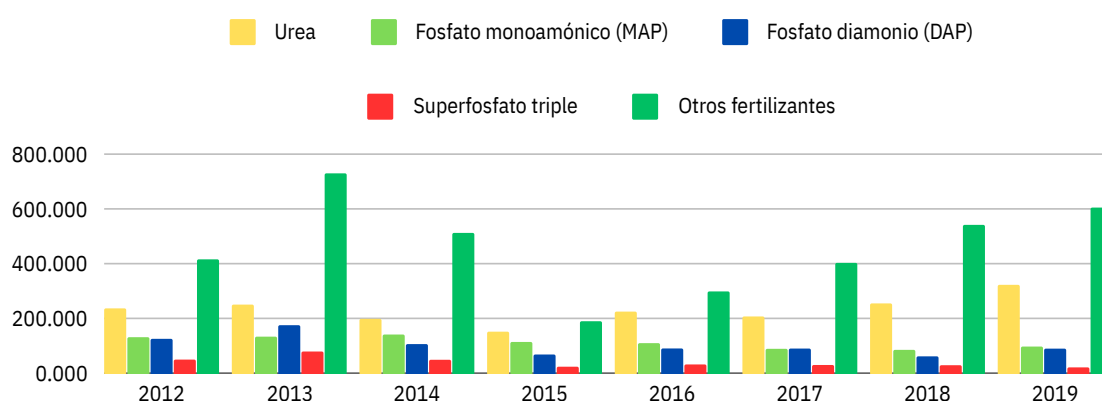
En Uruguay, el sector agrícola junto con las industrias agroalimentarias representa cerca del 82% de las exportaciones y el 11% del Producto Interno Bruto del país [10], proporcionando empleo a unas 206 mil personas, lo que supone alrededor del 14% de la fuerza laboral.

La urea, por su rica concentración de nitrógeno, se destaca como el fertilizante más empleado, siendo hasta la fecha un producto 100% importado, ya que Uruguay no cuenta con producción propia. Durante el año 2019, se importaron 332 mil toneladas de urea [11], y durante los últimos 10 años se ha mantenido en un promedio de importación de aproximadamente 230 mil toneladas anuales, tal como se puede observar en la Figura 12.

De acuerdo con Yara, se necesitan 0,57 toneladas de amoníaco para hacer una tonelada de urea [12]. Basándose en lo anterior, un escenario importante para analizar en Uruguay es la oportunidad que se presenta en cuanto a la producción de fertilizantes nitrogenados, utilizando amoníaco verde como base.

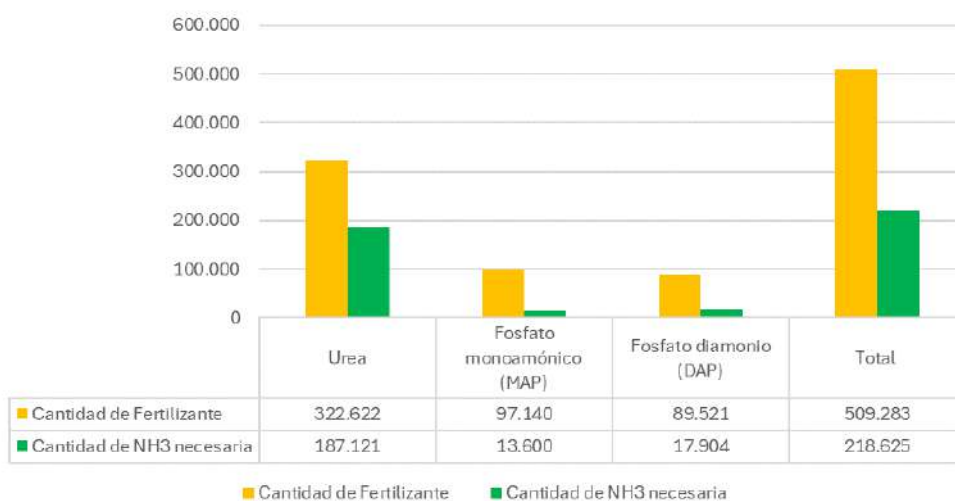
En la Figura 13 se muestran los principales fertilizantes nitrogenados importados en Uruguay durante el año 2019, así como la cantidad de amoníaco que se necesitaría para producirlos. Estos datos muestran el potencial mercado doméstico que habría para el país.

Figura 12. Importación de fertilizantes anual en Uruguay periodo 2012 - 2019



Fuente: Elaboración propia en base a información de MGAP

Figura 13. Importación de fertilizantes en Uruguay durante el 2019 vs el amoníaco necesario para su producción local



Fuente: Elaboración propia en base a información de MGAP

Se requerirían aproximadamente 218 mil toneladas de amoníaco verde para producir la misma cantidad de fertilizantes nitrogenados que se importaron durante el año 2019. Cabe resaltar que el fertilizante individual más importado y relevante es la urea, que es el fertilizante nitrogenado más utilizado a nivel mundial [9].

Se necesitan al menos 0,73 toneladas de CO₂ para producir 1 tonelada de urea [13]. Para producir el 100% de la urea que se importó en el 2019 en Uruguay, será necesario incorporar alrededor de 232 mil toneladas de dióxido de carbono. Sin embargo, para que la urea producida con amoníaco verde sea considerada totalmente carbono neutral, sería necesario garantizar que el CO₂ utilizado sea de carácter biogénico.

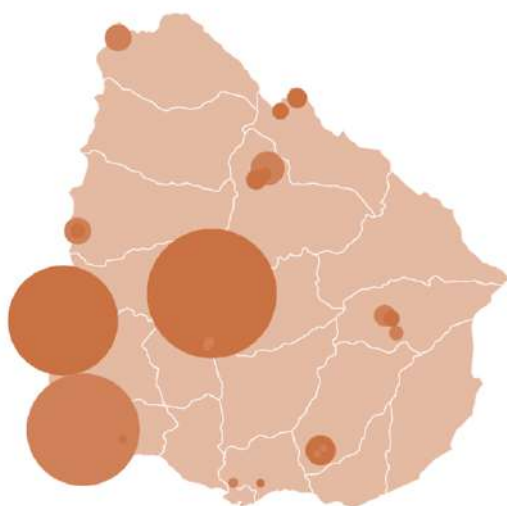
El país cuenta con fuentes de CO₂ biogénico disponible, dejándolo en una posición ventajosa en la región [18]. Este CO₂ biogénico proviene principalmente de instalaciones industriales que utilizan biomasa, como cáscaras de arroz, bagazo de caña de azúcar, residuos forestales y procesos de fermentación durante la producción de biocombustibles, entre otros.

Se estima que las emisiones de CO₂ biogénico para el año 2024 que podrían utilizarse para la producción de derivados de hidrógeno en Uruguay son aproximadamente 11 millones de toneladas [3]. Por lo tanto el CO₂ que se requeriría para la producción de urea, sería aproximadamente el 2% del disponible a nivel nacional.

Las plantas industriales con la mayor producción de CO₂ biogénico asociado, son las plantas de pulpa de celulosa, representando mas del 80% del CO₂ biogénico disponible en el país [18]. Estas plantas están ubicadas en los departamentos de Fray Bentos y Durazno, el resto de las potenciales industrias están distribuidas entre los departamentos de Tacuarembó, Rivera, Paysandú, Artigas, Lavalleya y Treinta y Tres [18].

De acuerdo con el MIEM, se consideró que las tres plantas nacionales existentes de producción de pulpa de celulosa y las plantas de menor escala de producción de energía podrían disponer de la cantidad de CO₂ biogénico necesario para la producción nacional proyectada de derivados de H₂.

Figura 14. Disponibilidad de CO₂ biogénico industrial a nivel nacional de distintas fuentes (plantas de biocombustibles, generación de energía eléctrica, alimentos, pulpa de celulosa y cementeras)



Fuente: MIEM

Es importante destacar que la producción de biomasa forestal nacional en Uruguay es sostenible.

El país está bien posicionado en certificaciones de desarrollo sustentable en la producción forestal, con el 80% de las plantaciones de bosques y el 100% de los productos que tienen procesamiento industrial en este sector certificados [3].

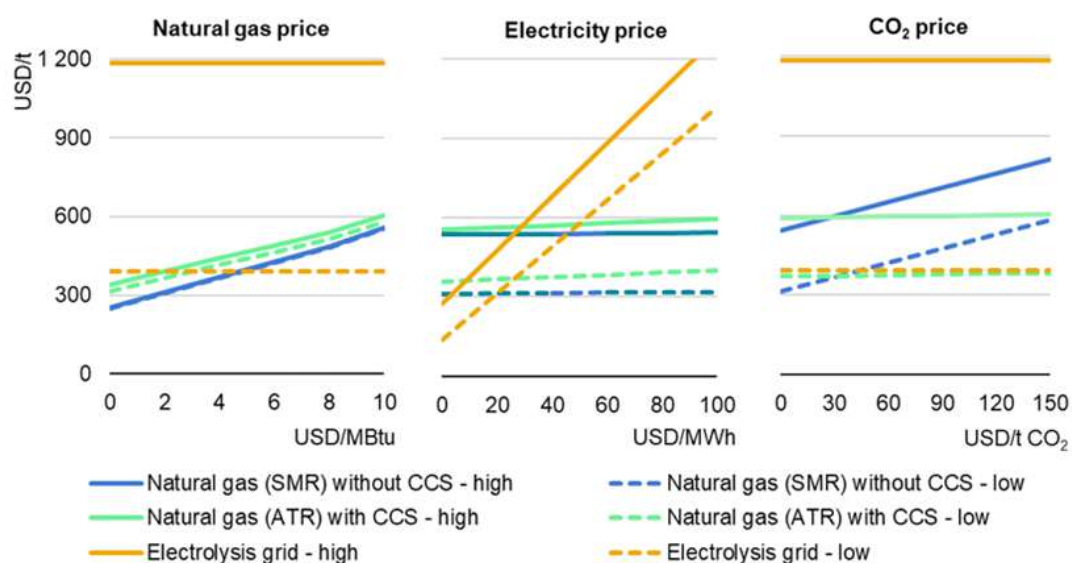
Potencial económico de producción

Los costos actuales de producción amoníaco verde a nivel mundial son muy altos en comparación con el amoníaco tradicional, se espera que este costo disminuya a medida que disminuya el costo de la energía renovable. El precio actual del amoníaco verde está en el rango de 700-1.400 USD por tonelada en sitios con buenos recursos renovables como el sol y el viento. Para 2030, se espera que caiga a 480 USD por tonelada, y para 2050, a 310 USD por tonelada [14].

De acuerdo con IEA el rango de costo de electricidad necesario para hacer competitiva la producción de amoníaco verde debe estar por debajo de 40 USD/MWh. Además, en el caso del amoníaco “azul”, se requeriría un precio del CO₂ de alrededor de 30 USD por tonelada CO₂ para comenzar a ser competitivo en costos con el reformado de gas natural sin captura.

La producción de amoníaco verde es capaz de competir con el reformado de gas natural en un rango de contextos más limitado, pero es más probable que lo haga cuando los precios de la electricidad sean bajos, los precios del gas natural sean altos y los costos del electrolizador sean bajos.

Figura 15. Costo nivelado de producción de amoníaco (LCOA) en diferentes vías de precios de gas, electricidad y CO₂



Fuente: IEA 2021

Si no ocurren las reducciones esperadas en el CAPEX de los electrolizadores, se necesitarían precios de electricidad en el orden de 20-25 USD/MWh para hacer el amoníaco verde competitivo. El precio del CO₂ en el que la electrólisis se vuelve competitiva con el reformado de gas natural, con o sin CCS, depende en gran medida del contexto de precios de la energía y de los costos de los electrolizadores, y podría variar desde la ausencia de precio del carbono hasta varios cientos de dólares por tonelada de CO₂, tal como se puede observar en la Figura 15.

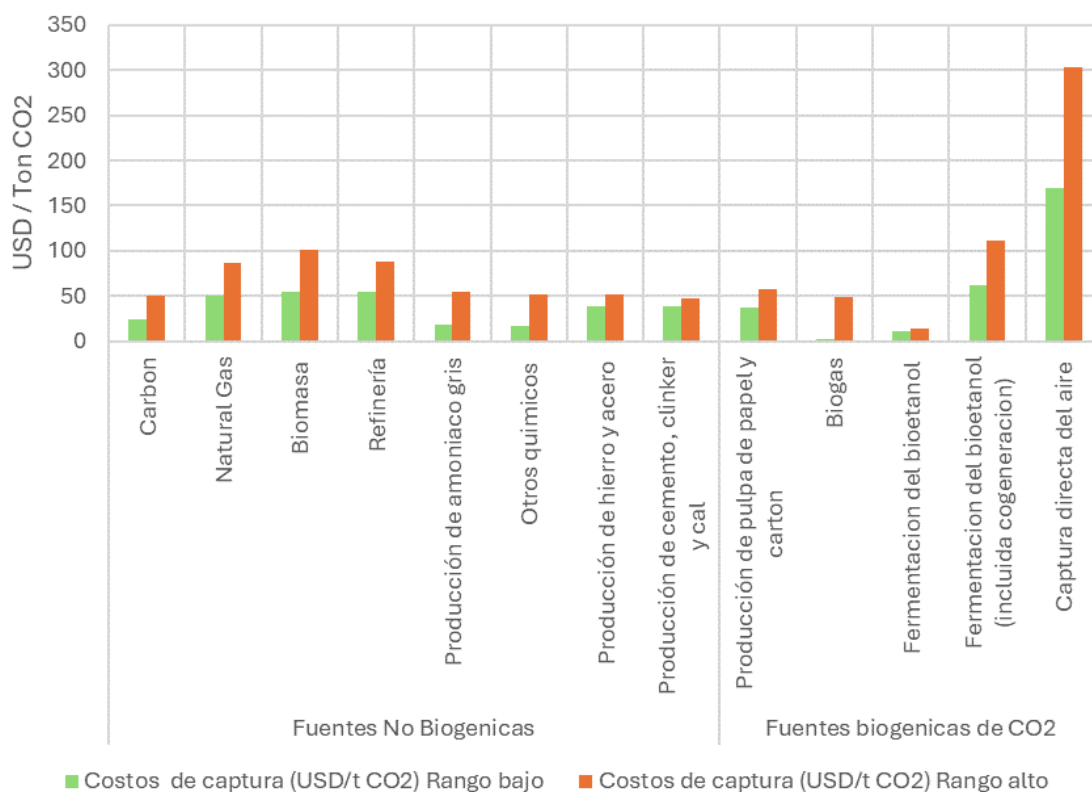
Según la Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde de Uruguay, se prevé que para el año 2030 los costos nivelados de energía (LCOE) de la energía solar y eólica terrestre se sitúen entre 16-19 USD/MWh y 26 -28 USD/MWh, respectivamente, lo que se alinea muy bien con los valores indicados por la IEA para hacer competitivos los proyectos de amoníaco verde. Esto demuestra un alto potencial de producción y desarrollo del mercado doméstico, así como la posibilidad de considerar escenarios de exportación.

Para analizar los potenciales costos de producción de urea, se necesitan datos de entrada que no son fáciles de definir, como por ejemplo los costos de inversión para la captura de CO₂.

Es razonable establecer una referencia para los costos específicos según la fuente de CO₂ que se esté utilizando. Las tasas de captura factibles dependen en gran medida de la concentración de CO₂ en la corriente de origen (generalmente gaseosa) y del proceso emisor.

Dado que las fuentes de CO₂ y los valores de referencia para evaluar los costos de inversión muestran una variación significativa, parece más práctico determinar el valor del CO₂ requerido como suministro operativo y, por lo tanto, representar sus costos por tonelada de CO₂, dependiendo de su origen y tecnología de captura, respectivamente.

Figura 16. Costos de captura de CO₂ dependiendo de la fuente



Fuente: Elaboración propia a partir de (16)

Como se puede ver en la Figura 16, los costos de captura de CO₂ son altamente dependientes de la fuente utilizada. Mientras que la captura de gases de escape industriales varía entre 50–100 USD por tonelada, los esfuerzos para fuentes con altas concentraciones (mejora de biogás, fermentación industrial de bioetanol, producción de amoníaco, etc.) son sustancialmente más bajos, alcanzando valores claramente por debajo de 50 USD por tonelada [16].

Debido a las bajas concentraciones de CO₂, la captura directa del aire (DAC) muestra los costos más altos en conjunción con altas incertidumbres debido a la baja madurez de la tecnología DAC. Además de los costos generales de energía, inversión y operación, las estructuras de costos de la CCUS dependen en gran medida de las propiedades del flujo de CO₂.

Los costos específicos para la captura de CO₂ de plantas de biogás son aproximadamente de 90 USD por tonelada de CO₂ (para 2012). Sin embargo, la captura, así como la eliminación de impurezas (como el azufre), normalmente se realizan para la recuperación de biometano que se puede alimentar en la red de gas, por lo que los costos se asignan a la producción de metano. En este aspecto, la captura de CO₂ es neutral en términos de costos [16].

Los costos del CO₂ de una planta de bioetanol, como fuente, se comportarían de manera similar. En el proceso de fermentación se acumula un flujo de CO₂ de alta calidad como subproducto. Si solo se considera este método como una fuente potencial, entonces los costos de secuestro se limitarían a los costos necesarios para la compresión del gas, que se puede asumir en aproximadamente 12–25 USD por tonelada de CO₂.

Si la planta de bioetanol utiliza la cogeneración para la provisión de energía y la captura de CO₂ del proceso de cogeneración también se considera, entonces los costos serían entre 42 y 111 USD por tonelada de CO₂ para la captura y la compresión, respectivamente [16].

El estudio de competitividad de derivados del hidrógeno verde del MIEM realizado en el 2021 contempló que Uruguay podría producir amoníaco verde en el año 2030 a costos dentro del rango de precios de 420 - 430 USD por tonelada, tal como se puede ver en la Figura 17.

Como dato referencial, un estudio del 2022 de grupo FEL-UY del WEC desarrolló un modelo de costo nivelado para evaluar la prefactibilidad de producción de urea verde en Uruguay, mostrando estimaciones para el hidrógeno, amoníaco y urea verdes.

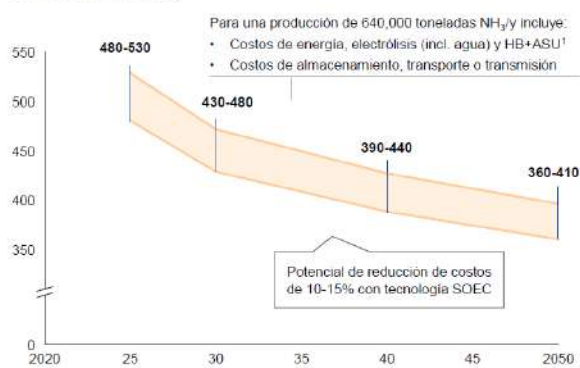
En sus hallazgos, el LCOA para el año 2023 estuvieron en el rango de 1.138 - 1.215 USD por tonelada, y para la urea, los costos nivelados (LCOU) estuvieron en el rango de 685 – 728 USD por tonelada [10].

Además, un estudio adicional de la Facultad de Ingeniería de la UDELAR realizó un análisis de rentabilidad de producción de fertilizantes verdes, en los que resaltaron la urea, y determinaron que en un escenario donde una parte de la producción se comercialice a consumidores intermedios existentes a un precio de 400 USD por tonelada -compitiendo con los precios de importación- y otra porción de la producción se comercialice a consumidores finales a un precio de 850 USD por tonelada resulta en un proyecto con rentabilidades, que pueden superar el 15% de tasa interna de retorno.

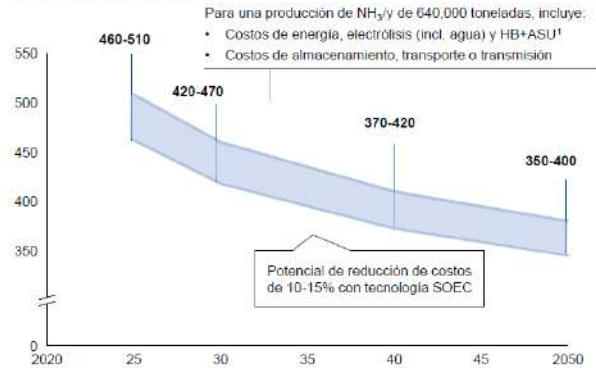
Con estos valores se pueden obtener fuertes indicaciones de que la producción de urea verde en Uruguay tiene el potencial de ser rentable y competitiva en comparación con los precios de importación, dando como resultado que en casos específicos y dependiendo de la estructura propia del proyecto, se pueden obtener tasas de retorno atractivas para los inversionistas y viable en términos financieros.

Figura 17. Costo de producción de amoníaco verde en Uruguay

Costos de producción para amoníaco verde en la Zona Oeste, USD / tonelada NH_3



Costos de producción para amoníaco verde en la Zona Este, USD / tonelada NH_3



Fuente: MIEM 2021



Desafíos y Oportunidades

El amoníaco verde y los fertilizantes bajos en carbono como la urea Verde son fundamentales para la transición energética en Uruguay. El país cuenta con una abundancia de recursos energéticos que pueden ser aprovechados para su desarrollo socioeconómico.

Uruguay también tiene amplias oportunidades para aumentar la generación de electricidad a partir de fuentes renovables como la energía eólica, solar e hidroeléctrica.

Los costos de la energía renovable en Uruguay son competitivos a nivel global y se espera que disminuyan sustancialmente en los próximos años (algunas estimaciones sugieren una reducción del 70% para 2030). Esto permite que la energía renovable en Uruguay sea ideal para la producción de hidrógeno.

Los costos elevados de obtención y transporte de CO₂ biogénico pueden representar un obstáculo para el desarrollo del sector de fertilizantes verdes.

Para asegurar el desarrollo del sector se requiere una importante inversión en infraestructura energética. Dadas estas oportunidades en energías renovables, es importante que Uruguay analice la posibilidad de asegurar que las inversiones en el desarrollo de proyectos sean económicamente viables.

Costo: Los fertilizantes verdes pueden resultar más costosos de producir y adquirir en comparación con los fertilizantes convencionales, lo que podría afectar su viabilidad económica para los agricultores uruguayos. Se deben encontrar las estructuras de proyecto correctas que viabilicen estos proyectos

Infraestructura: Uruguay necesita desarrollar infraestructura adecuada para la producción y distribución de hidrógeno renovable, así como para la captura y almacenamiento de carbono en los procesos de producción de amoníaco verde.

Escalabilidad: Aumentar la escala de producción de fertilizantes verdes en Uruguay para satisfacer la demanda interna y posiblemente exportar, requiere un enfoque estratégico y de inversión a largo plazo. Como se vio en el apartado anterior, los proyectos de escala pueden alcanzar LCOU mas competitivos.

Regulación y políticas: Uruguay necesita establecer políticas y regulaciones claras que fomenten la producción y el uso de fertilizantes verdes, así como incentivos para la inversión en tecnologías verdes.



Conclusiones

Uruguay se posiciona como un líder emergente en la transición hacia la producción de fertilizantes verdes, a partir del uso de hidrógeno verde. Este enfoque es estratégico no solo para alinear al país con los objetivos globales de sostenibilidad y reducción de emisiones de carbono, sino también para reformular su industria agrícola, minimizar la dependencia de las importaciones de fertilizantes fósiles y explorar nuevos mercados de exportación.

Uruguay, con más del 90% de su matriz eléctrica derivada de fuentes renovables, apunta a convertirse en un exportador competitivo de hidrógeno verde.

Para 2030, se proyecta que el país podría alcanzar costos de producción de hidrógeno verde entre 1,2 y 1,4 USD por kilo. Este desarrollo posiciona a Uruguay favorablemente para generar un mercado local de fertilizantes verdes valorado entre 600 y 1.000 millones de dólares, capitalizando su capacidad para producir energía limpia a bajos costos.

La Hoja de Ruta de Hidrógeno Verde de Uruguay anticipa que para 2030, los costos nivelados de energía (LCOE) alcanzarán valores altamente competitivos y se encuentra dentro de los valores estimados por las agencias internacionales para lograr alcanzar costos competitivos de amoníaco y urea verdes.

Se estima que Uruguay podría requerir aproximadamente 218 mil toneladas de amoníaco verde para producir los fertilizantes nitrogenados que actualmente importa, incluyendo urea.

Los estudios muestran que los costos nivelados de producción de amoníaco verde estarían actualmente en el rango de 1.138 - 1.215 USD por tonelada, y para la urea verde, entre 685 – 728 USD por tonelada. Para 2030, se espera que el costo del amoníaco y la urea verde caiga a 480 USD por tonelada y, para 2050, a 310 USD por tonelada de amoníaco.

Análisis realizados para distintas configuraciones y escalas de proyecto sugieren que la venta de urea verde a diferentes segmentos de mercado en rangos de valor que van desde 400 – 800 USD por tonelada podría resultar en rentabilidades que superen el 15% de tasa interna de retorno para el año 2030. Esto demuestra la viabilidad financiera de producir urea verde en Uruguay, considerando precios competitivos con las importaciones actuales.

Los costos de captura de CO₂ varían ampliamente dependiendo de la fuente, desde 50–100 USD por tonelada para gases de escape industriales hasta menos de 50 USD por tonelada para fuentes con altas concentraciones de CO₂, como también logrando alcanzar hasta 300 USD por tonelada en unidades de captura de aire directa.

Uruguay tiene acceso a CO₂ biogénico a través de la biomasa, con costos de captura que pueden ser competitivamente bajos, entre 30 – 60 USD por tonelada según valores referenciales, favoreciendo la producción de urea verde.

El principal desafío para Uruguay radica en los altos costos actuales de producción y la necesidad de infraestructura para el hidrógeno verde y la captura de CO₂. Sin embargo, la oportunidad de establecer una industria de fertilizantes verdes se ve reforzada por la proyección de baja de costos en la energía renovable y la tecnología de electrolizadores, junto con la ventaja de disponer de CO₂ biogénico.

La capacidad de Uruguay para generar energía limpia a precios competitivos, combinada con su compromiso con la sostenibilidad, posiciona al país como un líder potencial en el sector de fertilizantes verdes a nivel mundial. Además de ser un país agroproductor, por lo que enfocarse en descarbonizar este sector en específico esta dentro de sus prioridades.

Uruguay se encuentra ante una oportunidad única para liderar la producción de fertilizantes verdes en la región.



Referencias

1. Naciones Unidas. Objetivos para el Desarrollo Sostenible. Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. [En línea] 2023. [Citado el: 16 de marzo de 2024.] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>.
2. Wood Mackenzie . The rise of the hydrogen economy. [En línea] [Citado el: 16 de marzo de 2024.] <https://www.woodmac.com/market-insights/topics/hydrogen-guide/>.
3. MIEM. Hoja de ruta del Hidrogeno Verde y Derivados en el Uruguay. Montevideo : Ministerio de Industrias, Energía y Minas del Uruguay, 2023.
4. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Plant Production and Protection. [En línea] 14 de Diciembre de 2023. <https://www.fao.org/plant-production-protection/news-and-events/events/event-detail/reducing-greenhouse-gas-emissions-from-fertilizer-use/en>.
5. García, Paula Isla. Hidrogeno verde electrolítico y su empleo en la obtención de amoníaco renovable. Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2023.
6. Bloomberg New Economy Climate Technology Coalition. Scaling Up Hydrogen: The Case for Low-Carbon Ammonia. A BNEF and Climate technology coalition white paper. New York : BloombergNEF, 2024.
7. International Energy Agency (IEA). Industry. Chemicals. [En línea] 2023. [Citado el: 17 de marzo de 2024.] <https://www.iea.org/energy-system/industry/chemicals>.
8. The Royal Society. Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store . s.l. : The Royal Society , 2020.
9. Justiniano, Jose Fuster, Guaquín, Yerko Arteaga y Hermosilla, Rocío Farías. Industria del Amoníaco: estado actual y oportunidades para la descarbonización . Santiago : Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2022.
10. Bastarrica, Felipe, y otros. Fertilizantes verdes en Uruguay . Montevideo : WEC – NFEL-UY: Descarbonización del sector agropecuario y cadenas agroindustriales a través del desarrollo de una economía de urea basada en hidrógeno verde , 2023.
11. MGAP. Importaciones de fertilizantes. Total país. Indicadores . [En línea] 2014-2019. [Citado el: 19 de marzo de 2023.] <https://www.gub.uy/ministerio-desarrollo-social/indicador/importaciones-fertilizantes-total-pais>.
12. Yara. Ammonia cash cost build-up. [En línea] 2024. [Citado el: 19 de marzo de 2024.] <https://www.yara.com/investor-relations/analyst-information/calculators/ammonia-and-urea-cash-cost/>.
13. Wenliang, Meng; Dongliang, Wang; Huairong, Zhou; Yong, Yang; Hongwei, Li; Zuwei, Liao; Siyu, Yang; Xiaodong, Hong; Guixian, Li. Carbon dioxide from oxy-fuel coal-fired power plant integrated green ammonia for urea synthesis: Process modeling, system analysis, and techno-economic evaluation. Elsevier. [En línea] septiembre de 2023. [Citado el: 20 de marzo de 2024.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223009313>.

14. Future Bridge. Green Ammonia – An Alternative Fuel. [En línea] 3 de noviembre de 2022. [Citado el: 20 de marzo de 2024.] <https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-energy/green-ammonia-an-alternative-fuel/>.

15. International Energy Agency (IEA). Ammonia Technology Roadmap. Towards more sustainable nitrogen fertiliser production. s.l. : International Energy Agency, 2021.

16. Rodin, V., Lindorfer, J., Böhm, H., & Vieira, L. Assessing the potential of carbon dioxide valorisation in Europe with focus on biogenic CO₂. Linz : Elsevier, 2020.

17. Morris, Gregory DL. The American Oil & Gas Reporter . New Capacity Bolstering Gas Demand. [En línea] febrero de 2013. [Citado el: 20 de marzo de 2024.] <https://www.aogr.com/web-exclusives/exclusive-story/new-capacity-bolstering-gas-demand#:~:text=%E2%80%9CDownstream%20from%20there%2C%20it%20takes,went%20into%20the%20ammonia%20feedstock.%E2%80%9D>.

18. International PtX Hub. Análisis de la disponibilidad de CO₂ para la producción de derivados de H₂ verde en Uruguay. [En línea] noviembre 2023. [Citado el: 20 de marzo de 2024] <https://www.h2lac.org/wp-content/uploads/2024/03/Analisis-de-la-disponibilidad-de-CO2-H2V-Uruguay.pdf>

19. Uruguay XXI. Energías Renovables en Uruguay. [En línea] noviembre del 2023. [Citado el: abril 2024] <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/79870b5679e4f9634944f6b8daca8ee6c3d45df.pdf>

