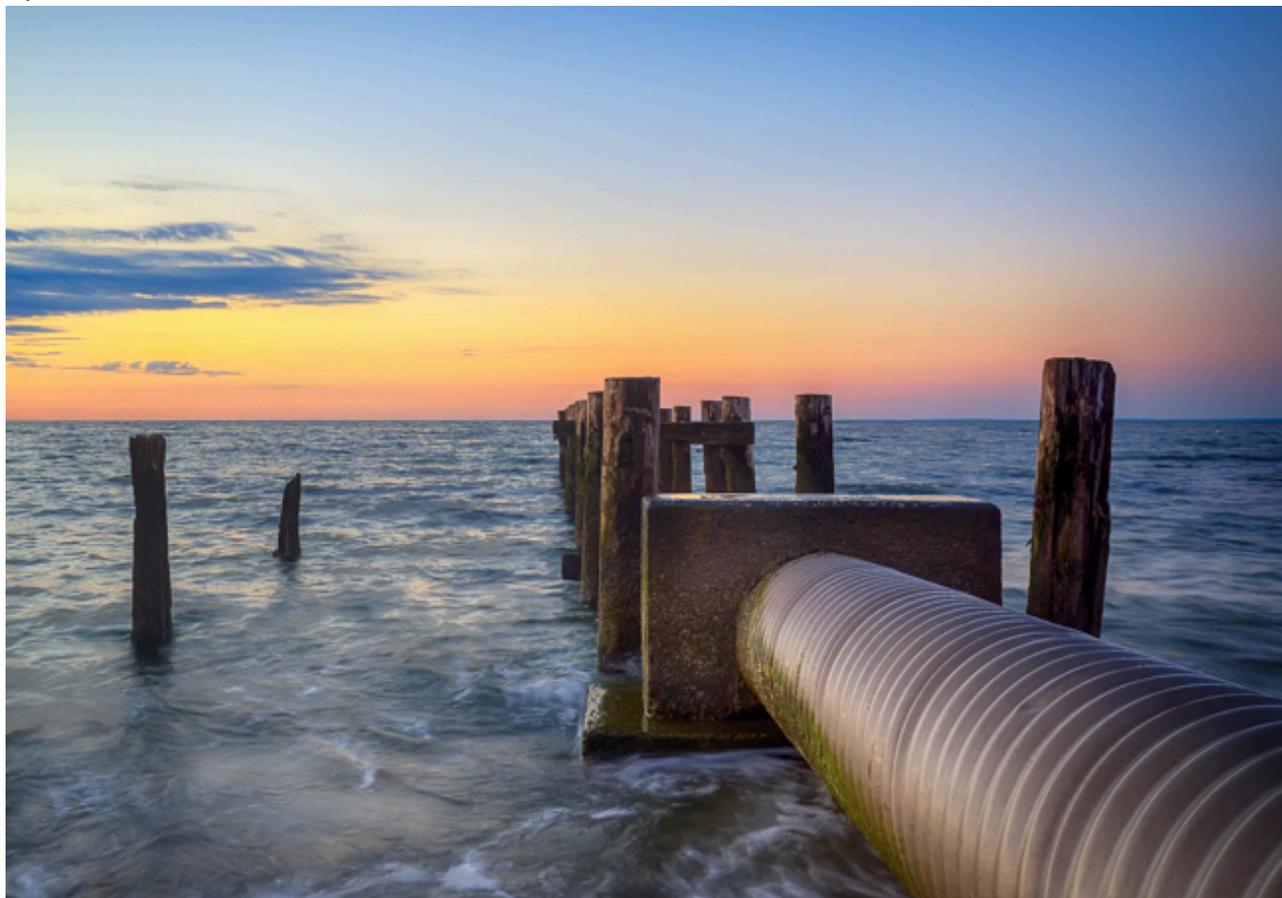


# LOS EXPERIMENTOS DE GEOINGENIERÍA EN MAR ABIERTO IMPULSADOS POR EL MERCADO DE CARBONO PONEN EN PELIGRO EL MEDIO AMBIENTE MARINO

April 3, 2024



*Esta actualización sobre geoingeniería marina, que describe experimentos sobre “mejora” de la alcalinidad de los océanos (OAE, por sus siglas en inglés), resume los últimos desarrollos que aparecen en el [Mapa del Monitor de Geoingeniería](#), destaca nuevas tendencias a seguir en los esfuerzos de la sociedad civil y los movimientos de justicia climática para oponerse a la geoingeniería a nivel mundial. Esta actualización es la primera parte de tres sobre geoingeniería marina, y también cubre el hundimiento de biomasa y la gestión del hielo ártico.*

*Anja Chalmin investigó y redactó la actualización y se publica con el apoyo del equipo del Monitor de Geoingeniería.*

**En esta actualización:**

- **Avances críticos en geoingeniería: aumento o mejora de la alcalinidad oceánica (OAE)**
- **Los diferentes enfoques de OAE que se desarrollan actualmente**
  - OAE con materiales alcalinos
  - OAE mediante procesos electroquímicos
  - OAE mediante procesos fotoquímicos

## Avances críticos en geoingeniería marina: aumento o mejora de la alcalinidad oceánica (OAE)

- Los experimentos de OAE y los proyectos a escala comercial destinados a eliminar CO<sub>2</sub> de la atmósfera mediante la reducción de la acidez del agua marina están proliferando en altamar, zonas costeras y cercanas a la costa a nivel global.
- La promesa de generar ingresos mediante la venta de créditos de carbono es la fuerza impulsora detrás de muchos proyectos de OAE, y ya se han firmado acuerdos de precompra de compensaciones, incluso con Boeing.
  
- Entre las empresas con intereses comerciales en OAE se encuentran Equatic, que actualmente está probando su tecnología OAE en Los Ángeles y Singapur y “quiere generar decenas de millones de dólares en ganancias [...] vendiendo créditos de compensación de carbono a compradores corporativos”; y Limenet, que tiene instalaciones de demostración en Italia y Letonia y afirma que no es necesario un monitoreo a largo plazo de su sistema de captura de CO<sub>2</sub>.
- Los impactos de la OAE en el ciclo del carbono y la biodiversidad son muy impredecibles debido a la complejidad del medio marino y de los procesos de intercambio de carbono, y pueden, por ejemplo, amenazar las cadenas alimentarias marinas.
- Los métodos de OEA más antiguos, que requieren grandes cantidades de roca molida, están siendo reemplazados gradualmente por métodos electroquímicos más nuevos, que implican generalmente extraer agua de mar y tratarla antes de devolverla al océano.

### Los diferentes enfoques de OAE que se desarrollan actualmente

El objetivo de la OAE es eliminar el CO<sub>2</sub> de la atmósfera aumentando la alcalinidad del agua marina. Como resultado del aumento de la alcalinidad, el agua superficial es capaz de absorber más CO<sub>2</sub>, que luego se une químicamente y se almacena principalmente como carbonato de hidrógeno. Existen varios tipos de OAE que por lo general se clasifican en las siguientes categorías, que a veces se superponen:

- *Minerales molidos*: se trata de imitar los procesos naturales de meteorización añadiendo minerales alcalinos molidos, como piedra caliza, olivino, magnesita o brucita directamente al océano o a las playas, donde son arrastrados por las olas.
- *Procesos electroquímicos*: Estos procesos extraen agua del océano y la devuelven en un estado más alcalino, o eliminan CO<sub>2</sub> del agua marina para aumentar la capacidad del océano de absorber CO<sub>2</sub> atmosférico.
- *Procesos fotoquímicos*: El aumento de la alcalinidad puede ser desencadenada por la absorción de luz, haciendo que una molécula se vuelve ácida cuando se expone a la luz solar y vuelva a su forma neutra original en la oscuridad.

Aunque estos tres enfoques de OAE difieren tecnológicamente, se enfrentan a una serie de retos e impactos potenciales comunes, entre los que se incluyen los siguientes:

- El agua empobrecida en CO<sub>2</sub> sólo puede absorber el CO<sub>2</sub> atmosférico cuando sube a la superficie y entra en contacto con el aire, lo que puede tardar cientos de años.
- Investigaciones realizadas en las playas de Tasmania han demostrado que la OAE puede reducir significativamente la producción natural de alcalinidad al ralentizar la meteorización natural mediante el aumento de la saturación de carbonatos del agua marina.
- Investigadores italianos han demostrado que la OAE puede provocar valores de pH temporalmente elevados potencialmente peligrosos para la vida marina.
- La Organización Marítima Internacional (OMI) afirma que las tecnologías de geoingeniería marina, incluyendo la OAE, “tienen el potencial de causar efectos nocivos generalizados, duraderos o graves” y subraya que “existe una incertidumbre considerable en cuanto a los efectos sobre el medio marino, la salud humana y otros usos del océano”.

- Los enfoques de OAE que pretenden imitar el proceso de meteorización natural requerirían agregar al océano **varias gigatoneladas** por año de minerales alcalinos extraídos para aumentar la alcalinidad del océano a una escala relevante para el clima. Para ello sería necesario extraer, moler, transportar y distribuir **grandes cantidades de minerales**, lo que tendría un gran impacto ambiental.

### **OAE con materiales alcalinos**

En la actualidad hay una serie de empresas y proyectos que buscan aumentar la alcalinidad de los océanos utilizando rocas y otras sustancias alcalinas. La mayoría de las empresas tienen su sede en Estados Unidos y varios proyectos de investigación también pretenden realizar experimentos en mar abierto.

#### **Vycarb (EUA): Experimentos en mar abierto encaminados a la venta créditos de carbono**

Vycarb tiene previsto realizar **dos experimentos a pequeña escala** frente a las costas de Nueva York y Massachusetts en 2024, que implican la adición de minerales molidos como dunita y silicatos al agua de mar. En 2023 ya se hizo una prueba de demostración frente a la costa de Nueva York para verificar la tecnología de despliegue. Con los nuevos ensayos Vycarb espera **“generar ganancias anuales de millones de dólares”** con la venta de créditos de carbono.

#### **Limenet S.r.l. (Italia, Letonia): Más experimentos en mar abierto para vender créditos de carbono**

Este enfoque de OAE se basa en el proyecto de investigación italiano DESARC-MARESANUS y requiere CO<sub>2</sub>, piedra caliza, agua de mar y energía. En primer lugar, el hidróxido de calcio se produce a partir de piedra caliza en varios procesos que consumen energía de forma intensiva. El siguiente paso es la conversión de hidróxido cálcico, CO<sub>2</sub> y agua de mar en bicarbonato cálcico con CO<sub>2</sub> y agua de mar en un reactor. El CO<sub>2</sub> utilizado puede capturarse en el proceso de producción del hidróxido de calcio, o puede proceder de otra fuente, como la captura directa del aire (DAC, por sus siglas en inglés). Después de estos procesos que consumen mucha energía, la solución alcalina se mezcla con agua de mar y se vierte al océano. La empresa ya probó un prototipo en la costa del golfo de La Spezia, en Liguria, Italia, y hay **otro proyecto piloto en marcha en Letonia**. Limenet S.r.l. también tiene planes de construir y comenzar a operar **una planta a escala comercial en Tarento, Italia**, para finales de 2024 y vender los créditos de carbono generados por el proceso. **La empresa afirma que su método de OAE permite el almacenamiento estable y a largo plazo de CO<sub>2</sub> en agua de mar durante 10 mil a 100 mil años**, y que no es necesario un monitoreo a largo plazo.

#### **Carbon Blue Ltd. (Israel): Utilizar calcio para mineralizar el CO<sub>2</sub> disuelto**

Este proceso de OAE consiste en utilizar calcio para mineralizar el CO<sub>2</sub> disuelto en agua marina bombeándolo a través de un sistema de circuito cerrado. Luego se remueve el CO<sub>2</sub> mineralizado y el agua marina se devuelve al mar. **La empresa pretende vender el CO<sub>2</sub> capturado** para su uso en productos de consumo. El proceso ya ha sido probado a escala de laboratorio y actualmente se está ensayando en una piscina de agua de mar en el kibutz Maagan Michael en Israel.

#### **Planetary Technology Inc. (Canadá, Reino Unido y EUA): Los experimentos en mar abierto detonan protestas**

La empresa desarrolla y comercializa su tecnología SeaOH2, que combina un proceso de electrólisis de alto consumo energético con la adición de una sal mineral derivada de residuos de rocas alcalinas para producir hidróxido de magnesio. En 2022, la compañía llevó a cabo una **primera prueba de OAE en mar abierto en la bahía de St Ives, Reino Unido**. Los residentes locales se enteraron de la prueba después de que ocurrió y respondieron con **enérgicas protestas** contra la continuación de los experimentos. Planetary Technology propone introducir hidróxido de magnesio alcalino en la tubería de salida de aguas residuales de la planta de tratamiento de Hayle, en la bahía de St Ives, esto implica que se descargaría a 2.4 kilómetros de la costa. La Agencia de Medio Ambiente publicó una **auditoría preliminar** de la propuesta en febrero de 2024.

A finales de 2023, Planetary Technology vertió hasta 300 toneladas de hidróxido de magnesio en la **zona portuaria de Halifax, Canadá**. Para este año, la empresa propone mezclar la sustancia alcalina en una salida de agua existente en la central eléctrica de Tufts Cove, en la zona portuaria de Halifax, y obtuvo 10 millones de dólares de financiamiento en febrero de 2024.

Planetary Technology Inc. también tiene previsto **realizar experimentos de OAE** en la desembocadura del río Elizabeth, en el sur de la bahía de Chesapeake, Virginia, en colaboración con el Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Maryland y la Universidad de Delaware. Los experimentos, financiados con fondos públicos, tendrán lugar en una planta de tratamiento de aguas residuales, donde se añadirán sustancias alcalinas a las aguas residuales tratadas para aumentar la alcalinidad de las aguas costeras. El proyecto también prevé evaluar la viabilidad, los costos y las repercusiones ambientales y biológicas de diversas sustancias alcalinas. En 2024 se realizará una prueba de una semana en la desembocadura del río, seguida de otra de

cuatro semanas al año siguiente.

### **Proyecto de investigación LOC-NESS: Pruebas de OAE frente a Martha's Vineyard (EUA)**

El proyecto de investigación de cuatro años para bloquear el carbono oceánico en la plataforma y talud noreste de Estados Unidos (LOC-NESS, por sus siglas en inglés), financiado por la iniciativa Carbon to Sea de Additional Ventures, lleva a cabo cuatro experimentos en mar abierto frente a las costas de Martha's Vineyard, una isla en el golfo de Maine (Massachusetts). Entre el verano de 2023 y el verano de 2025, se liberarán sustancias alcalinas en el agua del mar.

### **Universidad de Rhode Island: Aumento de la alcalinidad costera en Winnapaug Pond (EUA)**

La Universidad de Rhode Island y sus colaboradores planean realizar una prueba de OAE en Winnapaug Pond, un lago salado poco profundo que intercambia agua con el océano, en la región costera del sur de Rhode Island. El objetivo del proyecto, financiado con fondos públicos, es aplicar minerales alcalinos a una zona costera y estudiar sus efectos en el medio ambiente costero. Se aplicará piedra caliza molida a un campo de golf a orillas del lago salado y se medirán parámetros inorgánicos y orgánicos en las aguas del lago. Los investigadores también estudiarán la posibilidad de escalar este método (denominado "encalado terrestre") a entornos costeros de la costa este de Estados Unidos.

### **Consorcio Ocean Alk-align: Prueba de OAE en el fiordo de Kiel (Canadá, Alemania)**

El Consorcio Ocean Alk-align, financiado por la iniciativa Carbon to Sea de Additional Ventures y dirigido por la Universidad Dalhousie de Canadá, tiene como objetivo evaluar la eficacia y los riesgos ambientales de diferentes materias primas alcalinas de OAE mediante experimentos en laboratorio y en mar abierto. Actualmente el consorcio lleva a cabo un estudio de OAE en el fiordo de Kiel, Alemania en mesocosmos, que son grandes tubos de ensayo que flotan libremente, para investigar el impacto de la OAE a base de minerales en la comunidad de plancton y la absorción de CO<sub>2</sub> en el agua del mar.

### **Equatic (EUA, Canadá, Singapur): El método OAE, de alto consumo energético, apunta a lucrativas ventas de créditos de carbono**

La empresa comercializa una tecnología de OAE desarrollada en la Universidad de California que requiere agua de mar, aire, roca y electricidad. El agua de mar se divide en hidrógeno y oxígeno mediante electrólisis y luego se expone al aire ambiente para convertir el CO<sub>2</sub> en carbonato cálcico sólido y bicarbonato disuelto. Esto hace que el agua de mar se vuelva más ácida, por lo que se disuelven rocas alcalinas en ella para restaurar el pH del agua de mar, y el agua de mar y los carbonatos se devuelven al océano. El hidrógeno se captura como subproducto para su uso como combustible. Desde 2023, Equatic ha estado probando su tecnología en Singapur y Los Ángeles. Un tercer centro de pruebas se prepara en Quebec, en cooperación con Deep Sky. Equatic "quiere generar decenas de millones de dólares de ingresos en pocos años vendiendo créditos de compensación de carbono a compradores corporativos" y ya ha firmado un acuerdo de precompra de créditos de carbono con Boeing.

### **Vesta (EUA, República Dominicana): Experimentos al aire libre en curso y planificados**

Vesta está probando y comercializando OAE con olivino triturado, una roca volcánica blanda y verde, a lo largo de las playas, en humedales de marea y en aguas cercanas a la costa. Entre los lugares de prueba en curso figuran North Sea Beach en Long Island, al este de Nueva York, dos bahías al noroeste de Puerto Plata en la República Dominicana y un humedal de marea en el estuario del río Herring en Cape Cod, Massachusetts. Vesta también prepara una demostración de OAE en las aguas cercanas a la costa de Duck, en Carolina del Norte, y ha anunciado proyectos de investigación conjunta en cooperación con el Consejo Canadiense de la Región de los Lagos y Great Lakes Dredge & Dock.

En un reportaje de prensa reciente, los académicos cuestionaron el planteamiento de Vesta, incluida la vida media de disolución del olivino que Vesta utilizó para calcular las tasas de secuestro de CO<sub>2</sub>. También señalaron los posibles efectos poco conocidos del olivino en los ecosistemas costeros, debido, por ejemplo, a que el olivino a menudo contiene metales tóxicos como el níquel y el cromo. Además, el olivino triturado podría afectar a las criaturas más pequeñas en la base de la cadena alimentaria al bloquear la luz, con otras consecuencias inesperadas para la vida marina.

### **OAE basado en procesos electroquímicos**

#### **SeaO2 (Países Bajos): OAE electroquímico con CC(U)S**

El proceso electroquímico de SeaO2 consiste en extraer agua del mar de entre 50 y 100 metros de profundidad. Una pequeña cantidad de esta agua de mar se filtra y se hace pasar por una membrana bipolar, dividiéndola en un ácido (HCl) y una base (NaOH). El ácido producido se mezcla de nuevo con el agua de mar, esto reduce su pH y su capacidad de absorción de carbono,

lo que obliga al CO<sub>2</sub> a salir burbujeando. Este CO<sub>2</sub> se captura, se comprime y se transporta para inyectarlo en formaciones geológicas o para utilizarlo en productos químicos o combustibles. Las partes básicas (NaOH) y (ahora ligeramente) ácidas (HCl) del agua de mar extraída se mezclan con más agua de mar y se devuelven al océano. SeaO2 desarrolló un prototipo de su tecnología y lo demostró a escala de laboratorio en 2023, y ahora se prepara para construir una planta de demostración en la costa holandesa del Mar del Norte, probablemente cerca de sus instalaciones de I+D en Breezanddijk.

#### **Pronoe (Francia): Utilizar las plantas de tratamiento de residuos para generar créditos de carbono**

El proceso electroquímico de Pronoe puede aplicarse a las plantas de tratamiento de aguas o a los efluentes industriales cercanos a la costa. La tecnología produce un efluente alcalino que se vierte en las aguas costeras, y la empresa está en proceso de construir un prototipo a escala de laboratorio, el siguiente paso para demostrar la tecnología y vender créditos de carbono.

#### **Capture6 Corp. (EUA, Corea del Sur, Australia): OAE con DAC**

Capture6 combina OAE con DAC mediante un proceso electroquímico que produce un disolvente líquido que reacciona con el CO<sub>2</sub> atmosférico para formar una solución alcalina. La empresa propone dispersar la solución alcalina en las aguas oceánicas superficiales para aumentar la alcalinidad del océano y su capacidad de absorber el CO<sub>2</sub> atmosférico. La empresa pretende aplicar su tecnología a las plantas existentes de desalinización y depuración de agua de mar y anunció tres proyectos de demostración. El Proyecto Monarch, en el condado de Los Ángeles (California), es una colaboración con el Distrito de Aguas de Palmdale, y recibió ocho millones de dólares de financiamiento de la Comisión de Energía de California. El Proyecto Octopus es una colaboración con K-water y BKT/Tomorrow Water, y se ubicará en una planta desalinizadora de agua marina del complejo industrial de Daesan, en Corea del Sur. El Proyecto Wallaby es una colaboración con Pilot Energy Ltd, y se ubicará en Arrowsmith, Australia Occidental. En 2023, Capture6 firmó acuerdos de precompra de créditos de carbono con varios mercados de carbono, entre ellos Terraset, Respira y Kakao Impact.

#### **Instituto Tecnológico de Massachusetts (EUA): OAE electroquímico con múltiples aplicaciones**

Esta universidad privada de investigación propone acoplar un proceso electroquímico de remoción de CO<sub>2</sub> a infraestructuras ya existentes, como plantas desalinizadoras de agua de mar. Otras aplicaciones potenciales son los buques, que podrían procesar el agua del mar mientras viajan, así como las plataformas de perforación en alta mar y las granjas de acuicultura.

#### **Ebb Carbon/PNNL (EUA): Venta de ácido clorhídrico y créditos de carbono**

La empresa comercializa un proceso electroquímico de OAE desarrollado en el marco del proyecto de investigación SEA MATE. El ácido clorhídrico (HCl) se separa del agua de mar, haciéndola más alcalina, y luego se devuelve al océano para aumentar las tasas de absorción de CO<sub>2</sub> atmosférico. Ebb Carbon planea vender el HCl como subproducto industrial y emplazar su tecnología en instalaciones que ya tratan agua de mar, como plantas desalinizadoras y granjas de acuicultura. La empresa ha recaudado más de 20 millones de dólares en financiamiento y pretende vender créditos de carbono, tras haber realizado ya una venta inicial al mercado de carbono Stripe. En 2023, Ebb Carbon se asoció con el Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico (PNNL) del Departamento de Energía de Estados Unidos (US-DOE) para probar su enfoque en los laboratorios marinos del PNNL en Sequim, Washington. El PNNL también lleva a cabo experimentos de modelización y de laboratorio en tanques para evaluar la OAE como parte del programa SEA-CO<sub>2</sub> del US-DOE.

#### **Captura Corp. (EUA, Canadá, Noruega): OAE electroquímico con CCS**

Captura Corp., empresa derivada del Instituto de Tecnología de California, está comercializando un proceso electroquímico de OAE que comienza con el pretratamiento del agua de mar para eliminar el calcio y el magnesio disueltos, con el fin de ablandarla. En el siguiente paso, se utiliza un proceso electroquímico para dividir parte del agua de mar ablandada en un ácido (HCl) y una base (NaOH). A continuación, se reduce el pH del agua de mar con el HCl y se captura el CO<sub>2</sub> liberado. Después se añaden calcio, magnesio y NaOH al agua de mar para neutralizar su acidez y se devuelve al océano. Después, el CO<sub>2</sub> capturado se inyecta en formaciones geológicas en colaboración con socios como el proyecto noruego Northern Lights CCS.

Captura tiene actualmente dos proyectos piloto en curso en California, en el Kerckhoff Marine Lab en Newport Beach, y en AltaSea, en el puerto de Los Ángeles, San Pedro. El tercer proyecto piloto de Captura tendrá lugar en Quebec, Canadá, en colaboración con Deep Sky, en 2024. Para el cuarto proyecto piloto, Captura se asoció con Equinor y planea instalar una unidad en la planta de procesamiento de gas natural de Equinor en Kårstø (Noruega). En su última ronda de financiamiento, a inicios de 2024, Captura recaudó 21.5 millones de dólares.

#### **OAE basado en procesos fotoquímicos**

### **Banyu Carbon Inc. (EUA): Utilización de un fotoácido para extraer carbono del agua del mar**

Este proceso utiliza la luz solar para activar una molécula sintética (llamada fotoácido) que se vuelve ácida a la luz del sol y se revierte a su forma neutra original en la oscuridad. Cuando la molécula entra en contacto con el agua de mar, su acidez provoca la liberación de  $\text{CO}_2$  disuelto. El agua de mar descarbonizada se devuelve al océano. La empresa propone utilizar el  $\text{CO}_2$  capturado como materia prima para la industria (CCUS) o para inyectarlo en formaciones geológicas (CCS). La composición y toxicidad del fotoácido aún no se han revelado, pero según Banyu Carbon es capaz de pasar de un estado neutro a uno ácido 14 mil veces antes de perder su eficacia. El método se basa en una tecnología desarrollada y patentada en la Universidad de Washington, donde tiene su sede la empresa. Banyu Carbon desarrolló un prototipo de la tecnología en 2023 y planea poner en marcha un proyecto piloto en 2024 y un proyecto de demostración en 2026. También tiene un contrato con el mercado de carbono de Frontier por más de 360 toneladas de  $\text{CO}_2$ .