

monografía

ciclo de
conferencias y debates en

ciencias

14.^a edición

FUNDACIÓN RAMÓN ARECES
SPRINGER NATURE

**CAPTURA DE CO₂
ATMOSFÉRICO:**
tecnologías para
un futuro sostenible

**ATMOSPHERIC CO₂
CAPTURE:**
technologies for
a sustainable future

Min



FUNDACIÓN
RAMÓN ARECES

SPRINGER **NATURE**

monografía

ciclo de
conferencias y debates en

ciencias

14.^a edición

FUNDACIÓN RAMÓN ARECES
SPRINGER NATURE

CAPTURA DE CO₂ ATMOSFÉRICO:

tecnologías para un futuro
sostenible

ATMOSPHERIC CO₂ CAPTURE: technologies for a sustainable future

Jueves 17 de febrero 2022
Thursday February 17, 2022



FUNDACIÓN
RAMÓN ARECES

SPRINGER NATURE



© Fundación Ramón Areces
Vitruvio, 5 - 28006 Madrid (España)
www.fundacionareces.es

© 2022 Springer Healthcare Ibérica, part of Springer Nature group
Rosario Pino, 14 - 4ª planta
28020 Madrid (España)
Tel.: +34 91 555 40 62
www.springerhealthcare.com
www.springernature.com

Depósito legal: M-M-16012-2022
ISBN: 978-84-09-40043-0
Impreso en España – Printed in Spain



ÍNDICE

CAPTURA DE CO₂ ATMOSFÉRICO: tecnologías para un futuro sostenible

PRESENTACIÓN	
Emilio Bouza Santiago	5
Soledad Santos	6
INTRODUCCIÓN	
Erika Pastrana	7
CONFERENCIAS	
HACIA UNA ENERGÍA Y MATERIALES SOSTENIBLES: NUEVA ECONOMÍA CIRCULAR DEL CARBONO MEDIANTE LA CAPTURA, UTILIZACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO	
Dra. Ah-Hyung (Alissa) Park	10
DISEÑO DE REDES METALORGÁNICAS POROSAS PARA LA CAPTURA DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	
Prof. Jorge A. Rodríguez Navarro	15
LA BIOMASA PARA LOS COMBUSTIBLES Y PRODUCTOS QUÍMICOS DEL MAÑANA	
Prof. Jean-Paul Lange	20
¿CÓMO MANIPULAR EL OCÉANO PARA QUE ABSORBA MÁS CO ₂ ?	
Prof. Rosalind E. M. Rickaby	24
DEBATE	
Dra. Ah-Hyung (Alissa) Park, Prof. Jorge A. Rodríguez Navarro, Prof. Jean-Paul Lange, Prof. Rosalind E. M. Rickaby	29

ATMOSPHERIC CO₂ CAPTURE: technologies for a sustainable future

PRESENTATION	
Emilio Bouza Santiago	33
Soledad Santos	34
INTRODUCTION	
Erika Pastrana	35
LECTURES	
TOWARDS SUSTAINABLE ENERGY AND MATERIALS: NEW CIRCULAR CARBON ECONOMY VIA CARBON CAPTURE, UTILIZATION AND STORAGE	
Dr. Ah-Hyung (Alissa) Park	38
TAILORABLE METAL-ORGANIC FRAMEWORKS FOR GREENHOUSE GASES CAPTURE	
Prof. Jorge A. Rodríguez Navarro	43
BIOMASS FOR TOMORROW'S FUELS AND CHEMICALS	
Prof. Jean-Paul Lange	47
HOW TO MANIPULATE THE OCEAN TO ABSORB MORE CO ₂ ?	
Prof. Rosalind E. M. Rickaby	51
DEBATE	
Dr. Ah-Hyung (Alissa) Park, Prof. Jorge A. Rodríguez Navarro, Prof. Jean-Paul Lange, Prof. Rosalind E. M. Rickaby	56

Presentación

Este año se cumple la **decimocuarta edición** de una actividad que ya se ha convertido en un clásico, en un evento científico de referencia. Se trata de una relación mantenida en este tiempo por parte de [Springer Nature](#) y la [Fundación Ramón Areces](#), que nos aporta una gran satisfacción a todos y que resulta esencial para explorar los temas más diversos en el mundo científico.

Sin duda, pocos temas tienen hoy mayor interés que el sostenimiento del planeta en el que vivimos y el mantenimiento de la calidad del aire que respiramos. Estamos hablando, no solo de producir menos CO₂, sino de tratar de 'absorber' o de recolectar parte del CO₂ excesivo producido.

Por tanto, es para mí un gran honor y una satisfacción dar la bienvenida a nuestros colegas españoles e internacionales, así como agradecer de nuevo la colaboración a [Springer Nature](#).



Emilio Bouza Santiago

Presidente del Consejo Científico de la
Fundación Ramón Areces, Madrid, España

Bienvenidos a la **decimocuarta conferencia-debate** fruto de la colaboración entre la **Fundación Ramón Areces** y el **grupo Springer Nature** que, por segundo año consecutivo, se realiza en formato *online*. Como todos, esperamos que la pandemia vaya remitiendo poco a poco y que el año que viene podamos volver a ver el auditorio lleno de apasionados por la ciencia.

En estos meses de pandemia hemos aprendido que los problemas globales requieren soluciones también globales. El tema de este año, la **CAPTURA DE CO₂ ATMOSFÉRICO: tecnologías para un futuro sostenible**, nos acerca a un problema mundial como es el calentamiento del planeta. Es evidente que el aumento de la población y la demanda creciente de energía y agua hacen difícil la consecución del objetivo de desarrollo sostenible que la Organización de Naciones Unidas (ONU) ha denominado “Acción por el clima”. Sin embargo, creemos que la colaboración coordinada de científicos, gobiernos y población en general puede ayudar a desarrollar y a implementar estrategias que nos acerquen a este objetivo.

Una de las medidas más importantes es, sin duda, la reducción de las emisiones de gases causantes del efecto invernadero y el consiguiente aumento de la utilización de energías renovables. Pero por sí sola, esta medida no es suficiente; también es necesario emplear otros métodos y tecnologías que reduzcan activamente la cantidad de estos gases en la atmósfera, en particular, de dióxido de carbono (CO₂).

En esta edición, los ponentes invitados muestran diversas estrategias que permiten la captura de CO₂ y su almacenamiento en estructuras biológicas o en la biomasa oceánica, y también exponen los últimos avances en el diseño de materiales específicos que facilitan la absorción de CO₂ y su transformación.

En **Springer Nature** estamos firmemente convencidos de la importancia de difundir y hacer llegar los últimos avances científicos al público en general, y de fomentar y facilitar la comunicación entre los científicos, los académicos, la industria privada y los gobiernos. Es esencial para todos establecer un diálogo que permita poner en práctica medidas eficaces y factibles que contribuyan a un futuro más sostenible. Como muestra de este compromiso, **Springer Nature** ha participado en la reciente Cumbre del Clima de Glasgow (COP26), ha organizado junto con la ONU la segunda conferencia científica por un “Futuro Sostenible” y, además, ha incorporado en su fondo editorial diversas publicaciones y revistas cuyo tema central es la *sostenibilidad*.

Como cada año, agradecemos a la **Fundación Ramón Areces** la oportunidad de colaborar en estas conferencias; y damos las gracias a su **Comité Científico**, representado por los profesores Emilio Bouza y José María Medina, por elegir una temática tan necesaria. Además, nos permite acercar al público las soluciones que empiezan a vislumbrarse desde diversos campos científicos para hacer frente a uno de los problemas más acuciantes de la sociedad actual. Agradecemos también al Director General de la Fundación, Sr. Raimundo Pérez-Hernández y Torra, y al Director de Comunicación, Sr. Manuel Azcona, la confianza depositada en nosotros para seguir organizando estas jornadas, incluso en tiempos de pandemia.

Quisiera también agradecer a los ponentes **Alissa Park, Jorge Rodríguez Navarro, Jean-Paul Lange y Rosalind Rickaby** su disponibilidad para participar en esta conferencia. Por último, gracias a **Erika Pastrana**, directora editorial de las revistas *Nature*, por la moderación de este evento.

Soledad Santos
Directora Editorial España y Portugal,
Springer Healthcare,
a Springer Nature Business



introducción



Erika Pastrana

Directora Editorial de *Nature Journals*
Nueva York, EE.UU.

Erika Pastrana es licenciada en Bioquímica y Biología Molecular por la Universidad Autónoma de Madrid y se doctoró en Neurociencia en la Universidad Autónoma de Madrid, donde investigó los mecanismos que promueven la regeneración axonal en modelos animales de lesiones del sistema nervioso. Tras su tesis doctoral, Erika realizó su trabajo posdoctoral durante cuatro años en la Universidad de Columbia, en Nueva York, estudiando la neurogénesis y los mecanismos de progresión de linaje neuronal en ratones adultos.

Comenzó su carrera editorial en 2010 como redactora en *Nature Methods*, donde se encargó del área de las neurociencias, trasladándose en marzo de 2014 a la revista *Nature Communications* como *Team Manager*. En abril de 2017 comenzó como *Executive Editor* dentro de la división de *Nature Research Journals* y, en 2019, como *Editorial Director* de las revistas *Nature* siendo responsable de la gestión y la dirección editorial de ciencias aplicadas y química, que incluyen *Nature Biotechnology*, *Nature Medicine*, *Nature Biomedical Engineering*, entre otras, y más recientemente de *Nature Electronics*, *Nature Mental Health* y *Nature Machine Intelligence*.

Erika forma parte del equipo directivo de *Nature Research* y es responsable del desarrollo y la aplicación de nuevas políticas editoriales, prácticas y flujos de trabajo.



Introducción

En primer lugar, quiero dar las gracias a la [Fundación Ramón Areces](#) por continuar, un año más, con su apoyo sostenido a la ciencia en todos los aspectos. También queremos reconocer su ayuda, indispensable para hacer posible esta conferencia, que pretende dar a conocer y divulgar temas de gran importancia social de la mano de expertos internacionales de referencia en este ámbito.

El calentamiento global es uno de los problemas más acuciantes al que nos enfrentamos como sociedad en este siglo, y es uno de los temas que requiere medidas más urgentes. En el año 2015, los organismos internacionales se reunieron en París para acordar una serie de medidas urgentes con el fin de reducir la emisión de CO₂ atmosférico y también para transformar las fuentes de energías, apostando por fomentar las energías renovables. Estas medidas estaban destinadas a intentar aplacar el calentamiento global con el objetivo de no aumentar la temperatura del planeta más de 1,5 grados. Siete años después, se ha vuelto a celebrar una Cumbre del Clima, en noviembre de 2021; y, sin embargo, el pronóstico de algunos expertos sigue siendo preocupante y pesimista: estiman que para el año 2100 la temperatura del planeta se incrementará 2,5 grados, algo que podría tener consecuencias desastrosas.

Para detener el cambio climático es necesario hacer esa apuesta por la reducción y conversión de las emisiones de CO₂ en energías renovables. Sin embargo, por sí solas, estas medidas no van a permitirnos alcanzar ese objetivo, sino que también es necesario que recurramos a la ciencia, a la tecnología, a la ingeniería para desarrollar y poner en práctica medidas que nos permitan activamente captar

y reducir las emisiones que son producto de las actividades humanas (el CO₂ antropogénico). Es precisamente este tema el que abordamos en esta Conferencia; y, para ello, contamos con cuatro expertos internacionales que nos van a hablar de las diferentes técnicas para capturar, usar y almacenar CO₂. En concreto, entre otros aspectos, los ponentes detallan métodos para capturar CO₂ con estructuras geológicas, el papel que pueden desempeñar los océanos en este reto y el diseño de nuevos materiales que permiten capturar el CO₂, así como explicar cómo nuevos combustibles pueden permitirnos reemplazar a los combustibles fósiles.

Para que se hagan una idea, estas estrategias (que en inglés se denominan '*carbon capture and storage*') ya se están empezando a implementar en algunas industrias: por ejemplo, en fábricas que producen gran cantidad de CO₂ (como sucede en la producción de acero o de cemento). Hay algunas industrias en el mundo que ya cuentan con dispositivos que permiten capturar parte del CO₂ que emiten. Sin embargo, estos métodos, a día de hoy, capturan del orden de 40 millones de toneladas métricas de CO₂, y las ambiciones que tenemos para poder controlar el cambio climático requerirían que aumentásemos esa proporción de captura de CO₂ más de 100 millones de veces.

Espero que entiendan la relevancia de este tema y de las aportaciones de los expertos invitados, que nos informarán sobre cuáles son los métodos científicos que permiten alcanzar ese objetivo de interés mundial. Sobre todos estos aspectos se reflexiona también en el debate final.

conferencias

- **HACIA UNA ENERGÍA Y MATERIALES SOSTENIBLES: NUEVA ECONOMÍA CIRCULAR DEL CARBONO MEDIANTE LA CAPTURA, UTILIZACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO**

Dra. Ah-Hyung (Alissa) Park

Centro Lenfest de Energía Sostenible, Departamento de Ingeniería Ambiental y de la Tierra y Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Columbia, Nueva York, EE.UU.

- **DISEÑO DE REDES METALORGÁNICAS POROSAS PARA LA CAPTURA DE GASES DE EFECTO INVERNADERO**

Prof. Jorge A. Rodríguez Navarro

Departamento de Química Inorgánica, Universidad de Granada, Granada, España

- **LA BIOMASA PARA LOS COMBUSTIBLES Y PRODUCTOS QUÍMICOS DEL MAÑANA**

Prof. Jean-Paul Lange

Shell Global Solutions International B.V., Ámsterdam, Países Bajos & Tecnología de Procesos Sostenibles, Universidad de Twente, Enschede, Países Bajos

- **¿CÓMO MANIPULAR EL OCÉANO PARA QUE ABSORBA MÁS CO₂?**

Prof. Rosalind E. M. Rickaby

Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Oxford, Oxfordshire, Reino Unido



Hacia una energía y materiales sostenibles: nueva economía circular del carbono mediante la captura, utilización y almacenamiento de carbono

Dra. Ah-Hyung (Alissa) Park

Centro Lenfest de Energía Sostenible, Departamento de Ingeniería Ambiental y de la Tierra y Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Columbia, Nueva York, EE.UU.

En esta conferencia me gustaría explicar **qué significa la captura y almacenamiento de carbono**, poniendo énfasis en su relevancia y en la necesidad de adoptar medidas que se prolonguen en el tiempo, incluso hasta el próximo siglo. Sin duda, este es el problema mundial más importante en la actualidad, y no me refiero exclusivamente a la gestión de carbono, sino al **cambio climático y sus problemas asociados**.

En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre “Cambio Climático” de 2015 se consensuó que este era un gran problema y que era indispensable trabajar para solucionarlo, lo que llevó a la introducción de una serie de medidas. Sin embargo, aún tenemos que lidiar con desafíos muy diversos. Esta reunión de 2015 fue la primera en la que países de todo el mundo se asociaron para plantear la necesidad, no solo de implementar tecnologías ya existentes, sino también de movernos hacia un futuro sostenible y desarrollar opciones eficaces de ingeniería y de nuevos desarrollos científicos multidisciplinares.

En esta Conferencia se estableció la necesidad de acelerar la **revolución de las energías limpias** y se fijaron una serie de ámbitos (ocho, en concreto) en los que había que hacer un especial hincapié y esfuerzo. Algunas de las áreas son, por ejemplo, los biocombustibles sostenibles, el hidrógeno o la captura, utilización y almacenamiento de carbono. Estas áreas no son independientes entre sí, sino que están interconectadas, por lo que es preciso un abordaje holístico en lugar de centrarnos en una sola solución.

A lo largo de la historia se ha emitido, y se sigue emitiendo, tanto CO₂ que tenemos que empezar a **gestionar activamente el carbono** al mismo tiempo que trabajamos en otras tecnologías.



Dra. Ah-Hyung (Alissa) Park

Energy Earthshots

En EE.UU. se ha cambiado de dirección y ya el año pasado, en 2021, el Secretario de Energía puso de relieve que estamos muy comprometidos en la lucha contra el cambio climático, pero que sin recursos y sin apoyo no podemos alcanzar nuestros objetivos. Esto llevó a la creación de la iniciativa “Energy Earthshots” para acelerar el progreso hacia una economía de coste energético cero.

El primer paso en esta iniciativa es cambiar la economía con vistas al año 2050. En este sentido, como primera medida se quiere reducir el coste del hidrógeno limpio en un 80% hasta alcanzar un precio de 1 dólar/kg de hidrógeno en una década; sin duda, se trata de un objetivo realmente ambicioso.

El segundo objetivo tiene relación con el *earthshot* de carbono negativo. Se debe aumentar drásticamente la responsabilidad en la eliminación de dióxido de carbono (CO₂), así como reducir los costes de la tecnología imprescindible para generar energía limpia. Se pretende lograr que el precio sea inferior a los 100 dólares por tonelada de CO₂ neto para el año 2050, incluyendo en esta meta la captura, utilización y almacenamiento de carbono. Sin duda, otro objetivo muy ambicioso, ya que se pretende lograr cero emisiones netas de CO₂ para 2050.

No cabe duda de que cada vez hay más interés, trabajo y capital invertido en este proceso en EE.UU., en espera de contar con más colaboración internacional con el paso del tiempo para la consecución de este propósito.

Tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono

La captura de carbono es un proceso beneficioso que se puede realizar a diversos niveles de concentración y mediante diferentes métodos. Muchos de los materiales utilizados en estos procesos están diseñados para que sean reciclables en sí mismos, ya que al desarrollar estas nuevas tecnologías es importante utilizar componentes que se puedan reutilizar miles de veces.

La captura de material de carbono va a exigir también energía que permita volver a liberar ese CO₂ cuando sea necesario. Partiendo de esta necesidad, se han evaluado diferentes opciones para no utilizar demasiada energía durante la captura. Se han estudiado diversas reacciones que tienen lugar a gran velocidad (a mayor velocidad, mayor gasto de energía). También se han estudiado las soluciones aminadas, que al ser disolventes líquidos pueden moverse entre los reactores.

A través de demostraciones prácticas a gran escala, como el proyecto Petra Nova, apoyado por el *National Energy Technology Laboratory* de EE.UU. (NETL), se ha comprobado que es posible aplicar estas soluciones aminadas con éxito. Con el proyecto Petra (iniciado a finales de 2016 en Houston, Texas), se capturaron más de un millón de toneladas de CO₂. Hubo desafíos difíciles de superar, sobre todo por la cantidad tan enorme de carbono que había que capturar y porque los materiales utilizados se degradaban con el tiempo. Pero cada día seguimos aprendiendo sobre este proceso y trabajando en nuevos proyectos.

Una pregunta que nos planteamos es *qué hacer con la inmensa cantidad de CO₂ una vez que se capture*, ya que hay que intentar gestionarla de alguna manera, quizás almace-

nando el carbono en formaciones geológicas o incluso en los océanos. En este sentido, ya se han encontrado bolsas de almacenamiento bajo tierra donde colocar y almacenar el carbono después de su captura.

Tal y como se reflejaba en un informe de 2005 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático¹, donde se ofrecía una visión general de las opciones de almacenamiento geológico, el almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas profundas en el mar o en la tierra utiliza muchas de las tecnologías desarrolladas por la industria petrolera y del gas, y ha demostrado ser económicamente viable en condiciones específicas para los yacimientos de petróleo, gas y las formaciones salinas, aunque no todavía para el almacenamiento en capas de carbón inexplorables.

Para inyectar este carbono de forma eficiente en estas bolsas subterráneas normalmente hay que aumentar la presión hasta 250 atmósferas sobre el carbono. Existen diferentes maneras de depositar el carbono en estas bolsas subterráneas. Inicialmente, el carbono queda atrapado bajo la roca, pero luego empieza a penetrar en los poros de la propia tierra y, finalmente, se forman unos reservorios de captura y almacenamiento de carbono.

Una de las rutas que se pueden utilizar para acceder al interior de la superficie terrestre es **mediante la conversión del carbono en dióxido de carbono**, con el desarrollo de reacciones entre los materiales utilizados. En este proceso pueden surgir problemas, como la fuga de carbono, de modo que en este caso solidificar el carbono sería una solución, aunque a día de hoy ignoramos cuánto tiempo se precisa para la formación de estas estructuras.

Una de las iniciativas de investigación más interesantes en este ámbito ha sido la que recientemente se ha llevado a cabo en Islandia². Se trata de un proyecto en el que se inyectaron 220 toneladas de dióxido de carbono en reservorios rocosos y de sal, a cientos de metros bajo tierra, confirmándose que el carbono empezaba a solidificar precozmente, formando cristales de carbono sólido.

Esto demuestra que se puede capturar directamente carbono del aire o de otros lugares e inyectarlo en estas formaciones de roca y sal para solidificarlo.

En definitiva, este estudio ha confirmado por vez primera la eliminación permanente de CO₂, documentándose que más del 95% del CO₂ inyectado en el sitio de CarbFix en Islandia se transformó en minerales de carbonato en menos de dos años.

El almacenamiento seguro a largo plazo de las emisiones antropogénicas de CO₂, a través de la mineralización, puede ser mucho más rápido de lo que se creía anteriormente.

De lo que no cabe duda es de que el reciclaje de CO₂ necesita grandes mercados para tener un impacto significativo en el clima. Según cálculos recientes³, el potencial para el año 2030 de almacenamiento de carbono en estas formaciones sería de 36.000 millones de toneladas o incluso más.

Economía circular de carbono

Otra pregunta que surge es si es *posible descarbonizar los materiales sólidos* y, por ahora, parece que la respuesta es negativa. También deberíamos plantearnos si podemos reconstruir ecosistemas industriales completos, fabricando productos químicos y materiales que no incluyan carbonos fósiles.

Sabemos que nuestra sociedad necesita productos químicos, tanto materiales como combustibles; por otro lado, queremos y necesitamos también sostener y mantener nuestro estilo de vida, lo que inevitablemente genera desechos que van al aire, al agua o a otros muchos y diversos lugares.

La idea sería desarrollar una **nueva economía circular de carbono**, donde todo fuera energía renovable e hidrógeno, que es el elemento que tiene un sello de carbono y medioambiental mucho más reducido. Todos estos materiales serían renovables.

Para que se haga realidad, es necesario que generemos posibilidades tecnológicas que puedan comercializarse de manera eficaz (**Figura 1**).

Podemos construir el mundo con agua, CO₂ y energía con cero emisiones de carbono.

Esto no será posible sin disponer de unas buenas políticas económicas y de gestión. Una gran parte de estos materiales químicos y combustibles se transportarán de un país a otro y estarán presentes en todo el planeta; el desafío es, por tanto, muy ambicioso. Además, resulta fundamental determinar de dónde se va a sacar el carbono y cómo atraparlo, ya que, por ahora, no es posible prescindir completamente de él.

El CO₂ debe provenir de fuentes no fósiles para ser circular. Podemos recurrir al océano, al aire, pero también pueden valorarse las biomásas terrestres o marinas como opciones posibles.

Cada una de las rutas planteadas presenta tanto desafíos como oportunidades⁴. Una de las opciones que se están evaluando es la captura directa de CO₂ del aire, una alternativa especialmente interesante porque se trataría de emular un proceso similar al que efectúan las plantas, pero de forma artificial. En el proyecto Petra Nova, por ejemplo, hay instalaciones enormes que se pueden utilizar para este fin.

Cada vez se está avanzando más en instalaciones modulares y escalables que permiten reducir el volumen de los equipos necesarios para hacer efectiva la captura directa de carbono

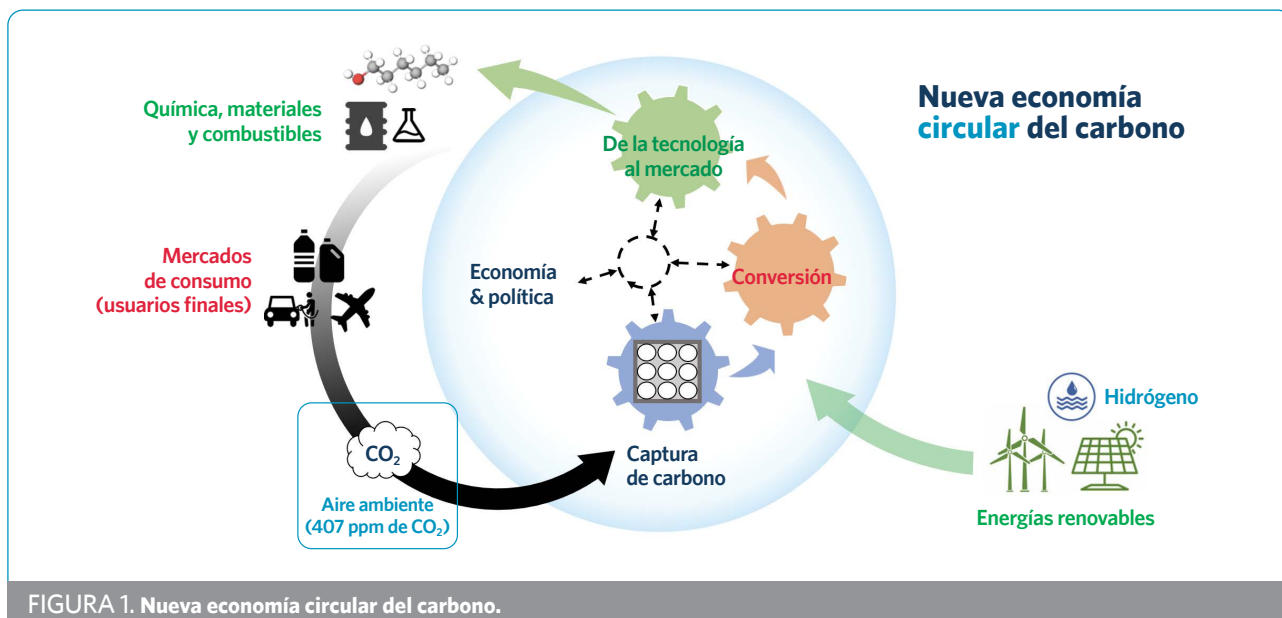


FIGURA 1. Nueva economía circular del carbono.

del aire. Esta captura directa en pequeñas cantidades es muy diferente a la que se realiza para capturar este elemento en otros medios y, en este caso, se advierten importantes obstáculos y dificultades, entre los que se encuentran:

- a) La necesidad de tener una baja caída de presión. El CO_2 en el aire se encuentra a una concentración de 400 ppm (partes por millón), que es muy baja en comparación con su concentración en otras localizaciones; esto hace que su captura sea muy compleja por la cantidad y por los problemas de presión: el aire debe someterse a presión para poder capturar el carbono.
- b) La necesidad de ser estable bajo una alta concentración de O_2 en el aire, lo que provoca oxidación y degradación.
- c) Los niveles de humedad fluctuantes y los cambios en las condiciones medioambientales, además de otros contaminantes e impurezas (incluidas en las partículas del aire) que pueden interferir con el proceso.

En este ámbito de la captura directa de CO_2 del aire se han propuesto diferentes procesos y recursos, como nuevos disolventes de captura de CO_2 pobres en agua y sin agua. Algunos de los materiales con los que ahora se trabaja son los llamados **“materiales híbridos orgánicos de nanopartículas”** (NOHM, *Nanoparticle Organic Hybrid Materials*). Se trata de unas partículas que se pueden dejar al aire libre durante días, semanas o meses, y siguen captando CO_2 , a diferencia de otros materiales que, si se dejan fuera, se evaporan, desaparecen o se degradan.

Los NOHM son útiles para capturar CO_2 , pero es preciso diseñar y sintetizar NOHM que permitan realizar esta acción de forma más efectiva. Estos materiales tienen propiedades realmente muy singulares, y el reto en este sentido es dar un paso más y progresar en el proceso de captura de CO_2 . Es posible que se pueda hacer utilizando materiales basados en aminas, pero el principal obstáculo que debemos salvar es que estamos trabajando en el aire y es difícil desplazar los materiales de un lugar a otro.

Los investigadores han empezado a plantear nuevos escenarios y posibilidades con el fin de idear una manera más eficaz de mover estos materiales para capturar CO_2 a diferentes niveles, sin que haya problemas de transporte, con el fin añadido de mejorar el propio proceso de transporte para hacer frente a los problemas de viscosidad^{5,6}.

Hay diferentes maneras de hacerlo, y una de las más prometedoras es la encapsulación mediante disolventes encapsulados con diferentes espesores de capa. En nuestro centro hemos desarrollado una solución de alto grado de viscosidad en la que se pueden crear microcápsulas que contienen NOHM, con la parte externa de fibra (como la usada en otros

equipos industriales). Una vez encapsulados los NOHM, el nivel de absorción de CO_2 aumenta en comparación con los NOHM puros, lo cual permite capturar más CO_2 con menor superficie. Además, se está trabajando en el desarrollo de nuevos métodos de encapsulación, sobre todo, para tratar de evitar la caída de presión. De ahí surgió la posibilidad de utilizar materiales de captura de CO_2 encapsulados en fibra. Nuestros últimos resultados han sido fibras mejoradas que nos han permitido capturar dióxido de carbono desde el aire de una forma más eficaz y rápida.

Captura y conversión combinadas de CO_2

Una vez capturado el CO_2 , nos planteamos qué hacer con él para almacenarlo de forma eficaz. A nivel industrial, además, se está investigando *en qué se puede convertir el CO_2 capturado*, para no solo capturar y distribuir este CO_2 , sino también construir, desarrollar y fabricar muchas cosas.

Entre las líneas de investigación en marcha, también se está estudiando si, quizás, no es tan necesario alcanzar un gran nivel de pureza de CO_2 para fabricar diferentes productos. Este aspecto es ciertamente relevante, ya que el proceso de captura de CO_2 tiene un coste muy elevado y cualquier avance en este sentido ayudaría a optimizar el resultado económico de las operaciones y procesos que se realizan.

Necesitamos una energía libre de carbono, pero también se está avanzando vertiginosamente en el desarrollo de energías renovables. Hay que seguir trabajando y mejorando estas ideas para llegar a la economía circular.

A la hora de desarrollar nuevos materiales, no solo hay que tener en cuenta si se utiliza energía renovable para su generación, sino también hay que estudiar la sostenibilidad del resto de compuestos implicados en su fabricación. Para que todo el proceso sea sostenible o incluso neutral en términos de carbono, debemos asegurarnos de que el reactor o reactivo (hidrógeno, normalmente) sea también sostenible. Hay que asegurarse de que la energía requerida provenga de fuentes de energías libres de carbono.

Como ejemplo práctico, cabe destacar lo que se está haciendo actualmente para capturar carbono en industrias como la del cemento o la del acero. Se captura CO_2 en esas industrias y luego se transporta mediante sistemas de conversión térmica para desarrollar materiales y productos químicos que necesitamos.

Las rutas de conversión de CO_2 no son sencillas, pero la cuestión es bastante interesante por la diversidad

de materiales que pueden ser convertidos o transformados (la ceniza volátil de las industrias, los restos y la escoria del acero, los barros de desechos de diversas industrias, etc.). Estos desechos pueden ser sólidos o gaseosos, y aplicando reacciones ácido-base se pueden crear nuevos materiales que se vendan en el mercado con estos gases invernadero o desechos, que se erigen

en buenos recursos alternativos para, por ejemplo, desarrollar productos de papel, de plástico e, incluso, recuperar también algunos elementos críticos de todos estos materiales.

Esta tecnología en la que estamos trabajando desde hace más de una década estará disponible en el mercado chino este mismo año (Figura 2).

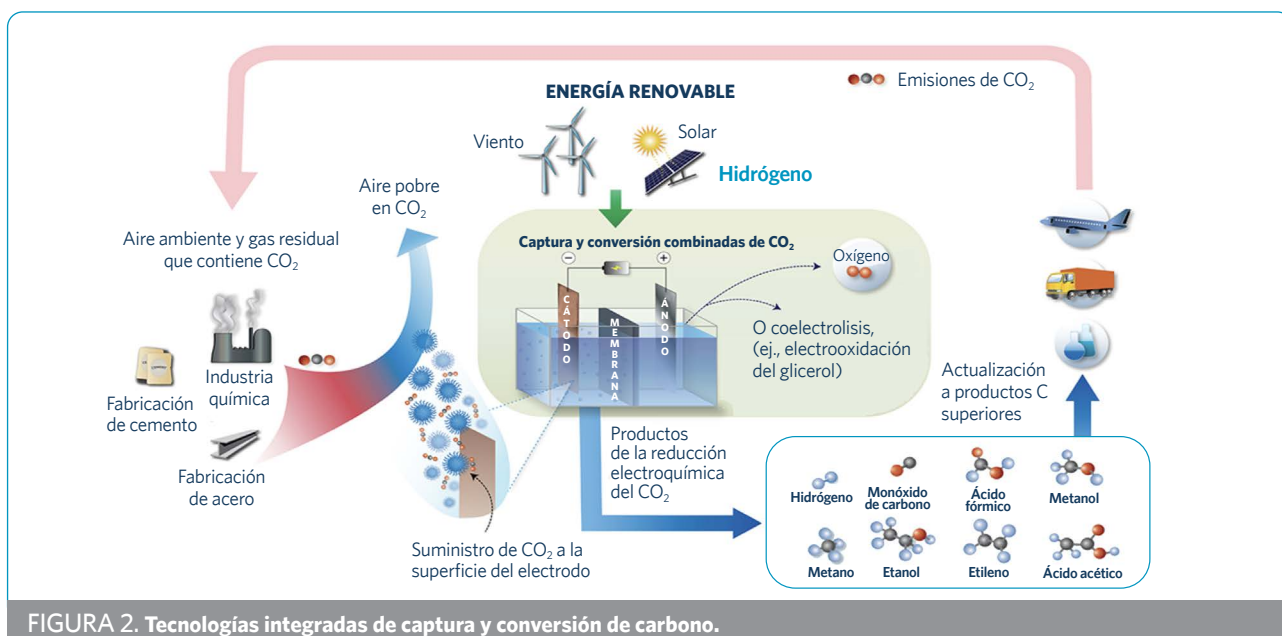


FIGURA 2. Tecnologías integradas de captura y conversión de carbono.

CONCLUSIONES

- » Para alcanzar una nueva economía circular del carbono necesitamos considerar todas las fuentes de CO₂ y las múltiples soluciones que tenemos a nuestro alcance para resolver el problema que estas implican.
- » La conversión y la utilización de CO₂ desempeñarán un papel muy importante (y diferente) al permitir que la energía renovable sea cada día más económica.
- » Para garantizar la sostenibilidad global del proceso tenemos que centrarnos en los sistemas de ingeniería y separación de reactivos, así como en sus fases de intensificación.
- » Asimismo, hemos de desarrollar nuevas rutas para productos químicos ya existentes o para nuevos productos, teniendo siempre muy en cuenta la protección del medio ambiente.

Referencias bibliográficas:

1. Metz B, Davidson O, Coninck H, et al. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage (Cambridge Univ. Press, New York, 2005). Cambridge University Press, UK; 2005:431.
2. Matter JM, Stute M, Snæbjörnsdóttir SÓ, et al. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. Science. 2016;352(6291):1312-4.
3. Biniek K, Henderson K, Rogers M, et al. McKinsey Quarterly. Driving CO₂ emissions to zero (and beyond) with carbon capture, use, and storage. June 2020. Disponible en: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/driving-co2-emissions-to-zero-and-beyond-with-carbon-capture-use-and-storage>.
4. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press. Disponible en: <https://doi.org/10.17226/25259>.
5. Petit C, Park Y, Andrew Lin KY, et al. Spectroscopic investigation of the canopy configurations in nanoparticle organic hybrid materials of various grafting densities during CO₂ capture. J Phys Chem C. 2012;116(1):516-25.
6. Petit C, Park Y, Andrew Lin KY, et al. Investigation of CO₂ capture mechanisms of liquid-like nanoparticle organic hybrid materials via structural characterization. Phys Chem Chem Phys. 2011;13:18115-22.

Diseño de redes metalorgánicas porosas para la captura de gases de efecto invernadero

Prof. Jorge A. Rodríguez Navarro

Departamento de Química Inorgánica, Universidad de Granada, Granada, España

El objetivo de la ponencia es destacar la posible **utilidad de redes metalorgánicas (MOF, Metal-Organic Frameworks) en la captura de gases de efecto invernadero**. Para ello, es imprescindible contextualizar la situación y apuntar algunos aspectos clave del problema que supone el cambio climático y las estrategias que se están desarrollando para la captura de CO_2 en base a sus características físico-químicas. Además, quiero resaltar también las ventajas que aportan los adsorbentes sólidos frente a la tecnología actual de captura de CO_2 con disoluciones aminadas (*amine scrubbing*). Para entender bien todos estos aspectos también es fundamental conocer las etapas que suelen presidir el diseño, la síntesis y la modificación postsintética de las MOF en la captura de gases con efecto invernadero. Y, finalmente, considero de especial importancia reseñar el beneficio que se puede obtener combinando la validación experimental y la inteligencia artificial (*Big Data*) en la búsqueda acelerada de nuevos y mejores materiales para la captura de CO_2 .



Prof. Jorge A. Rodríguez Navarro

Cambio climático

Existen evidencias experimentales de un aumento gradual de la temperatura de la superficie de la Tierra. Ya no cabe duda de que actualmente nos enfrentamos a una serie de anomalías en la temperatura del planeta que se han acelerado progresivamente durante las últimas cuatro décadas. Es lo que se conoce como **“efecto invernadero”**, principal responsable del cambio climático y que, entre otras consecuencias, lleva aparejado un aumento del nivel del mar, el incremento de la desertización o el desarrollo de huracanes. Esto se debe a que la Tierra está sometida a una fuerte radiación solar que, cuando llega a la superficie terrestre, se convierte en una radiación de mayor longitud de onda que, a su vez, es absorbida por gases presentes en la atmósfera (gases de efecto invernadero).

Un aspecto beneficioso del efecto invernadero es que mantiene una temperatura estable en la Tierra, lo que la hace habitable; sin embargo, cambios sutiles en el balance energético entre el Sol y la Tierra pueden tener trágicas consecuencias en el clima, como el calentamiento global o la posible irrupción futura de una nueva era glacial.

El componente más importante de efecto invernadero es el vapor de agua. Algunas moléculas presentes en la atmósfera son capaces de absorber de forma potente la radiación infrarroja del Sol; de este modo, se inducen vibraciones en esas moléculas, dando lugar a la absorción infrarroja de la atmósfera. Sin embargo, se cree que el efecto invernadero está causado fundamentalmente por el aumento de la concentración de gases como el CO_2 , el metano (CH_4) o el óxido de nitrógeno (NO_x); es decir, las anomalías en el balance energético vienen causadas por el cambio de concentración de gases no condensables que también absorben la radiación infrarroja.

El origen de la emisión de gases de efecto invernadero se deriva, sobre todo, del empleo exacerbado de combustibles fósiles con el objetivo de mantener las necesidades energéticas de nuestra sociedad. Este consumo excesivo ha dado lugar a un aumento significativo de las concentraciones de CO_2 y, por tanto, del efecto invernadero¹.

Estrategias para la captura de CO₂

Dado que ya se asume que gran parte del problema planteado en relación con el efecto invernadero se debe a la excesiva emisión de CO₂, resulta crucial optimizar las estrategias para capturarlo.

¿Cómo podemos abordar este problema? Una solución pasa, sin duda, por la adopción de estrategias para la **captura de CO₂ sobre la base de sus características físico-químicas**.

El dióxido de carbono es una **molécula ácida** y, por lo tanto, si la tratamos con una base podríamos capturarla, tal como hacen los moluscos para crear conchas de carbonato cálcico. Otra propiedad útil de esta molécula es su **carácter electrofílico**, por lo que, si la exponemos a una amina, puede dar lugar a la formación de compuestos químicos (carbonatos) que son capaces de fijar el CO₂. También es un **óxido**, de manera que podemos usar un material reductor que permita su fijación. Otra característica peculiar del CO₂ es su **pequeño tamaño**: la molécula de CO₂ mide unos 0,33 nanómetros, por lo que es posible confinarla molecularmente en un espacio reducido (formado por un material poroso). Estas propiedades se pueden usar de forma combinada en la búsqueda de soluciones (**Tabla 1**).

Tabla 1. Propiedades físico-químicas del CO₂ que optimizan su captura.

Propiedades	¿Qué podemos hacer?	Ejemplo
Acidez	Una base	$\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$ 
Electrofilicidad	Un nucleófilo	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{N}-\text{R} \rightarrow \text{HRN}-\text{COOH}$ 
Óxido	Un reductor	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_n$ 
Tamaño (0,33 nm)	Confinamiento molecular	Fisorción/quimisorción en el poro

Adsorbentes sólidos frente a captura de CO₂ con soluciones aminadas

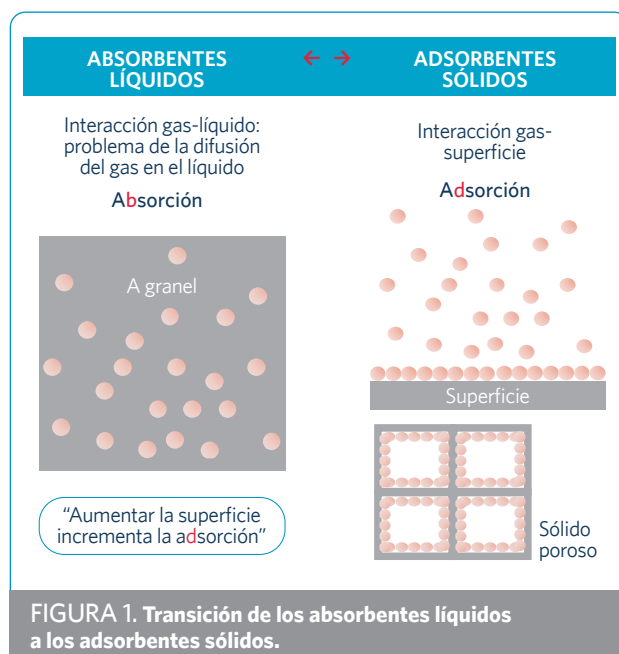
Dentro de las tecnologías actuales, se apuesta por el lavado con disoluciones acuosas de aminas para la captura de CO₂ (naturaleza electrofílica de la molécula de CO₂). En concreto, se opta por el ataque nucleofílico del grupo amino a las moléculas de CO₂ para dar lugar a carbonatos. Con este abordaje, el proceso de captura es bueno, pero conlleva una penalización muy relevante a la hora de regenerar el absor-

bente y liberar el CO₂, ya que supone un gran coste energético y económico, además de llevar aparejada una alta toxicidad y degradación de las aminas. Este procedimiento no es adecuado para la captura directa de CO₂ del aire^{2,3}.

En lugar de efectuar la **captura de CO₂ en un disolvente**, es posible realizarla **en una superficie** (en un adsorbente sólido); se trataría, en definitiva, de pasar de absorbentes líquidos (donde se produce una interacción gas-líquido, con el problema que supone la difusión del gas en el líquido) a adsorbentes sólidos (facilitando una interacción gas-superficie).

¿Cómo se puede llevar a cabo este proceso? Entre otras opciones, se puede mejorar la capacidad de captura aumentando mucho la superficie; como ejemplo práctico para entender esta idea pensemos en lo que sucede con un tendedero (*efecto tendedero*), que es un sistema que en poco espacio tiene mucha superficie y, gracias a ello, permite un intercambio rápido con el aire.

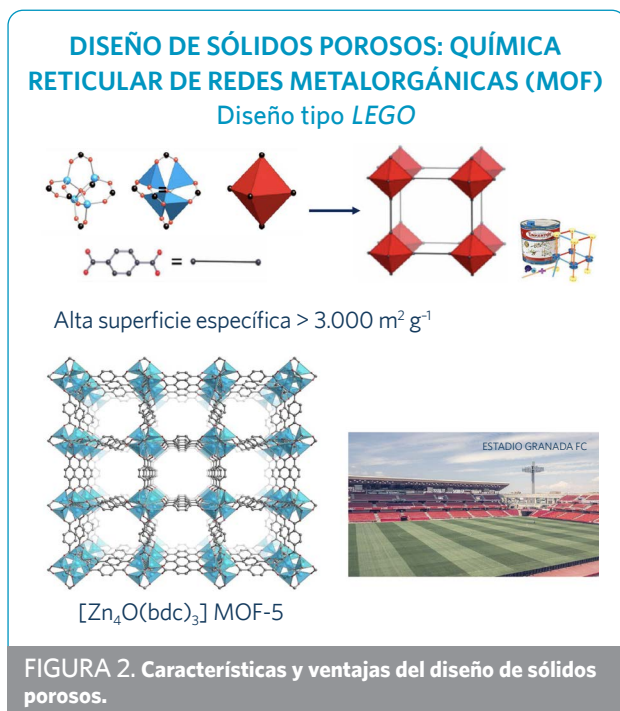
En el caso de la captura de CO₂, se usaría un **sólido poroso**, por lo que tendríamos mucha superficie de una forma muy condensada o apretada, donde sería factible maximizar esa captura (**Figura 1**).



Esto se puede conseguir con distintos materiales, y entre ellos resulta de especial interés un material sintético conocido como **red metalorgánica porosa**, que se basa en fragmentos inorgánicos. Son clústeres (normalmente metálicos)

y un espaciador orgánico que, cuando se asocian entre sí, forman una estructura que da lugar a canales o cavidades donde se pueden producir procesos de reconocimiento molecular. Una ventaja de este tipo de sólidos porosos es que su diseño es relativamente simple: en base a la química reticular de MOF, se trata esencialmente de escoger y ensamblar trozos adecuados (a modo de construcción tipo *Lego*).

La particularidad de estos materiales es que pueden alcanzar superficies extremadamente grandes (alta superficie específica $> 3.000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$); por ejemplo, un gramo de uno de estos materiales puede tener la superficie de un estadio de fútbol. Al ser materiales modulares (en los cuales se combinan fragmentos inorgánicos y orgánicos), es posible controlar de forma precisa el tamaño de esas cavidades si se selecciona una amplia variedad de espaciadores orgánicos (Figura 2).



En mi grupo de investigación hemos profundizado en estos aspectos, evaluando el control del tamaño de los espaciadores y de cómo ello permite manejar el tamaño de las cavidades para optimizar la captura de CO_2 ⁴.

Un aspecto crucial es determinar el tamaño de poro óptimo para la captura de CO_2 . En nuestro grupo de trabajo se ha efectuado una selección para ajustar el tamaño del poro a las dimensiones de la molécula de CO_2 . Se considera que un tamaño de poro adecuado para la captura de esta molécula es alrededor de tres veces la dimen-

sión molecular; así, teniendo en cuenta las dimensiones de la molécula de CO_2 , un poro de un nanómetro sería el apropiado para permitir una difusión óptima y las interacciones adecuadas (ni excesivamente altas ni bajas), y que puedan ser reversibles.

No debemos olvidar que es importante tanto la captura como la liberación posterior de las moléculas de CO_2 .

Las redes metalorgánicas porosas son sistemas cristalinos, lo que quiere decir que están constituidos por cavidades y canales que se repiten de forma monotónica a lo largo de las tres dimensiones espaciales (todas las cavidades son iguales). Ello permite interacciones selectivas, capaces de discriminar el tamaño de la molécula, concediéndole una propiedad que se denomina tamiz molecular. En un cristal ideal se repite todo de forma homogénea, lo cual es útil para algunas aplicaciones. Sin embargo, nuestros cristales (y otros sólidos) no suelen ser perfectos, sino que presentan imperfecciones (dislocaciones, defectos puntuales o defectos a gran escala).

Las propiedades electrónicas, la reactividad y las propiedades catalíticas y adsorbentes de los materiales en estado sólido dependen de la presencia de defectos. Estos defectos se encuentran favorecidos por la termodinámica, que da lugar a materiales más estables.

Es importante resaltar que muchas de las propiedades asociadas a estos sólidos porosos están relacionadas con la presencia de defectos, de forma que la mejora de las propiedades de las MOF en la captura de CO_2 se puede plantear a partir de la ingeniería de defectos⁵.

Diseño, síntesis y modificación de las redes metalorgánicas

Nuestro grupo de investigación ha trabajado intensamente en la generación de defectos para mejorar las propiedades de estos materiales y desarrollar nuevas opciones de captura de CO_2 . En concreto, se ha observado que el tratamiento postsintético de uno de estos sistemas con un exceso de potasa en alcohol (potasa alcohólica) produce vacancia de espaciadores orgánicos, a la incorporación de cationes en la red, así como a un incremento de la basicidad de los fragmentos metálicos. Esta creación de defectos en las redes $[\text{Ni}_8(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_2(\text{BDP-X})_6]$

da lugar a “autopistas” que facilitan el transporte de las moléculas de CO₂ (estructura de poros jerarquizada) y mejoran las interacciones (centros básicos, polarización de cargas).

Todo ello favorece un incremento significativo en la capacidad de adsorción de CO₂ de estos materiales. Esta capacidad se ha determinado mediante la medición de curvas de ruptura, que consiste en hacer pasar un flujo de gas (con composición análoga a las emisiones de una central energética) por un filtro relleno de adsorbente, para determinar la selectividad y el tiempo necesario para que el material poroso se sature de un determinado componente (N₂ y CO₂)⁶. Esta mejoría en la capacidad de adsorción se debe, entre otros factores, a la creación de centros básicos que son de carácter nucleofílico y capaces de atacar la molécula de CO₂, induciendo la formación de carbonato. Además, se trata de un proceso totalmente reversible.

Otra ventaja de estos materiales es que sus propiedades se pueden modificar mediante cambios iónicos. Por ejemplo, es posible efectuar un cambio iónico con bario (Ba₂₊) para tratar de lograr que las interacciones con otros tipos de moléculas (como el dióxido de azufre [SO₂]) sean más efectivas. En este caso, hemos observado que es factible adsorber y regenerar el adsorbente múltiples veces sin que se produzca una pérdida en la capacidad de absorción, al ser interacciones completamente reversibles.

Aportaciones del *Big Data*

En nuestra búsqueda por hallar nuevos materiales para la captura de CO₂, recientemente hemos colaborado en una iniciativa innovadora que utiliza el *Big Data*, tratando de asemejar el proceso de selección de fármacos con datos estructurales.

En el caso de fármacos, se conoce la estructura del centro activo de la proteína causante de una enfermedad, mientras que la estructura del ligando (fármaco) es desconocida. En este caso, se trata de buscar una molécula activa que se ajuste al modelo de interacción y bloquee la actividad causante de esa enfermedad; esta búsqueda se realiza

en una amplia librería (*Big Data*) que puede incluir tanto compuestos conocidos como desconocidos.

La interacción proteína-fármaco se basa en el modelo llave-cerradura, que supone que la estructura del sustrato y la del centro activo de la proteína son complementarias. Así, se lleva a cabo un *screening* computacional y se detecta el tipo de moléculas que se ajustan mejor a ese centro activo. Seleccionada la molécula que mejor encaja, se intenta trasladar las evidencias a un ensayo clínico que corrobore o no su funcionamiento y si surgen problemas de toxicidad.

En base a esta experiencia, se ha probado la utilidad del *Big Data* para la selección de la mejor MOF para la captura de CO₂; sin embargo, en la búsqueda de un material mejor para esa captura, se parte de una situación inversa a la que se produce en la selección de fármacos.

En este caso, conocemos el ligando (la molécula huésped, que es el CO₂), pero desconocemos la red porosa anfitriona, la estructura de la molécula anfitriona. Por tanto, el objetivo es buscar el centro activo, el llamado “adsorbaforo”⁷.

Este intento de búsqueda de la MOF óptima ha partido de la creación de una librería virtual seguida de una validación experimental del sistema.

Se ha construido una librería de más de 300.000 MOF y explorado sus propiedades mediante *Data Mining* para identificar un material que tenga una alta capacidad y selectividad por la adsorción de CO₂ frente al nitrógeno y al agua (componentes del aire o del gas). Se ha encontrado el motivo estructural óptimo e ideal (adsorbaforo); se trata de dos anillos aromáticos separados unos 7 ángstrom, donde se pueden acomodar las moléculas de CO₂ a modo de sándwich.

Finalmente, la última etapa del estudio ha consistido en sintetizar de forma dirigida uno de estos materiales y validar experimentalmente las propiedades de captura de CO₂. Ahora se debe probar el rendimiento de estos MOF en un entorno industrial y considerar el proceso de captura completo⁷.

CONCLUSIONES

- » Las características modulares de las **MOF** permiten su optimización y las hacen **adecuadas para la captura de CO₂**, así como de otros gases de interés medioambiental.
- » Además de la propia síntesis de las MOF, sería interesante **estudiar las sinergias de la creación de defectos, cambio iónico e introducción de centros básicos**.
- » Finalmente, el **Big Data** ofrece nuevas posibilidades para **acelerar el descubrimiento de nuevos materiales** con propiedades 'a la carta'.

Referencias bibliográficas:

1. Petit J, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*. 1999;399(6735):429-36.
2. Rochelle GT. Amine scrubbing for CO₂ capture. *Science*. 2009;325:1652-4.
3. Mondino G, Grande CA, Blom R, et al. Moving bed temperature swing adsorption for CO₂ capture from a natural gas combined cycle power plant. *Int J Greenhouse Gas Control*. 2019;85:58-70.
4. Padial NM, Quartapelle Procopio E, Montoro C, et al. Highly hydrophobic isorecticular porous metal-organic frameworks for the capture of harmful volatile organic compounds. *Angew Chem Int Ed Engl*. 2013;52:8290.
5. Fang Z, Bueken B, De Vos DE, et al. Defect-engineered metal-organic frameworks. *Angew Chem Int*. 2015;54(25):7234-54.
6. López-Maya, Montoro C, Colombo V, et al. Improved CO₂ capture from flue gas by basic sites, charge gradients, and missing linker defects on nickel face cubic centered MOFs. *Adv Funct Mater*. 2014;24:6130.
7. Boyd PG, Chidambaram A, García-Díez E, et al. Data-driven design of metal-organic frameworks for wet flue gas CO₂ capture. *Nature*. 2019;576:253-6.



La biomasa para los combustibles y productos químicos del mañana

Prof. Jean-Paul Lange

Shell Global Solutions International B.V., Ámsterdam, Países Bajos & Tecnología de Procesos Sostenibles, Universidad de Twente, Enschede, Países Bajos

¿Es posible 'desfossilizar' la Tierra y eliminar el hidrocarburo fósil que estamos utilizando, sustituyendo esta fuente de energía por fuentes de energía renovables y garantizando que los materiales que usamos sean carbono-neutrales?

Actualmente, utilizamos los hidrocarburos para la **industria del transporte, la construcción y la producción de electricidad** mediante combustibles fósiles. También se usa el hidrocarburo fósil para hacer **productos químicos**. Partiendo de esta realidad, parece imposible en estos momentos que los hidrocarburos sean totalmente reemplazados en un futuro próximo por la electricidad.

El sector de la electricidad puede utilizar energía renovable de forma relativamente fácil en algunos sectores (como la construcción), pero será mucho más complejo y un reto mucho mayor en el resto de los sectores (por ejemplo, en la industria y en el transporte).

Problemas y alternativas

En los últimos años se han desarrollado diferentes escenarios que nos han permitido investigar cómo limitar que la temperatura del planeta ascienda 1,5 °C, que sería el punto de no retorno. En este contexto, se estima que hacia finales de este siglo prácticamente la mitad de estos sectores estarán sustentados por energías renovables; pero aun así, casi la otra mitad seguirán dependiendo de los combustibles fósiles (transporte pesado como la aviación, o las industrias del cemento, el acero o la química) (**Figura 1**)¹.

Estamos trabajando para que hacia finales del siglo XXI se pueda ofrecer a los consumidores energía renovable, aunque es cierto que todavía quedará al menos una décima parte de los sectores que no podrá satisfacer totalmente sus necesidades con este tipo de energía. En el caso del sector químico, resulta especialmente complejo cubrir con energías renovables la gran cantidad de plástico que se demanda actualmente.

Deberíamos reciclar mucho más y mejor nuestros productos químicos para reducir el influjo del hidrocarburo en este sector económico.



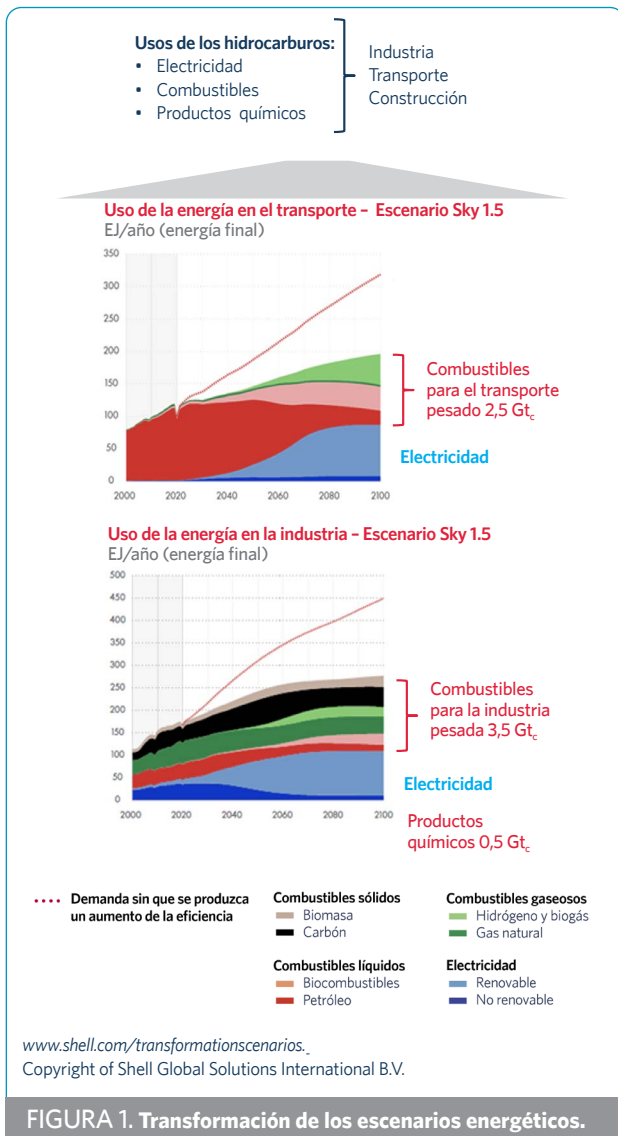
Prof. Jean- Paul Lange

El papel de la biomasa

Según lo comentado, se va a necesitar bastante carbono, pero tiene que ser renovable y neutral para que se mantenga el equilibrio energético de la atmósfera. En este sentido, consideramos que la biomasa podría ser un buen recurso para el equilibrio de CO₂ en la atmósfera.

La Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de diciembre de 2018, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, define la **biomasa** como la *fracción biodegradable de los productos, residuos y desechos de origen biológico procedentes de actividades agrarias, incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal, de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos, incluidos los residuos industriales y municipales de origen biológico*.

La biomasa es materia orgánica utilizada como fuente energética que incluye un amplio y heterogéneo conjunto (tanto por su origen como por su naturaleza) de materia orgánica.



En el **contexto energético**, la biomasa puede considerarse como la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Sin embargo, el empleo de la biomasa se enfrenta también a problemas típicos y clásicos relacionados con la sostenibilidad y su abundancia. El uso de biomasa para proporcionar servicios energéticos es una opción estratégicamente importante para aumentar la adopción mundial de energías renovables. Sin embargo, los aspectos prácticos para acelerar el despegue no están exentos de controversias, como los posibles conflictos de recursos, en particular, en lo que respecta a la conservación de la tierra, el agua y la biodiversidad².

En cuanto a la **sostenibilidad de la biomasa**, a día de hoy el principal problema reside en resolver cómo y dónde cultivarla. Actualmente, disponemos de una biomasa que cubre las necesidades básicas (como la alimentación), pero

también contamos con otra parte que está disponible para productos secundarios, resultantes de la industria. Los residuos que proceden de la agricultura y de la silvicultura se pueden utilizar para el cultivo. También sería necesario dejar de considerar como residuo todo deshecho que tiene suficientes proteínas para la alimentación (permitiendo complementarla), ya que en el futuro pueden ser escasos y difíciles de obtener. Estos excedentes también se podrían utilizar para generar energía o combustibles, los denominados *bioproductos derivados de la biomasa*.

También existe la **posibilidad de cultivar y cosechar la biomasa**. Se trata de un recurso sostenible, porque requiere un bajo *input* para su producción, ya que necesita poca agua de riego, pocos fertilizantes, pesticidas, etc. Aunque la sostenibilidad no solamente radica en qué tipo de biomasa se utiliza, sino que es igualmente importante determinar cómo y dónde se cultiva.

En realidad, no podemos generalizar qué hacer con la biomasa, sino que lo más importante es identificar y evaluar a nivel local sus características: de dónde proviene, cómo se va a cultivar y para qué se va a utilizar.

Pese a todo esto, surge otra duda en cuanto a su abundancia: *¿tenemos suficiente biomasa?* Para responder a esta cuestión es preciso efectuar una exhaustiva evaluación de las condiciones previas esenciales para aumentar los niveles de producción de biomasa. Hoy en día estamos cultivando alrededor de 1,5 toneladas de hidrocarburo en la biomasa, que es un tercio de lo que utilizamos, y que también podría suponer parte de lo que necesitaríamos para cubrir las necesidades eléctricas a finales de siglo. Pero el límite no está ahí².

¿Podemos mejorar estos datos? Sí, ya que es posible mejorar la agricultura, la silvicultura, la fertilidad de las tierras y cambiar nuestra dieta, todo esto nos podría ayudar a incrementar significativamente la biomasa disponible.

Todas estas opciones nos podrían permitir aumentar la cantidad de biomasa disponible hasta superar las 10 gigatoneladas (Gt_c), siempre y cuando establezcamos un nuevo uso a los residuos de biomasa y seamos muy firmes con las medidas que hemos de adoptar. Por lo tanto, se podría decir que tendremos la posibilidad de que la biomasa desempeñe un papel significativo en nuestra economía al aportar la cantidad de carbono que nos hace falta².

Otra posibilidad que se plantea es si, en lugar de reutilizar esta biomasa, se podría obtener **de forma directa de la atmósfera**. Sin embargo, actualmente ya existen combustibles producidos a partir de biomasa cuyo coste es muy bajo,

por lo que sería complicado competir con ellos debido al elevado precio que supone la obtención atmosférica de biomasa. La obtención de biomasa a partir de la captura de CO₂ de la atmósfera supone importantes gastos; además, hay que tener en cuenta el coste del hidrógeno. En un escenario optimista, el coste del hidrógeno podría llegar a ser de 2 o 3 dólares por kilogramo (precio aconsejable: 1 \$/kg). El coste de capturar CO₂ de la atmósfera y del hidrógeno es, a día de hoy, muy superior a la biomasa que ya tenemos.

Por todo ello, la obtención de estos componentes de la atmósfera únicamente podría ser competitiva cuando se reduzcan sustancialmente los costes para aplanar la curva del coste global.

Con el tiempo, el CO₂ atmosférico desempeñará un papel clave, pero la **valorización de la biomasa es una opción a corto plazo mucho más fácil y económica (Figura 2).**

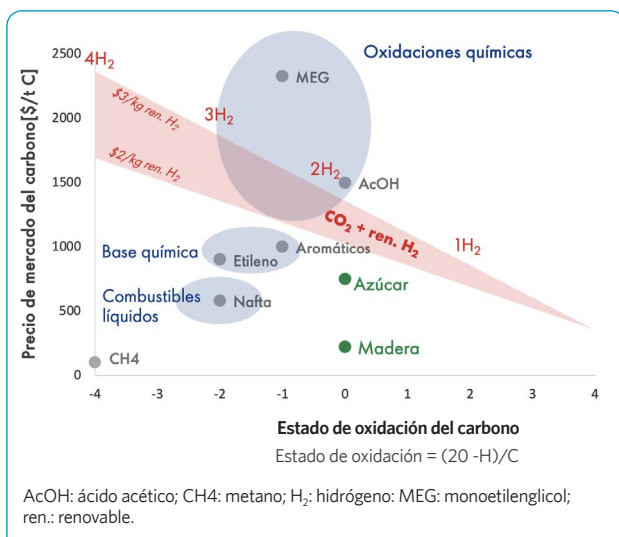


FIGURA 2. La valorización de la biomasa como opción más barata para la captura y utilización de CO₂ atmosférico en el futuro.

Por tanto, parece evidente que vamos a necesitar carbono renovable para combustibles y productos químicos pesados. Y que la biomasa es una materia prima que ostenta la triple 'AAA': *Available, Affordable, Acceptable*, ya que está disponible, es asequible económicamente y es aceptable o sostenible.

Tecnologías para biomasa digerible

Disponemos de numerosas tecnologías que permiten utilizar la biomasa y convertirla en distintos productos.

En el caso de la **biomasa digerible** (*digestible biomass*, es decir, la que se presenta en forma de aceites vegetales o de azúcar y almidón), disponemos de tecnologías para su transformación en una amplia variedad de productos.

Los aceites vegetales pueden dar lugar al biodiésel o al aceite hidrotratado, mientras que el almidón/azúcar se puede transformar en etanol o ácido láctico. El azúcar también puede generar diversos productos que sirven para la biofermentación, hidrogenación o la conversión en ácidos, siendo entonces posible su evolución hacia productos bioquímicos o intermediarios de combustible.

Un caso particular es el de las tecnologías emergentes para la lignocelulosa de naturaleza recalcitrante.

La lignocelulosa es el componente mayoritario de la biomasa, y representa la **fente orgánica más económica, abundante y renovable del mundo.**

Dentro de la biomasa lignocelulósica se encuentran los residuos de procesos agrícolas, forestales o industriales, que se producen en grandes cantidades y que, generalmente, son inutilizados o eliminados mediante combustión al aire libre, ocasionando serios problemas ambientales.

En este caso, se nos plantean muchos desafíos, puesto que necesitamos tecnologías que ayuden a convertir esta biomasa, que es compleja, heterogénea y que contiene componentes como la lignina. Son componentes ricos en oxígeno que también tienen un alto peso molecular. De modo que, con la tecnología adecuada, podrían degradarse a un peso molecular mucho más bajo y, al interferir con parte del oxígeno, se podría lograr la estructura correcta requerida (Figura 3).

Para llevar a cabo este proceso existen dos tipos diferentes de abordajes:

1. Se puede optar por **utilizar procesos de bajo coste**: una tecnología muy sencilla que convierte la biomasa en un aceite. El proceso es fácil, pero el rendimiento es muy bajo y el producto/combustible que se produce tiene un escaso valor. En definitiva, con este abordaje se realizan procesos de bajo coste para productos simples y con un bajo rendimiento.
2. La otra alternativa consiste en **adoptar tecnologías más costosas**: son mucho más complejas, pero alcanzan un valor más elevado. En estos casos, el oxígeno se introduce en la biomasa y, por bifraccionamiento, se separan los dos componentes de la biomasa (azúcares y lignina)

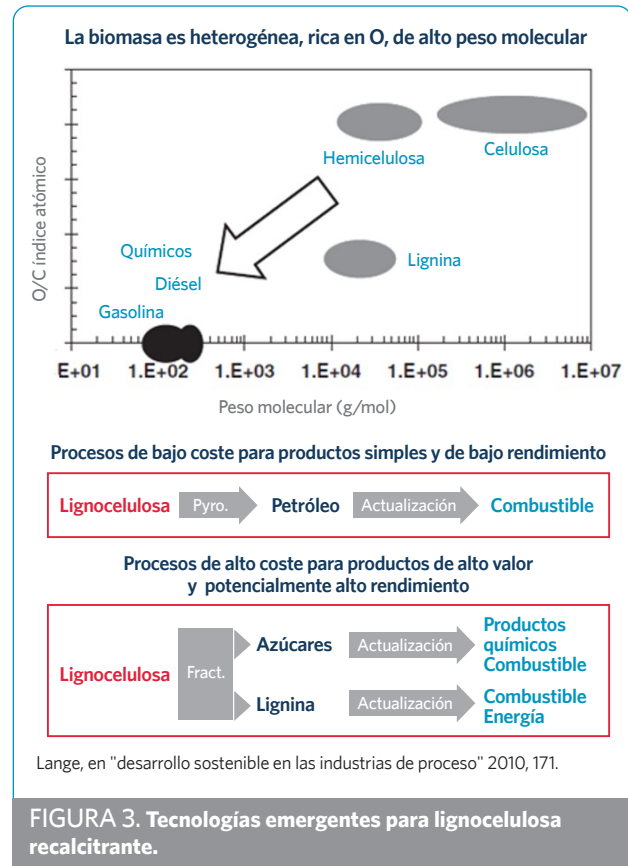
y se mejoran de forma específica según su propia bioquímica. Son procesos de alto coste, pero que ofrecen la posibilidad de obtener productos de alto valor y con un rendimiento potencialmente alto. En cualquier caso, aún se deben mejorar sus prestaciones para que este abordaje sea rentable y práctico.

Desde el punto de vista industrial, para optimizar este proceso se deberían tener en cuenta unos indicadores clave de rendimiento.

Hemos identificado cuatro indicadores que deben evaluarse necesariamente en una fase precoz de la investigación: la **selectividad**, la **productividad del reactor** (*reactor productivity*), la **concentración de producto** y la **resistencia a la destilación**.

La selectividad indica que tenemos una buena eficiencia de la biomasa, pues es un material caro y queremos utilizar lo máximo posible y de la mejor forma. Los otros tres factores se enfocan en aspectos de eficiencia para garantizar que sea algo sencillo, con una productividad rentable del reactor, que reduzca la necesidad de utilizar demasiados disolventes y que la recuperación de estos productos no sea demasiado compleja.

Respecto a la productividad y la concentración del producto que estamos procesando, el primer paso en el proceso de conversión desde la lignocelulosa a los azúcares se asocia con concentraciones bajas y también con una baja reactividad. Estas primeras unidades van a ser caras y grandes, pero es necesario que el comienzo sea así. Una vez que se estabiliza el proceso y se llega a las plataformas molecu-



lares, podemos destilar u operar a altas concentraciones y con una alta productividad. Hace falta seguir paso a paso este proceso para estar seguros de que cumplimos con las necesidades industriales y para que sea rentable económicamente y se explote todo su potencial.

CONCLUSIONES

- » He tratado de responder a dos cuestiones básicas: ¿Por qué necesitaremos carbono renovable para combustibles y productos químicos de alto rendimiento? y ¿cómo poder conseguirlo?
- » Hay motivos suficientes que explican y justifican la **necesidad de biomasa para combustibles y productos químicos**, siendo preciso garantizar que esta cumpla su triple estatus: que esté **disponible**, sea **rentable** y sea **aceptable o sostenible**.
- » También he destacado la **disponibilidad** actual de **tecnologías para incidir en la biomasa digerible** y la importancia de desarrollar nuevas para convertir la biomasa recalcitrante (lignocelulosa).

Referencias bibliográficas:

1. The Energy Transformation Scenarios [Internet]. Disponible en: www.shell.com/transformationsscenarios.
2. Slade R, Bauen A, Gross R. Global bioenergy resources. *Nature Clim Chang*. 2014;4:99-105.



¿Cómo manipular el océano para que absorba más CO₂?

Prof. Rosalind E. M. Rickaby

Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Oxford, Oxfordshire, Reino Unido

En los últimos años se ha avanzado significativamente en el desarrollo de técnicas artificiales para la absorción de CO₂ de la atmósfera. Dentro de estas, voy a explicar cómo funciona el mundo natural en términos de absorción de CO₂ y, en concreto, los aspectos básicos sobre el papel que tiene y puede jugar el océano en la absorción de CO₂.

Un océano de posibilidades

El océano es un buen almacén de CO₂ y uno de los reservorios más grandes del planeta; de hecho, el volumen de CO₂ que ya está almacenado en el océano es extraordinario, y se estima que contiene 38.000 gigatoneladas de dióxido de carbono (GtCO₂) en sus profundidades. La capacidad del océano para absorber CO₂ es enorme, y la suerte es que, a día de hoy, disponemos de conocimientos suficientes para manipular con facilidad el CO₂ almacenado en este medio. Sin embargo, se deben tomar muchas precauciones, ya que cualquier manipulación por nuestra parte puede suponer un riesgo, al perturbar quizás la propia estabilidad del océano como almacén de CO₂.

Es importante volver a recordar el acuerdo conseguido en la Cumbre del Clima de París, con un compromiso firme por parte de muchos países para intentar evitar que la temperatura en la Tierra aumente 1,5 °C en el futuro, con una serie de medidas para hacerlo de forma eficaz y teniendo en cuenta nuestra trayectoria de emisiones globales. Una de las principales medidas que se ha de adoptar, sin duda, es limitar las emisiones de CO₂, y para ello se deberían eliminar de 100 a 1.000 GtCO₂ antes del próximo siglo, lo cual equivale a un valor de 1 a 10 GtCO₂ al año. Un objetivo difícil de cumplir.

Almacenamiento de CO₂ en los océanos

Para situar bien en qué momento nos encontramos, es preciso evaluar y analizar el equilibrio actual de los océanos. Los datos nos indican dónde está el carbono y dónde se ha almacenado desde que empezamos a producirlo a partir de la Revolución Industrial. En los últimos 200 años, ha habido una gran acumulación de emisiones de CO₂, concentrán-



Prof. Rosalind E. M. Rickaby

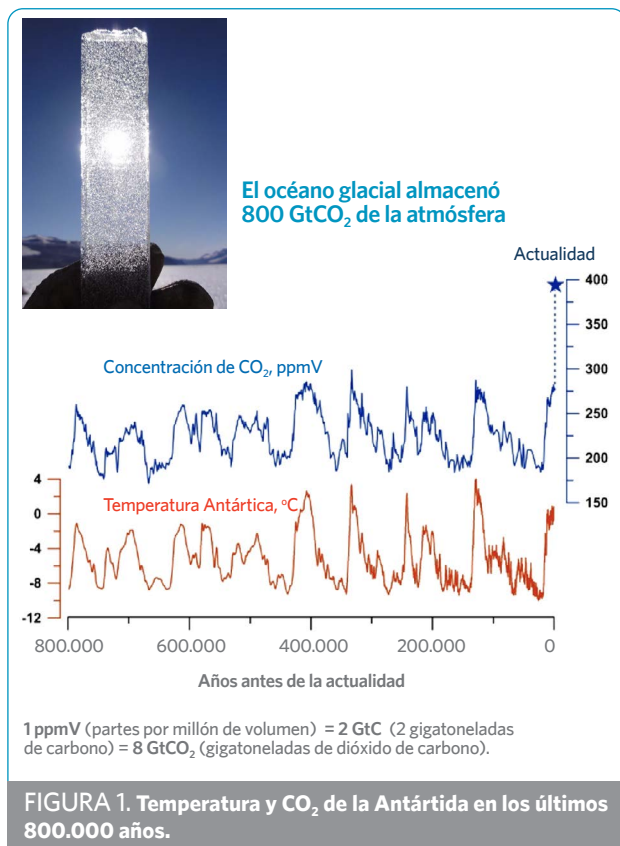
dose una tercera parte de ellas en los océanos, que ya han absorbido aproximadamente 500 GtCO₂ procedentes de la atmósfera (de un total de 1.300 GtCO₂ de emisiones antropogénicas).

Los océanos actualmente absorben CO₂ a una tasa de alrededor de 2 GtCO₂/año. Desde que empezamos a añadir CO₂ a la atmósfera, el océano lo ha captado con una tasa de aproximadamente 9 GtCO₂/año.

La cantidad de CO₂ almacenada en la atmósfera supone un tercio del carbono emitido anual. Otro tercio se incorpora en la biosfera terrestre, y el tercio restante se acumula en la atmósfera. Esto revela que los océanos ya han amortiguado el impacto provocado por las emisiones de CO₂.

Gracias a registros térmicos en isótopos de restos de hielo recogidos en la Antártida, podemos estudiar la historia del planeta y remontarnos hasta 800.000 años. Así, las pequeñas burbujas contenidas en el hielo nos informan con exactitud sobre lo que sucedió con el CO₂ en el pasado. El

CO₂ entraba y salía, con picos durante los períodos cálidos y valles en los períodos fríos (cuando la temperatura de la Tierra bajaba significativamente). Estas variaciones en la temperatura se han producido de forma continua durante miles de años, por lo que el océano ha estado absorbiendo CO₂ en los períodos más cálidos y expulsándolo cuando bajaba la temperatura. Un cálculo aproximado estima que el océano glacial ha almacenado ya por lo menos 800 GtCO₂, efectuando intercambios periódicos de gases (con un efecto de expulsión/absorción) (Figura 1).



También se deben tener en cuenta las grandes áreas de hielo que se extendieron por amplias extensiones de la Tierra, haciendo que el océano tuviese que absorber una gran cantidad de carbono de esa masa terrestre que se menguó (unos 2.800 GtCO₂ de la biosfera terrestre reducida). En total este océano glacial podría almacenar 3.600 GtCO₂, lo que equivale a 0,07 Gt/año. El océano tiene la capacidad para absorber entre 1 y 10 GtCO₂ al año, pero su ritmo natural es 100 veces más lento de la velocidad que realmente necesitaríamos.

Hay otras maneras de manipular el CO₂ y, de hecho, el océano glacial está sirviendo de banco de pruebas y de confirmación de algunas hipótesis y alternativas.

El almacenamiento de CO₂ en el océano glacial profundo se sustenta en un equilibrio entre la biología, la química y la física¹.

Existen modelos que nos muestran cómo conseguir que los océanos contribuyan a alcanzar el nivel necesario de absorción de CO₂. Por ejemplo, la refrigeración y estratificación de las aguas permitiría que el CO₂ se almacenara a niveles más profundos. Por otro lado, sabemos que el océano tiene un nivel limitado de fertilización férrea y, además, se ha confirmado que la productividad de las aguas en términos de absorción de CO₂ tiene que ver con la profundidad¹.

La fertilización férrea es un componente del proceso de la reducción de carbono terrestre, al igual que también lo son los arrecifes de coral. Si el nivel de las aguas del mar se reduce drásticamente, todas esas áreas con arrecifes de coral desaparecen; en esta situación, el material de los arrecifes se añade al océano y con ello cambia su acidez, todo lo cual termina influyendo en la capacidad que este tiene para absorber CO₂.

Soluciones desde la biología, la química y la física

La biología, la química y la física forman parte de la compleja ecuación que determina la capacidad y función del océano para absorber CO₂. Además, en esta ecuación, en este delicado equilibrio, debemos tener en cuenta también otros elementos específicos, como la 'bomba' biológica del fitoplancton y el zooplancton en el océano, encargados de la fotosíntesis, que solo tiene lugar en la parte superficial del océano donde llega la luz. Esa materia orgánica baja posteriormente al fondo del océano y puede acumularse durante años (de 100 hasta 1.000 años o más) en la zona llamada "de la medianoche" (Figura 2).

Partiendo de esta realidad, cabe considerar que, si manipulamos la productividad del carbono biológico, podremos aumentar la cantidad de carbono que pueda absorber el océano.

Resulta crucial tener en cuenta la química del océano, y jugar con su acidez y alcalinidad como recursos de manipulación de las aguas.

El CO₂ acuoso es el que se intercambia con la atmósfera, de manera que, si se aumenta el pH del océano y su alcalinización, este CO₂ se convierte entonces en bicarbonato (HCO₃) y carbonato (CO₃), reduciéndose así el CO₂ acuoso que se devuelve a la atmósfera.

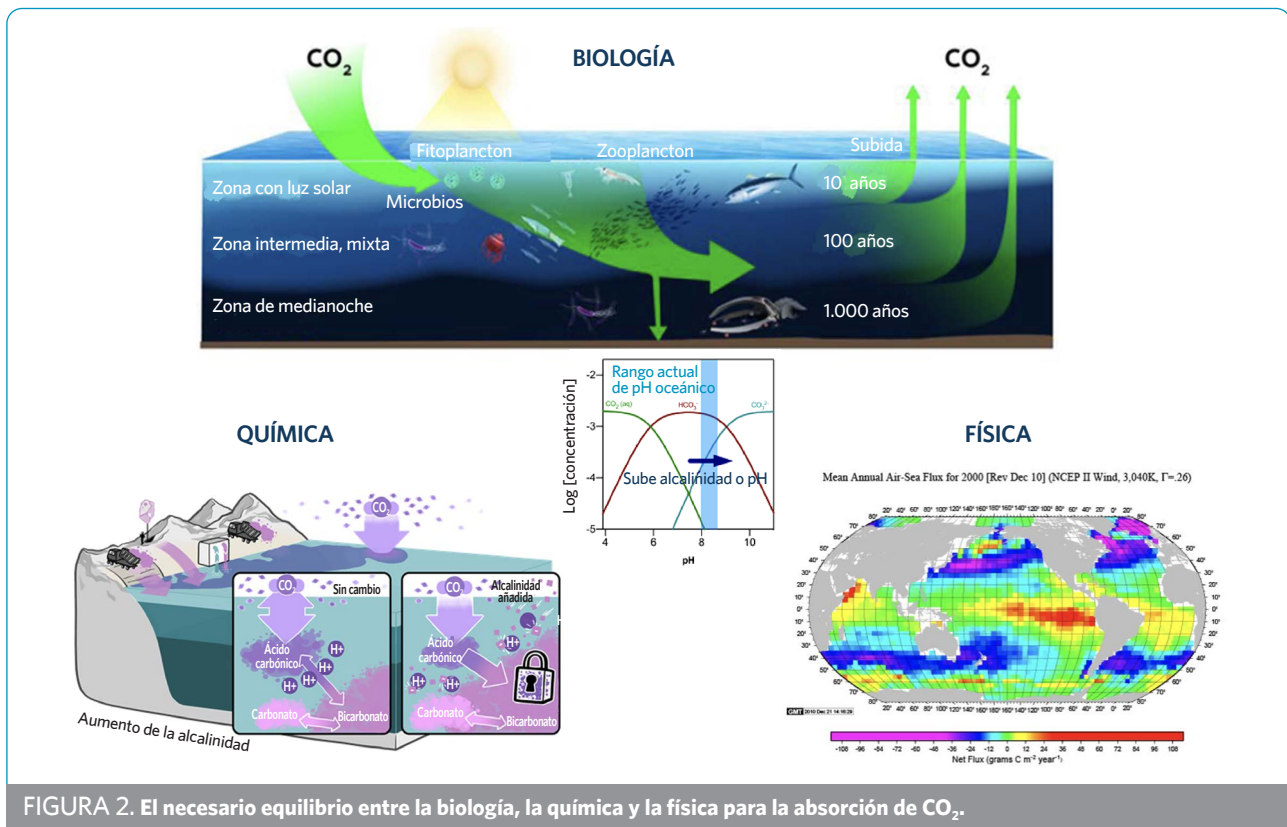


FIGURA 2. El necesario equilibrio entre la biología, la química y la física para la absorción de CO₂.

Pero la **física** también puede ayudar a este objetivo. Los océanos son como “esponjas de CO₂”, y hay áreas oceánicas en las que el CO₂ acuoso regresa a la atmósfera con una mayor intensidad; estas se sitúan en zonas del Ecuador, el Pacífico y en los mares del sur. Si manipulamos la física o estratificación de las aguas, podemos facilitar que el CO₂ no vuelva a la atmósfera.

Por lo tanto, hay diversos mecanismos que se están probando para intentar manipular el océano y ayudarnos a almacenar CO₂ en el mismo:

- Verter biomasa terrestre al océano.
- Fertilizar el océano con hierro para que se produzca un efecto de oxidación.
- Añadir nitratos y fosfatos, que son fertilizantes utilizados en tierra y que funcionan de la misma forma en el océano.
- Alcalinizar las aguas para conseguir que la absorción de CO₂ sea mayor.
- Adoptar nuevas opciones de mejora y manipulación de los manglares (por ejemplo, de las zonas de algas, para cambiar el nivel de biomasa en el terreno físico).
- Bombear las profundidades del océano para que el fitoplancton ascienda a niveles más altos.
- Bajar artificialmente el CO₂ a mayores profundidades.

- Manipular mediante bombas los niveles de los océanos (Figura 3).

Podríamos utilizar diferentes combinaciones químicas para retirar parte del CO₂ que se halla en el océano y ayudarle a absorber más, es decir, eliminar o extraer el CO₂ que ya tiene almacenado para aumentar su capacidad de absorber más.

La *National Academies of Sciences, Engineering and Medicine* ha publicado recientemente un informe que plantea una estrategia de investigación para la eliminación y la absorción de CO₂ en los océanos.

Se incluyen **seis abordajes**, que se clasifican sobre la base del: conocimiento, eficacia, durabilidad, tiempo de almacenamiento del carbono, escalabilidad, riesgos medioambientales y relación coste-beneficio.

Los seis grupos de enfoques que analizan son²:

1. **La fertilización con nutrientes.** La adición de micronutrientes (por ejemplo, hierro) y macronutrientes (por ejemplo, fósforo o nitrógeno) a la superficie del océano puede en algunos entornos aumentar la fotosíntesis del fitoplancton marino y, por tanto, mejorar la absorción de CO₂ y la transferencia de carbono orgánico a las profundidades del mar, donde puede quedar atrapado durante un siglo o más.

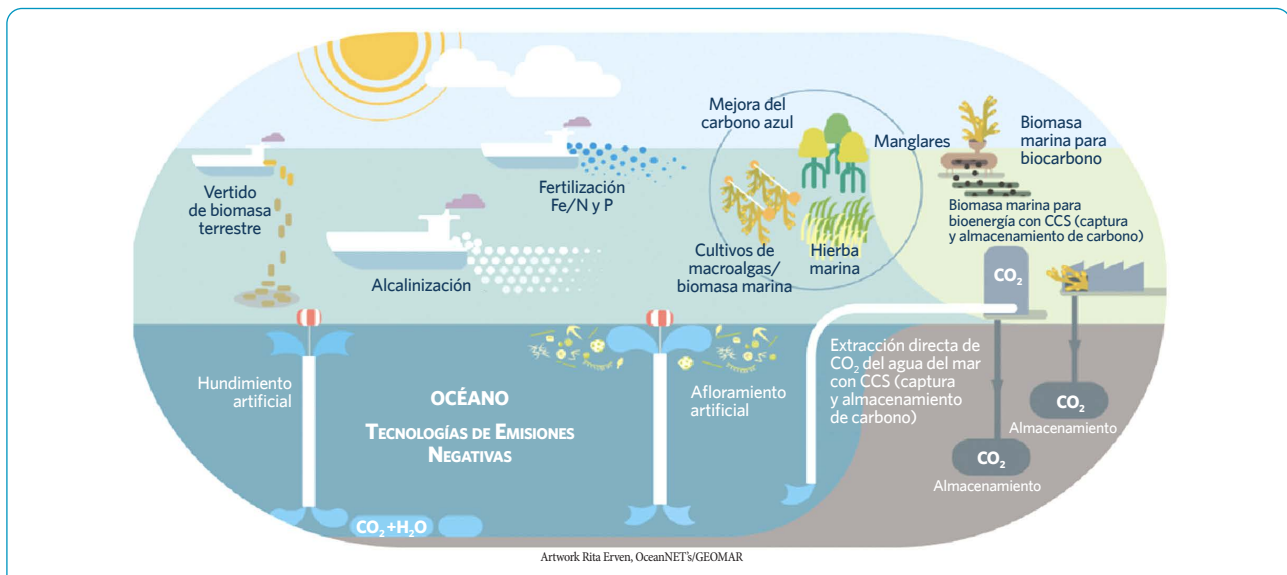


FIGURA 3. Opciones para mejorar la absorción de CO₂ de los océanos.

2. **El hundimiento (downwelling) o afloramiento (upwelling) artificial.** El *hundimiento artificial* es el transporte descendente de aguas superficiales con el objetivo de contrarrestar la eutrofización y la hipoxia en regiones costeras, y como un medio para transportar carbono al océano profundo. El *afloramiento artificial* es un proceso mediante el cual las aguas de las profundidades (que son generalmente más frías y más ricas en nutrientes y CO₂ que las aguas superficiales) se bombean a la superficie del océano.
3. **El cultivo de algas marinas.** El cultivo a gran escala de macrófitos (algas marinas) puede actuar como un recurso para eliminar CO₂ mediante el transporte de carbono orgánico a las profundidades del mar o en los sedimentos.
4. **La recuperación de ecosistemas oceánicos y costeros.** Eliminación y almacenamiento de CO₂ a través de la protección y restauración de los ecosistemas costeros (bosques de algas marinas y *Sargassum* flotante libre) y la recuperación de animales en el océano.
5. **La mejora de la alcalinidad del océano.** Alteración de la química del agua del mar a través de la adición de alcalinidad por medio de varios mecanismos, incluida la meteorización mineral mejorada y las reacciones electroquímicas o térmicas que liberan alcalinidad al océano, con el fin de eliminar el CO₂ de la atmósfera.
6. **Enfoques electroquímicos.** Eliminación de CO₂ o mejora de la capacidad de almacenamiento de CO₂ en el agua del mar mediante la manipulación de su acidez o alcalinidad, respectivamente.

Evitar los riesgos, una prioridad

Tras examinar todas las opciones, el enfoque basado en la fertilización con nutrientes oceánicos es el que cuenta con más información hasta el momento. La cuestión clave de esta técnica sería el riesgo medioambiental, aunque el desplazamiento del agua, el uso de algas y la manipulación de los ecosistemas también podrían suponer una cierta amenaza y riesgo medioambiental.

El principio esencial que debe presidir cualquiera de estos abordajes es no hacer nada que ponga en riesgo a los ecosistemas; es muy importante conservarlos y asegurarnos de que no corren ningún riesgo.

Para evitar riesgos hay que atender y aprender de los acontecimientos históricos medioambientales. Existen numerosas evidencias de que a lo largo del tiempo se produce la reducción de los niveles de oxígeno disuelto en el océano profundo cuando aumenta la estratificación. Si se acelera cualquier mecanismo de 'bomba biológica', se induce un fenómeno de oxigenación del océano, es decir, tiene como consecuencia una reducción del oxígeno disuelto en sus aguas. Históricamente, esto nos advierte sobre una de las consecuencias que podrían derivarse: un aumento de la 'respiración de las aguas' y una reducción del oxígeno.

En nuestro laboratorio se han llevado a cabo diversos trabajos experimentales para tratar de aumentar la alcalinidad del océano. Se han planteado varias ideas para lograr este objetivo y, de esta forma, deshacer el proceso de acidificación del océano y aumentar su capacidad para almacenar CO₂. Sin embargo, este enfoque no está exento de desafíos.

- Uno de los retos es que al aumentar la alcalinización podríamos reducir la acidificación del agua de los océanos. Se considera que es posible que se eleve la calcificación en respuesta al aumento de la alcalinidad, reduciéndose así la eficiencia de la captura y almacenamiento de CO₂. En el océano glacial, los descalcificadores aumentan en consonancia con la calcificación para compensar, por ejemplo, la pérdida de los arrecifes de coral.

En nuestro laboratorio hemos experimentado con muchas manipulaciones que muestran cómo **aumenta el nivel de calcificación al elevarse la alcalinidad del océano.**

- Para acelerar el proceso natural cien veces por encima de la velocidad normal se pueden añadir otros elementos, de manera que inevitablemente se aumentaría el flujo de sustancias como el cromo, el níquel o el vanadio, incrementándose el riesgo de una toxicidad que no sería deseable.

Si logramos alcanzar un nivel de emisiones cero en el futuro, el CO₂ se equilibrará y el que ya está en el océano se liberará y volverá a salir fuera de este entorno.

Esto supone que el CO₂ se va a filtrar otra vez a la atmósfera dependiendo de la profundidad en la que lo depositemos³.

- En los últimos meses, el gobierno del Reino Unido ha mostrado las acciones que está llevando a cabo junto con el gobierno de los EE.UU. para lograr un nivel cero de emisiones de CO₂, incluyendo principalmente la replantación de árboles y la plantación de nuevos árboles.

En todos estos escenarios, se intenta desarrollar políticas sin considerar al océano como parte estratégica del plan para la captación de CO₂. Por ello, otro desafío importante es crear una estructura de gobierno a nivel global que incluya el uso del océano en todas las políticas que se implementen.

CONCLUSIONES

- » Podemos **manipular el océano para que absorba más CO₂**. Sin embargo, aún necesitamos investigar más para establecer el mejor abordaje y escoger las técnicas más adecuadas. Estas tecnologías están en sus inicios y tenemos el reto de hacer pruebas de campo que perturban en cierta medida el medioambiente para aprender lo que puede ocurrir al hacer estas manipulaciones a gran escala.
- » Es probable que necesitemos un **mosaico de diferentes técnicas y abordajes para equilibrar el riesgo de la escalabilidad**. Sin embargo, deberíamos decidir antes qué es lo que definitivamente no va a funcionar o no podemos probar debido al posible riesgo medioambiental negativo que conlleva.
- » Como científica, pienso que **hay que ser cautelosos a la hora de aumentar artificialmente la velocidad natural del océano para capturar CO₂**. Es preciso calcular muy bien las consecuencias no deseadas al acelerar cualquier proceso de 10 a 100 veces por encima de una tasa natural.

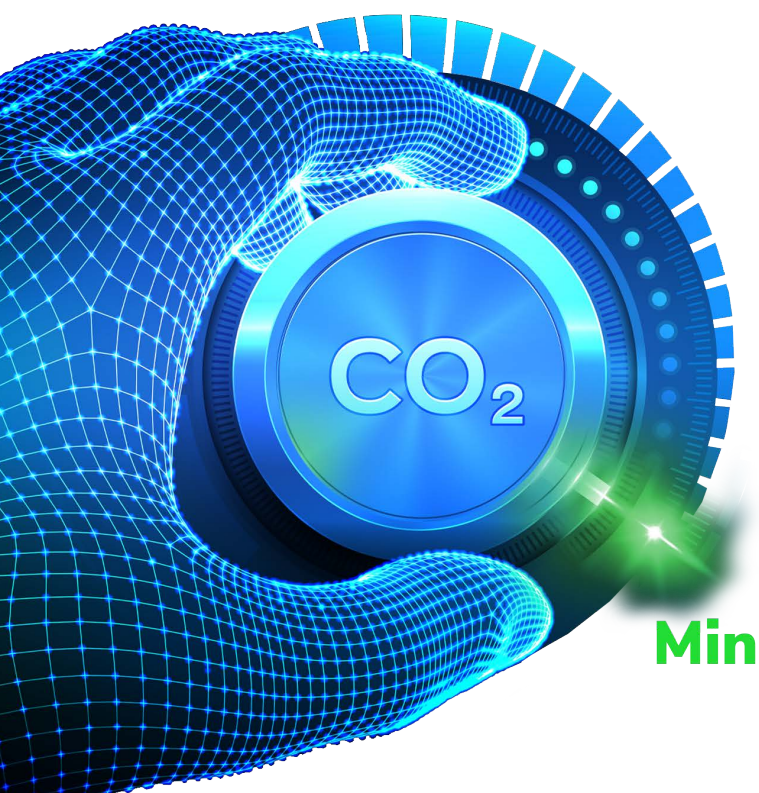
Referencias bibliográficas:

1. Brovkin V, Ganopolski A, Archer D, et al. Lowering of glacial atmospheric CO₂ in response to changes in oceanic circulation and marine biogeochemistry. *Paleoceanography*. 2007;22(4).
2. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration. Washington, DC: The National Academies Press. Disponible en: <https://doi.org/10.17226/26278>.
3. Gruber N, Landschützer P, Lovenduski NS. The Variable Southern Ocean Carbon Sink. *Annu Rev Mar Sci*. 2019;11:16.1-16.28.

debate

Moderadora:
Erika Pastrana

Mesa redonda:
Dra. Ah-Hyung (Alissa) Park
Prof. Jorge A. Rodríguez Navarro
Prof. Jean-Paul Lange
Prof. Rosalind E. M. Rickaby



Min



Debate

A modo de conclusión de estas conferencias, un **coloquio-debate** con los ponentes, moderado por **Erika Pastrana**, ha permitido profundizar y comentar los diferentes abordajes globales que se han descrito a lo largo de la sesión.

Erika Pastrana: Alissa, en su charla ha hablado sobre cómo las diferentes industrias están cambiando sus prácticas, sus tecnologías y sus niveles de emisión. ¿Cuál es su perspectiva sobre el potencial real de esas medidas y si pueden permitir que lleguemos a tener un mayor éxito?

Dra. Ah-Hyung (Alissa) Park: Este ámbito de la mitigación del cambio climático realmente se ha convertido en un verdadero problema global y la industria lo ha tenido en cuenta, debido a la economía circular. Para ser realmente eficaces es preciso adoptar medidas que se asienten en tres pilares: la tecnología, el mercado y la política. Cada columna tiene que establecer un equilibrio que permita crear un efecto global.

Erika Pastrana: También ha mencionado técnicas que parecen muy sencillas, pero que pueden contribuir a que la población general luche contra el cambio climático como, por ejemplo, la incorporación de filtros en los sistemas de calefacción. ¿Hasta qué punto existen soluciones realmente prácticas que todos podamos utilizar en nuestro hogar y qué papel vamos a desempeñar los ciudadanos a nivel individual? ¿Cuál es el equilibrio entre la industria y los individuos? ¿Cómo vamos a marcar una diferencia?

Dra. Ah-Hyung (Alissa) Park: El sector energético estaba compuesto por

grandes corporaciones, de modo que los individuos no teníamos mucho que hacer, no podíamos elegir recursos de energía ni qué tipo de energía utilizar. Ahora, con la alta cuota de penetración de las energías renovables, ya es posible poner en práctica una serie de medidas en el entorno y en nuestra vida diaria.

Hoy en día podemos entender su impacto práctico; sin embargo, la población no tiene los conocimientos y las habilidades necesarias.

Esto no puede cambiar de la noche a la mañana, y conseguir los objetivos va a ser muy difícil. No obstante, en la actualidad, las nuevas tecnologías se están incorporando de forma rápida; no cabe duda de que el nivel de preparación para la puesta en marcha de la tecnología se ha acelerado mucho en los últimos años.

El problema es que la nueva tecnología puede tener también, a su vez, un impacto sobre el medio ambiente. Por ejemplo, en relación con las soluciones basadas en la manipulación del océano, aunque son necesarias, conviene saber las consecuencias que podrían producirse a raíz de esa manipulación. Tenemos que planificar mejor, e incluir en la toma de decisiones a todos los interesados del mundo académico, científico, de la industria y a los individuos; con su conocimiento y ayuda será posible saber cuáles van a ser las consecuencias a corto, medio y largo plazo de estas medidas.

He mencionado también el tema de los filtros en los sistemas de calefacción. Esas son medidas que también se adoptan de una forma sencilla, y que la población general puede aplicar en su vida cotidiana.

Sin duda, cuantas más partes implicadas haya, antes será posible que la población pueda apreciar el resultado de sus decisiones. Por eso me gustan esos abordajes, aunque ello no significa que todo el mundo tenga que tomar medidas específicas, sino que debemos implantar medidas todos.

Disponemos de la tecnología, pero la pregunta es si podemos sacar adelante este proceso global. La economía de carbono circular se ve limitada por el desarrollo tecnológico, pero también por la disponibilidad futura de energía renovable barata, así como de hidrógeno.

Erika Pastrana: En su conferencia, Jean Paul, ha comentado las nuevas fuentes de energía y ha puesto el foco en los viajes en avión. No podemos vivir sin el transporte aéreo, forma parte de nuestra sociedad. ¿Podría hablarnos un poco más de lo que considera que va a pasar con los viajes en avión? ¿Cómo puede hacerse más sostenible este tipo de transporte desde el punto de vista medioambiental?

Prof. Jean-Paul Lange: Es muy buena pregunta, Erika. Creo que tenemos diferentes opciones para los viajes en avión. Se han hecho algunos intentos de electrificación, que sería una solución para las distancias cortas, pero no para las distancias largas debido al peso de la batería que tendría que llevar el avión. La aviación necesita un combustible muy denso, porque el espacio disponible es muy limitado. También pesa y hay que levantar el artefacto en el aire a 10 km de altura, por lo que el combustible es clave.

De momento, estamos examinando dos posibles energías para la aviación: el hidrógeno y los hidrocarburos renovables. Lo mejor del hidrógeno es que se trata de un combustible muy ligero; sin embargo, necesita un depósito muy pesado y también se precisaría mucho volumen. En este sentido, se están haciendo importantes esfuerzos para modificar el diseño de las aeronaves, con ideas tales como situar a los pasajeros en las alas y colocar el combustible de hidrógeno en el centro, en el fuselaje. El diseño de los aviones sería completamente diferente al actual y, quizás, incluso, el de los propios aeropuertos, que deberían adaptarse para que los pasajeros accediesen al avión de forma distinta a como lo hacen ahora.

La otra opción que se está explorando para aplicar en la aviación son los combustibles renovables basados en carbono. Cabe mencionar, en este sentido, el biocarbono o el CO₂. A día de hoy, el biocarbono (que se obtendría de aceites vegetales) es el que más se está valorando porque, entre otras cosas, es el menos caro, aunque es de tres a cuatro veces más costoso que el que se utiliza actualmente. Este podría ser un paso inicial, pero no va a ser la solución a largo plazo: no hay tanta biomasa de este tipo en el mundo para satisfacer la alta demanda de combustible de la aeronáutica global.

Por este motivo, tenemos que enfocarnos en otros tipos de biomasa para generar ese carbono a largo plazo, como capturar el CO₂ de la atmósfera, o apostar por el empleo del hidrógeno. Y si no se puede utilizar el hidrógeno de forma directa en los aviones, seguramente se podría combinar con el carbono. Desde el punto de vista técnico, esta última opción es factible, tal y como hemos demostrado en Ámsterdam, ya que ha sido posible colocar en un avión media tonelada

de combustible. Sin embargo, tiene un coste muy elevado y un margen de mejora inmenso.

Erika Pastrana: *En cuanto a los nuevos métodos que se están utilizando para diseñar mejores materiales, como la inteligencia artificial, me gustaría conocer la opinión de Jorge sobre el papel que puede desempeñar este recurso a la hora de encontrar materiales nuevos y para optimizar la captura y liberación de CO₂. ¿Dónde advierte más posibilidades en los próximos dos o tres años? ¿En qué área va a aportar más valor la inteligencia artificial?*

Prof. Jorge A. Rodríguez Navarro: El *Big Data*, los datos masivos y la inteligencia artificial tienen un potencial enorme a la hora de encontrar nuevos materiales y optimizarlos. Como se ha señalado en esta reunión por parte de mis colegas, ahora sabemos, por ejemplo, que con el tiempo el pH de los océanos va a aumentar, lo cual tendría ventajas y produciría beneficios, pero se desconoce cuál sería el impacto a largo plazo, que posiblemente sea negativo.

La inteligencia artificial permite el análisis de múltiples parámetros y nos podría ayudar a saber qué y cuántos factores hay que tener en cuenta para sentirnos más seguros a la hora de aplicar mejores abordajes sin el riesgo de inducir un posible impacto negativo. Sin embargo, es cierto que no todos los datos obtenidos mediante este sistema basado en la inteligencia artificial concuerdan con lo que posteriormente suceda al aplicar los resultados a la realidad, pues las pruebas reales siempre llevan consigo consecuencias no previstas.

Erika Pastrana: *Rosalind, ¿cuáles son las posibles consecuencias no previstas que podría acarrear la manipulación de los océanos con estas nuevas técnicas? ¿Qué es lo que más le preocupa de esta opción?*

Prof. Rosalind Rickaby: Lo que más me preocupan son los ecosistemas y el bien de la biota. Supongo que no muchos conocen estas formas de vida, pero las algas y los microorganismos oceánicos proporcionan la mitad del oxígeno que disfrutamos en nuestra atmósfera y extraen la mitad del CO₂, por lo que son de crucial importancia para nuestra vida. No debemos olvidar tampoco que el pescado es la base de la nutrición en muchos países, ni tampoco se debe obviar la importancia de los arrecifes de coral, siendo estos últimos unos ecosistemas que, además de promover el turismo submarino, ayudan a proteger la costa de las mareas, contribuyen a amortiguar otros eventos naturales dañinos para los seres humanos y constituyen un bioindicador de la salud del agua.

Existe el riesgo de poner todo esto en peligro con estas nuevas tecnologías. Hay cosas que podemos hacer para reducir el nivel de riesgo, pero realmente mi gran temor a la hora de manipular el océano es el oxígeno. Hay niveles muy profundos del océano donde el nivel de oxígeno ya es muy bajo; a este respecto, sería positivo si pudiéramos centrarnos en esas zonas para enterrar en ellas el carbono. Además, el océano profundo tiene sedimentos de carbonato cálcico que reaccionarían de forma natural con el CO₂ inyectado, lo que haría posible que, a esas profundidades y con el tiempo, la acidez se neutralizase.

Sin duda, la clave en el océano es el lugar en el que vayamos a ejercer nuestra acción. Sin embargo, hay diferentes zonas que varían mucho entre sí. Deberíamos hacer un abordaje 'regional' del océano: es importante analizar y determinar qué enfoques podemos aplicar dependiendo de la región del océano para obtener el máximo impacto positivo y el mínimo impacto negativo.

Presentation

This year is the **fourteenth edition** of an activity that has already become a classic – a scientific event of reference. It is a relationship maintained overtime by **Springer Nature** and **Fundación Ramón Areces**, which gives us all great satisfaction and is essential to explore the most diverse topics in the scientific world.

Undoubtedly, few topics today have greater interest than the sustainability of the planet we live in and the maintenance of the quality of the air we breathe. We are talking, not only about producing less CO₂, but also about trying to ‘absorb’ or collect some of the excessive CO₂ produced.

Therefore, it is a great honour and satisfaction for me to welcome our Spanish and International colleagues, and to thank **Springer Nature** again for their collaboration.



Emilio Bouza Santiago

President of the Scientific Committee
of Fundación Ramón Areces, Madrid, Spain

Welcome to the **fourteenth conference-debate**, which is the result of the collaboration between **Fundación Ramón Areces** and **Springer Nature group** that, for the second consecutive year, is held online. Like everybody else, we hope that the pandemic will subside little by little and that next year we can see the auditorium full of science enthusiasts once more.

Throughout these pandemic months we have learned that global problems require global solutions. This year's topic, **ATMOSPHERIC CO₂ CAPTURE: technologies for a sustainable future**, brings us closer to a global problem such as the planet warming. It is clear that the increasing population and the growing demand for energy and water make it difficult to achieve the sustainable development goal that the UN has called 'Climate Action'. However, we believe that the coordinated collaboration of scientists, governments and the general population can help to develop and implement strategies that will bring us closer to this goal.

One of the most important measures is undoubtedly the reduction of gas emissions responsible for the greenhouse effect, and the consequent increase in the use of renewable energies. However, this measure, on its own, is not enough; other methods and technologies that actively reduce the amount of these gases in the atmosphere, in particular carbon dioxide (CO₂), are also required.

In this edition, our guest speakers will show us various strategies that allow CO₂ capture and storage in biological structures or in ocean biomass. They will also show us the latest advances in the design of specific materials that facilitate CO₂ absorption and transformation.

In **Springer Nature** we are firmly convinced of the importance of disseminating and bringing the latest scientific advances to the general public, and of encouraging and facilitating communication between scientists, academics, private industry and governments. It is essential for all of us to establish a dialogue that will enable the implementation of effective and feasible measures that contribute to a more sustainable future. To show our commitment, **Springer Nature** has participated in the recent Glasgow Climate Summit (COP26). We have also organized together with the United Nations (UN) the Second Scientific Conference for a 'Sustainable Future' and we have added to our list of titles various publications and journals focused on *sustainability*.

Like every year, we thank **Fundación Ramón Areces** for the opportunity to collaborate in these conferences; we also thank its **Scientific Committee**, represented by professors Emilio Bouza and José María Medina, for choosing such a necessary topic. In addition, it allows us to bring to the public the solutions that are beginning to be glimpsed from various scientific fields to face one of the most pressing problems of today's society. We also thank the General Director of the Foundation, Mr. Raimundo Pérez-Hernández y Torra, and the Director of Communication, Mr. Manuel Azcona, for the trust placed in us to continue organising these meetings, even in pandemic times.

I would also like to thank the speakers **Alissa Park**, **Jorge A. Rodríguez Navarro**, **Jean-Paul Lange** and **Rosalind Rickaby** for their availability to participate in this meeting. Finally, I want to thank **Erika Pastrana**, editorial director of the Nature journals, for moderating this event.

Soledad Santos
Editorial Director for Spain and Portugal,
Springer Healthcare,
a Springer Nature Business



introduction



Erika Pastrana

Editorial Director of Nature Journals
New York, USA

Erika Pastrana has a degree in Biochemistry and Molecular Biology from 'Universidad Autónoma de Madrid' and was granted a doctorate at the same university, investigating the cellular and molecular mechanisms responsible for promoting the regeneration of damaged axons in the mammalian central nervous system. After her doctoral thesis, Erika went to New York for four years where she did her postdoctoral studies at Columbia University studying neurogenesis and neural lineage progression mechanisms in adult mice.

She began her publishing career in 2010 as editor at *Nature Methods*, where she was in charge of neurosciences, and in March 2014 she moved to the *Nature Communications* journal as Team Manager. In April 2017 she began as Executive Editor in the Division of *Nature Research Journals* and, in 2019, as Editorial Director of *Nature Journals* being responsible for the management and editorial direction of applied sciences and chemistry, including *Nature Biotechnology*, *Nature Medicine*, *Nature Biomedical Engineering* - among others - and, more recently, *Nature Electronics*, *Nature Mental Health* and *Nature Machine Intelligence*.

Erika is part of the *Nature Research* management team and is responsible for the development and implementation of new editorial policies, practices and workflows.



Introduction

First of all, I want to thank **Fundación Ramón Areces** for continuing, one more year, with its sustained support to science in all aspects. We also want to acknowledge their help – indispensable to make this conference possible – which aims to publicize and disseminate topics of great social importance by the hand of international experts of reference in this field.

Global warming is one of the most pressing problems we face as a society in this century, and it is one of the topics that requires the most urgent course of action. In 2015, international organizations met in Paris to agree on a series of urgent measures to reduce CO₂ emissions into the atmosphere and to transform energy sources by promoting renewable energies. These measures were intended to try to placate global warming with the aim of not increasing the planet's temperature more than 1.5 degrees. Seven years later, a Climate Summit was held again in November 2021; and yet, the prognosis of some experts remains worrying and pessimistic: they estimate that by 2100 the temperature of the planet will increase by 2.5 degrees, which would have catastrophic consequences.

To stop climate change, committing to the reduction and conversion of CO₂ emissions into renewable energies is necessary. However, by themselves, these measures will not allow us to achieve that goal, since we also need the help of science, technology and engineering to develop and implement measures that allow us to actively capture

and reduce emissions that are the result of human activities (anthropogenic CO₂). It is precisely this topic that we are addressing at this Conference; to do it, we have four international experts who will talk about the different techniques for capturing, using and storing CO₂. Specifically, among other aspects, the speakers will detail methods to capture CO₂ with geological structures, the role that the oceans can play in this challenge and the design of new materials that allow CO₂ to be captured, and explain how new fuels can allow us to replace fossil fuels.

To give you an idea, these strategies (which in English are called 'carbon capture, use and storage') are already beginning to be implemented in some industries: for example, in factories that produce a large amount of CO₂ (as happens in the production of steel or cement). There are some industries in the world that already have devices that allow capturing part of the CO₂ they emit. However, these current methods capture around 40 million metric tons of CO₂, and the ambitions we have regarding the control of climate change would require us to increase that proportion of CO₂ capture to more than 100 million times.

I hope you understand the relevance of this topic and the contribution of the invited experts who will show us the scientific methods that will allow us to achieve this aim of global interest. In the final debate we will also address these aspects.

lectures

- TOWARDS SUSTAINABLE ENERGY AND MATERIALS:
NEW CIRCULAR CARBON ECONOMY VIA CARBON CAPTURE,
UTILIZATION AND STORAGE

Dr. Ah-Hyung (Alissa) Park

Department of Earth and Environmental Engineering, Department of Chemical Engineering, Lenfest Center for Sustainable Energy, Columbia University, New York, USA

- TAILORABLE METAL-ORGANIC FRAMEWORKS FOR
GREENHOUSE GASES CAPTURE

Prof. Jorge A. Rodríguez Navarro

Department of Organic Chemistry, Granada University, Granada, Spain

- BIOMASS FOR TOMORROW'S FUELS AND CHEMICALS

Prof. Jean-Paul Lange

Shell Global Solutions International B.V., Amsterdam, The Netherlands & Sustainable Process Technology, University of Twente, Enschede, The Netherlands

- HOW TO MANIPULATE THE OCEAN TO ABSORB MORE CO₂?

Prof. Rosalind E. M. Rickaby

Department of Earth Sciences, University of Oxford, Oxfordshire, United Kingdom



Towards sustainable energy and materials: new circular carbon economy via carbon capture, utilization and storage

Dr. Ah-Hyung (Alissa) Park

Department of Earth and Environmental Engineering, Department of Chemical Engineering, Lenfest Center for Sustainable Energy, Columbia University, New York, USA

In this lecture I would like to explain **what carbon capture and storage means**, emphasizing its relevance and the need to adopt measures that last over time, even into the next century. Without a doubt, this is the most important global problem today, and I am not referring exclusively to carbon management, but to **climate change and its associated problems**.

In the 2015 United Nations 'Climate Change' Conference, it was agreed that this was a major problem and that it was essential to work together to solve it. This led to the introduction of a number of measures; however, we still have to deal with very diverse challenges. The 2015 meeting was the first in which countries worldwide partnered to raise the need, not only to implement existing technologies, but also to move towards a sustainable future and develop effective engineering options and new multidisciplinary scientific developments.

This Conference established the need to accelerate the **clean energy revolution** and identified a number of areas (eight in particular) that required special emphasis and efforts. Some of the areas are, for example, sustainable biofuels, hydrogen or carbon capture, utilization and storage. These areas are not independent of each other, but are closely interconnected, so a holistic approach is needed instead of focusing on a single solution.

Throughout history, so much CO₂ has been emitted, and continues to be emitted, that we have to start **actively managing carbon** at the same time as we work on other technologies.

Energy Earthshots

The U.S. has changed direction, and only last year, in 2021, the Secretary of Energy stressed that we are very committed to the fight against climate change, but without resources



Dr. Ah-Hyung (Alissa) Park

and support we won't be able to achieve our goals. This led to the creation of the 'Energy Earthshots' initiative to accelerate progress towards a zero-cost energy economy.

The first step in this initiative is to change the economy by 2050. In this sense, as a first step we want to reduce the cost of clean hydrogen by 80% to reach a price of 1 dollar/kg of hydrogen in a decade; which is certainly a really ambitious goal.

The second objective relates to carbon-negative earthshot. Responsibility for carbon dioxide (CO₂) removal must be dramatically scaled up and the costs of the essential technology to generate clean energy must be reduced. The price is intended to be reduced by less than US\$100 per ton of net CO₂ by 2050, including in this goal the capture, use and storage of carbon. Undoubtedly, this is another very ambitious goal since the aim is to achieve net zero CO₂ emissions by 2050.

There is no doubt that the U.S. is more committed in terms of interest, labour and capital invested in this process, and is hoping for more international collaboration over time to achieve this goal.

Carbon capture, utilization and storage technologies

Carbon capture is a beneficial process that can be performed at various levels of concentration and by different methods. Many of the materials used in these processes are designed to be recyclable, since using components that can be reused thousands of times is important when developing these new technologies.

The capture of carbon material will also require energy that allows CO₂ to be released again when necessary. Based on this need, different options have been evaluated so as not to use too much energy during capture. Various reactions that take place at high speed (the higher the speed, the higher the energy consumption) have been studied. Amine solutions have also been studied for they are liquid solvents that can move between reactors.

Through large-scale practical demonstrations, such as the Petra Nova project, supported by the U.S. National Energy Technology Laboratory (NETL), it has been proven that these amine solutions can be successfully applied. In the Petra project (started in late 2016 in Houston, Texas), more than 1 million tons of CO₂ were captured. There were difficult challenges to overcome, mainly because of the enormous amount of carbon that had to be captured and because the materials used degraded over time. But every day we continue to learn about this process and work on new projects.

One question we ask ourselves is *what to do with the immense amount of CO₂ once it is captured*, since we have to manage it in some way, perhaps by storing carbon in geological formations or even in the oceans. On this point, underground storage bags have already been found where carbon can be placed and stored after its capture.

As reflected in a 2005 report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,¹ which provided an overview of geological storage options, the storage of CO₂ in geological formations deep at sea or on land uses many of the technologies developed by the oil and gas industry, and has proven to be economically viable under specific conditions for oil, gas and salt formations, although not yet for storage in unexploitable carbon layers.

To inject this carbon efficiently into these underground pockets, the pressure has to be usually increased up to 250 atmospheres on the carbon. There are several ways to place carbon in these underground pockets. Initially, carbon is trapped under the rock, but then it begins to penetrate the pores of the earth itself and, finally, carbon capture and storage reservoirs are formed.

One of the routes that can be used to access the interior of the earth's surface is by **turning carbon into carbon dioxide**, with the development of reactions between the materials used. Problems, such as carbon leakage, may arise during this process, so that solidifying the carbon would be a solution in this case, although today we do not know how long the formation of these structures takes.

One of the most interesting research initiatives in this area has been one recently conducted in Iceland.² It is a project in which 220 tons of carbon dioxide was injected into rock and salt reservoirs hundreds of meters underground, confirming that the carbon began to solidify early, forming solid carbon crystals.

This proves that you can directly capture carbon from the air or elsewhere and inject it into these rock and salt formations to solidify it.

In short, this study has confirmed for the first time the permanent removal of CO₂, documenting that more than 95% of the CO₂ injected at the CarbFix site in Iceland was transformed into carbonate minerals in less than 2 years.

Safe long-term storage of anthropogenic CO₂ emissions, through mineralisation, can be much faster than previously believed.

Undoubtedly, CO₂ recycling needs large markets to have a significant impact on the climate. According to recent estimations,³ the potential for carbon storage in these formations would be 36 billion tons or even more by 2030.

Circular carbon economy

Another question that arises is *whether decarbonising solid materials is possible*, and, for now, it seems that the answer is no. We should also consider whether we can rebuild entire industrial ecosystems by producing chemicals and materials that do not include fossil carbons.

We know that our society needs chemicals – both materials and fuels. On the other hand, we also want and need to sus-

tain and maintain our lifestyle, which inevitably generates waste that goes into the air, water or many other diverse places.

The idea would be to develop a **new circular carbon economy**, where everything was renewable energy and hydrogen, which is the element that has a much lower carbon and environmental footprint. All of them renewable materials.

For this to become a reality, it is necessary that we generate technological possibilities that can be effectively commercialised (Figure 1).

We can build the world with water, CO₂ and zero-carbon energy.

This will not be possible without good economic and management policies. A large part of these chemical materials and fuels will be transported from one country to another and will be present all over the planet. Therefore, the challenge is very ambitious. In addition, it is essential to determine where the carbon is going to be extracted from and how to trap it, since, for now, it is not possible to completely function without it.

CO₂ must come from non-fossil sources to be circular. We can resort to the ocean, to the air, although terrestrial or marine biomasses can also be considered as possible options.

Each of the proposed routes has both challenges and opportunities.⁴ One of the options being evaluated is the direct capture of CO₂ from the air; this is an especially interesting alternative because it would be about mimicking a process similar to that carried out by plants, but artificially. The Petra Nova project, for example, offers huge facilities that can be used for this purpose.

Increasing progress is being made in modular and scalable installations, which allow reducing the volume of equipment necessary to effectively perform a direct capture of carbon from the air. This direct capture in small quantities is very different from the one made to capture this element in other locations; and, in this case, there are significant obstacles and difficulties, including but not limited to:

- a) The need to have a low pressure drop. CO₂ in the air is found at a concentration of 400 ppm (parts per million), which is very low compared to its concentration in other locations; this makes its capture very complex due to amount and pressure issues: the air must be subjected to pressure in order to capture carbon.
- b) The need to be stable under air with a high concentration of O₂, which causes oxidation and degradation.
- c) Fluctuating humidity levels and changes in environmental conditions, as well as other pollutants and impurities (included in air particles), can also interfere with the process.

In the direct capture of CO₂ from the air, several processes and resources have been proposed, such as new CO₂ capture solvents poor in water or without water.

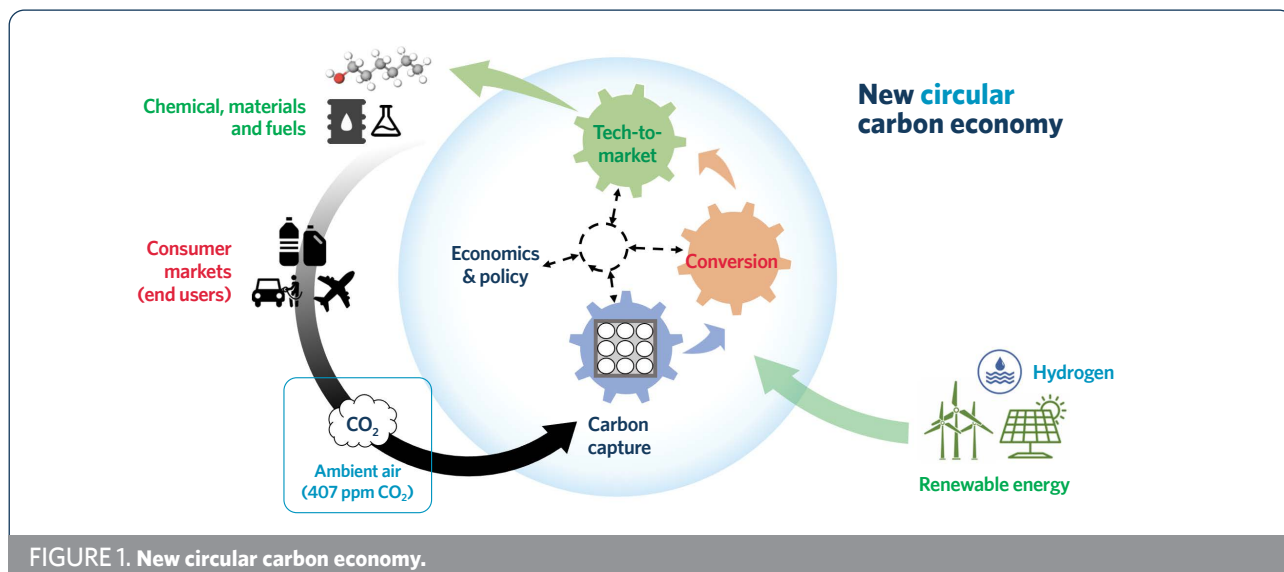


FIGURE 1. New circular carbon economy.

Some of the materials we are now working with are called ‘**Nanoparticle Organic Hybrid Materials**’ (NOHM). These are particles – unlike other materials that, if left out, evaporate, disappear or degrade – that can be left outdoors for days, weeks or months and will continue to capture CO₂.

NOHM are useful for capturing CO₂, but they need to be designed and synthesized to enable this action to be performed more effectively. These materials really have very unique properties, and the challenge is to go one step further and progress in the process of CO₂ capture. It may be possible using amine-based materials, but the main obstacle we must overcome is that we are working in air and it is difficult to move materials from one place to another.

Researchers have begun to propose new scenarios and possibilities in order to devise a more effective way to move these materials to capture CO₂ at different levels, without transport problems, in order to improve the transport process itself to deal with viscosity issues.^{5,6}

There are several ways to do this, and one of the most promising is encapsulation using encapsulated solvents with various layer thicknesses. In our centre we have developed a high viscosity solution in which microcapsules containing NOHM can be created, with the external layer made of fibre (like that used in other industrial equipment). Once NOHM is encapsulated, the level of CO₂ absorption increases compared to pure NOHM, which allows more CO₂ to be captured with a smaller surface area. In addition, new encapsulation methods are under development mainly to avoid pressure drop. Hence the possibility of using CO₂ capture materials encapsulated in fibre. Our latest results have been improved fibres that have allowed us to capture carbon dioxide from the air more quickly and efficiently.

Combined CO₂ capture and conversion

Once CO₂ is captured, we consider what to do with it in order to store it effectively. In addition, the industry is studying ways not only to capture and distribute CO₂, but also to determine *what can be done with this captured CO₂*, such as creating, developing and manufacturing many things.

Among the ongoing research lines, some are studying if reaching a high level of CO₂ purity to manufacture different products may not be that necessary. This aspect is certainly relevant, since the CO₂ capture process has a very high cost and any progress in this regard would help optimise the economic outcome of the operations and processes that are carried out.

We need carbon-free energy, but rapid progress is also being made in the **development of renewable energies**. We must continue working on and improving these ideas to reach the circular economy.

When developing new materials, it is necessary not only to consider whether renewable energy is used for its generation, but also to study the sustainability of the rest of the compounds involved in its manufacture. For the whole process to be sustainable or even carbon neutral, we must make sure that the co-reactor or reagent (hydrogen, normally) is also sustainable. We need to ensure that the energy required comes from carbon-free energy sources.

As a practical example, it is worth mentioning what cement or steel industries are currently doing to capture carbon. These industries capture CO₂ and then transport it by thermal conversion systems to develop the materials and chemicals we need.

CO₂ conversion routes are not simple, but the topic is quite interesting because of the diversity of materials that can be converted or transformed (volatile ash from industries, steel debris and slag, waste from various industries, etc.). These wastes can be solid or gaseous, and by applying acid-base reactions new materials can be created that are sold on the market with these greenhouse gases or waste, which are turned into good alternative resources to develop paper or plastic products, for example, and even recover some critical elements from all these materials.

This technology, which we have been working on for more than a decade, will be available in the Chinese market this year (Figure 2).

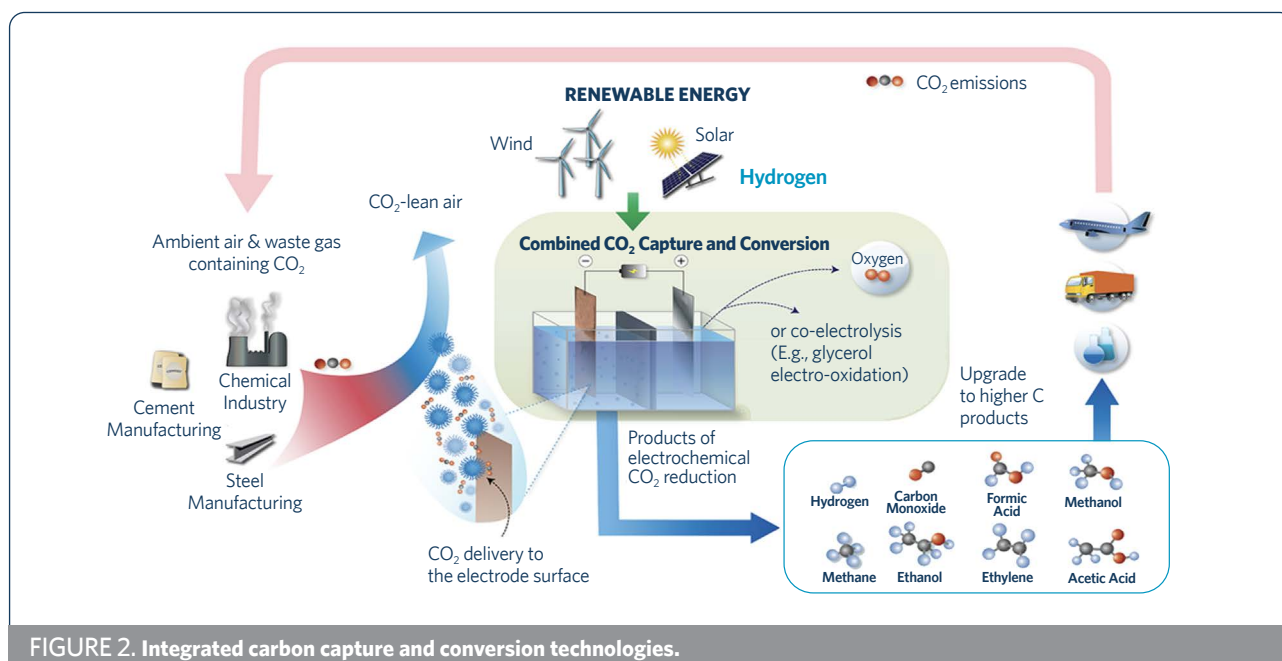


FIGURE 2. Integrated carbon capture and conversion technologies.

CONCLUSIONS

- » To achieve a new circular carbon economy we need to consider all CO₂ sources and the multiple solutions we have at our disposal to solve the problem they cause.
- » CO₂ use and conversion will play a very important (and different) role as renewable energies become more affordable.
- » To ensure the overall sustainability of the process we have to focus on the engineering and reagent separation systems, as well as their intensification phases.
- » We must also develop new routes for existing or new chemical products, always taking into account environmental protection.

References:

1. Metz B, Davidson O, Coninck H, et al. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage (Cambridge Univ. Press, New York, 2005). Cambridge University Press, UK; 2005:431.
2. Matter JM, Stute M, Snæbjörnsdóttir SÓ, et al. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science*. 2016;352(6291):1312-4.
3. Biniek K, Henderson K, Rogers M, et al. McKinsey Quarterly. Driving CO₂ emissions to zero (and beyond) with carbon capture, use, and storage. June 2020. Available at: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/driving-co2-emissions-to-zero-and-beyond-with-carbon-capture-use-and-storage>.
4. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press. Available at: <https://doi.org/10.17226/25259>.
5. Petit C, Park Y, Andrew Lin KY, et al. Spectroscopic investigation of the canopy configurations in nanoparticle organic hybrid materials of various grafting densities during CO₂ capture. *J Phys Chem C*. 2012;116(1):516-25.
6. Petit C, Park Y, Andrew Lin KY, et al. Investigation of CO₂ capture mechanisms of liquid-like nanoparticle organic hybrid materials via structural characterization. *Phys Chem Chem Phys*. 2011;13:18115-22.



Tailorable metal-organic frameworks for greenhouse gases capture

Prof. Jorge A. Rodríguez Navarro

Department of Organic Chemistry, Granada University, Granada, Spain

The aim of this lecture is to highlight the potential usefulness of metal-organic frameworks (MOFs) in the capture of greenhouse gases. To do this, it is essential to contextualise the situation and point out some key aspects of the problem posed by climate change and the strategies that are being developed for the capture of CO₂ based on its physical and chemical properties. In addition, I would like to highlight the advantages of solid adsorbents on current CO₂ capture technology with amine scrubbing solutions. To better understand all these aspects, it is also essential to know the stages of the design, synthesis and post-synthetic modification of MOFs in the capture of greenhouse gases. And, finally, I consider it of major importance to highlight the benefit that can be obtained by combining experimental validation and artificial intelligence (Big Data) in the accelerated search for new and better materials for CO₂ capture.



Prof. Jorge A. Rodríguez Navarro

Climate change

There is experimental evidence of a gradual temperature increase in the Earth's surface. Without doubt we are currently facing a series of anomalies in the planet's temperature that have progressively accelerated over the past four decades. This is attributed to the so-called '**greenhouse effect**', which is mainly responsible for climate change and which, among other consequences, leads to a rise in sea level, increased desertification or the development of hurricanes. This is because the Earth is subjected to strong solar radiation that, when it reaches the Earth's surface, becomes a longer wavelength radiation that, in turn, is absorbed by gases present in the atmosphere (greenhouse gases).

A beneficial aspect of the greenhouse effect is that it maintains a stable temperature on Earth, which makes it habitable; however, subtle changes in the energy balance between the Sun and the Earth can have tragic consequences on the climate, such as global warming or the possible future irruption of a new ice age.

The most important component of the greenhouse effect is water vapour. Some molecules in the atmosphere are able to powerfully absorb infrared radiation from the Sun;

thus, vibrations are induced in these molecules, leading to infrared absorption from the atmosphere. However, it is believed that the greenhouse effect is mainly caused by the increase in the concentration of gases such as CO₂, methane (CH₄) or nitrogen oxide (NO_x); i.e. anomalies in the energy balance are caused by the change in the concentration of non-condensable gases that also absorb infrared radiation.

The origin of the emission of greenhouse gases derives, above all, from the exacerbated use of fossil fuels with the aim of maintaining the energy our society demands. This excessive consumption has led to a significant increase in CO₂ concentrations and, consequently, in the greenhouse effect.¹

Strategies for CO₂ capture

Since it is already assumed that much of the problem posed in relation to the greenhouse effect is due to the excessive emission of CO₂, it is crucial to optimise strategies to capture it.

How can we address this problem? A solution is undoubtedly the adoption of strategies for CO₂ capture based on its physico-chemical characteristics.

Carbon dioxide is an **acidic molecule** and, therefore, if we treat it with a base we could capture it, just as molluscs do to create calcium carbonate shells. Another useful property of this molecule is its **electrophilic nature**, so if we expose it to an amine, it can lead to the formation of chemical compounds (carbonates) that are able to fix CO₂. It is also an **oxide**, so we can use a reducing material that allows its fixation. Another peculiar feature of CO₂ is its **small size**: the CO₂ molecule measures about 0.33 nanometres, so it is possible to confine it molecularly in a small space (formed by a porous material). These properties can be combined in the search for solutions (Table 1).

Table 1. Physico-chemical properties of CO₂ that optimise its capture.

Properties	What can we do?	Example
Acidity	A base	$\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$ 
Electrophilicity	A nucleophile	$\text{CO}_2 + \text{NRH}_2 \rightarrow \text{HRN-COOH}$ 
Oxide	A reducer	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_n$ 
Size (0.33 nm)	Molecular containment	Physisorption/chemisorption in the pore 

Solid adsorbents for CO₂ capture with amine solutions

Based on the electrophilic nature of the CO₂ molecule, some of the current technologies advocate the capture of CO₂ by washing it with aqueous amine solutions. Specifically, the nucleophilic attack of the amino group on CO₂ molecules is chosen to obtain carbonates. With this approach, the capture process is good, but it entails a very relevant penalty when it comes to regenerating the absorbent and releasing the CO₂, since the energy and economic cost is huge, added to the high toxicity and degradation of the amines. This procedure is not suitable for the direct capture of CO₂ from the air.^{2,3}

Instead of capturing CO₂ in a solvent, we can capture it **on a surface** (in a solid adsorbent). This would mean to move from liquid absorbents (where a gas-liquid interaction occurs, with the problem of the diffusion of the gas in

the liquid) to solid adsorbents (facilitating a gas-surface interaction).

How can this process be made? Among other options, the capture capacity can be improved by greatly increasing the surface. Let me give you a practical example to understand this idea. Let's think about what happens with a clothesline (the clothesline effect), which occupies a small space and yet it has a lot of surface and, thanks to this, allows a quick air exchange.

In CO₂ capture, a porous solid would be used, so we would have a lot of surface in a very condensed or tight way, where it would be feasible to maximise that capture (Figure 1).

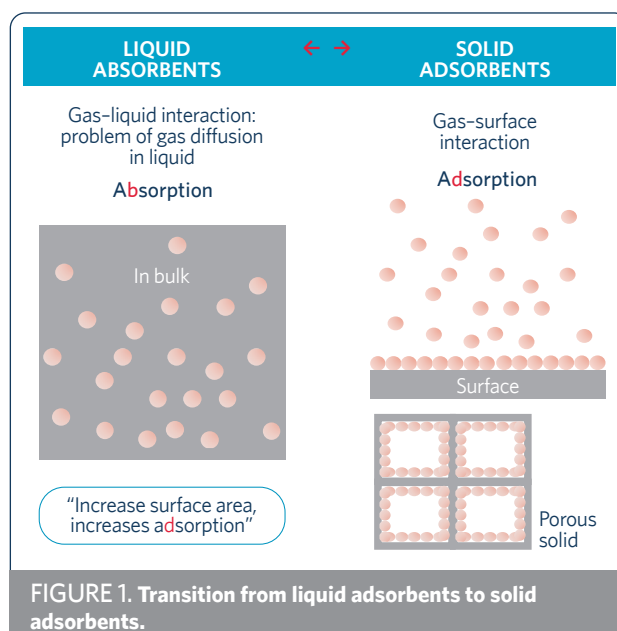
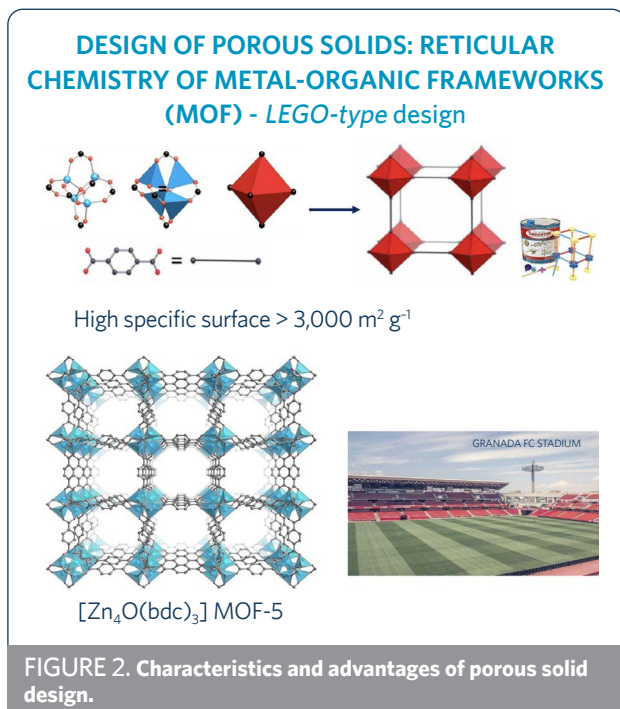


FIGURE 1. Transition from liquid adsorbents to solid adsorbents.

This can be achieved with various materials, and among them a synthetic material known as **porous MOF**, which is based on inorganic fragments, is of special interest. It has clusters (usually metallic) and an organic spacer that, when associated with each other, form a structure that creates channels or cavities where molecular recognition processes can occur. An advantage of this type of porous solid is that its design is relatively simple: based on the reticular chemistry of MOFs, it is essentially a matter of choosing and assembling suitable pieces (as a Lego-type construction).

The particularity of these materials is that they can have extremely large surfaces (high specific surface >3,000 m² g⁻¹); for example, one gram of one of these materials may have the surface of a football stadium. Since they

are modular materials (in which inorganic and organic fragments are combined), accurate control of the size of these cavities is possible if a wide variety of organic spacers is selected (Figure 2).



My research team has delved into these aspects, evaluating the control of the size of the spacers and how this allows us to manage the size of the cavities to optimise the capture of CO_2 .⁴

A crucial aspect is to determine the optimal pore size for CO_2 capture. Our working group has made a selection to adjust the size of the pore to the dimensions of the CO_2 molecule. A pore size suitable for the capture of this molecule is considered to be around three times the molecular dimension. Thus, taking into account the dimensions of the CO_2 molecule, a pore of one nanometre would be appropriate to allow optimal diffusion and appropriate interactions (neither excessively high nor low) that can be reversible.

We must not forget that both the capture and the subsequent release of CO_2 molecules are important.

Porous MOFs are crystalline systems, which means that they are made up of cavities and channels that repeat monotonically along the three spatial dimensions (all cavities are identical). This allows selective interactions that are capable of discriminating the size of the molecule, gran-

ting it a property called molecular sieve. In an ideal crystal, everything is repeated homogeneously, which is useful for some applications. However, our crystals (and other solids) are not usually perfect, but have imperfections (dislocations, isolated defects or large-scale defects).

The electronic properties, reactivity, and catalytic and adsorbent properties of solid-state materials depend on the presence of defects. These defects are favoured by thermodynamics, which results in more stable materials.

It is important to highlight that many of the properties associated with these porous solids are related to the presence of defects, so that the improvement of the properties of MOFs in the capture of CO_2 can be raised from the defect engineering.⁵

Design, synthesis and modification of MOFs

Our research team has worked intensively on the generation of defects to improve the properties of these materials and to develop new CO_2 capture options. Specifically, the post-synthetic treatment of one of these systems with an excess of alcohol potash (alcoholic potash) has shown to produce vacancy of organic spacers, the incorporation of cations in the network, as well as an increase in the basicity of the metal fragments. This creation of defects in the $[\text{Ni}_8(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_2(\text{BDP-X})_6]$ frameworks provide 'highways' that facilitate the transport of CO_2 molecules (hierarchical pore structure) and improve interactions (basic centres, polarisation of charges).

All this favours a significant increase in the CO_2 adsorption capacity of these materials. This capacity has been determined by measuring rupture curves, which consist of passing a gas flow (with a composition analogous to the emissions of a power plant) through a filter filled with adsorbent, to determine the selectivity and the time necessary for the porous material to be saturated with a certain component (N_2 and CO_2).⁶ Among other factors, this improvement in the adsorption capacity is due to the creation of basic centres that are nucleophilic in nature and capable of attacking the CO_2 molecule, inducing the formation of carbonate. In addition, it is a fully reversible process.

Another advantage of these materials is that their properties can be modified by ionic changes. For example, it is possible to make an ionic change with barium (Ba_{2+}) to try to make more effective interactions with other types

of molecules (such as sulphur dioxide [SO₂]). In this case, we have seen that it is feasible to adsorb and regenerate the adsorbent multiple times without a loss in absorption capacity, as they are completely reversible interactions.

Big Data contribution

In our quest to find new materials to capture CO₂, we have recently collaborated in an innovative initiative that uses Big Data, trying to resemble the drug selection process with structural data.

In the case of drugs, the structure of the active core of the protein causing the disease is known, while the structure of the ligand (drug) is unknown. In this case, it is a question of looking for an active molecule that fits the interaction model and blocks the activity that causes that disease. This search is done in a wide library (Big Data) that can include both known and unknown compounds.

Protein-drug interaction is based on the key-lock model, which assumes that the structure of the substrate and that of the active core of the protein are complementary. Thus, a computational screening is carried out and the type of molecules that best fit that active core are detected. Once the molecule that best fits is selected, an attempt is made to transfer the evidence to a clinical trial that confirms or rejects its operation as well as determining if toxicity issues arise.

Based on this experience, the usefulness of Big Data has been tested for selection of the best MOF for CO₂ capture. However, in the search for a better material for that capture, we start from an inverse situation to that occurring in drug selection.

In this case, we know the ligand (the host molecule, which is CO₂), but we do not know the host porous framework, the structure of the host molecule. Therefore, the objective is to look for the active centre called: 'adsorbaphore'.⁷

This attempt to search for the optimal MOF has started from the creation of a virtual library followed by an experimental validation of the system.

A library of more than 300,000 MOFs has been built and its properties have been explored using Data Mining to identify a material that had a high capacity and selectivity for the adsorption of CO₂ compared with nitrogen and water (components in air or gas). The optimal and ideal structural motif (adsorbaphore) has been found. It consists of two aromatic rings separated by 7 angstrom, where the CO₂ molecules can be accommodated in a sandwich-like manner.

Finally, the last stage of the study consisted of synthesizing one of these materials in a targeted way, as well as experimentally validating the CO₂ capture properties. The performance of these MOFs in an industrial environment must now be tested and the entire capture process must be considered.⁷

CONCLUSIONS

- » The modular characteristics of MOFs allow their optimisation and make them suitable for the capture of CO₂, as well as other gases of environmental interest.
- » In addition to MOF synthesis itself, it would be interesting to study the synergies of defect creation, ionic change and introduction of basic centres.
- » Finally, Big Data offers new possibilities to accelerate the discovery of new materials with 'à la carte' properties.

References:

1. Petit J, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*. 1999;399(6735):429-36.
2. Rochelle GT. Amine scrubbing for CO₂ capture. *Science*. 2009;325:1652-4.
3. Mondino G, Grande CA, Blom R, et al. Moving bed temperature swing adsorption for CO₂ capture from a natural gas combined cycle power plant. *Int J Greenhouse Gas Control*. 2019;85:58-70.
4. Padial NM, Quartapelle Procopio E, Montoro C, et al. Highly hydrophobic isorecticular porous metal-organic frameworks for the capture of harmful volatile organic compounds. *Angew Chem Int Ed Engl*. 2013;52:8290.
5. Fang Z, Bueken B, De Vos DE, et al. Defect-engineered metal-organic frameworks. *Angew Chem Int*. 2015;54(25):7234-54.
6. López-Maya, Montoro C, Colombo V, et al. Improved CO₂ capture from flue gas by basic sites, charge gradients, and missing linker defects on nickel face cubic centered MOFs. *Adv Funct Mater*. 2014;24:6130.
7. Boyd PG, Chidambaram A, García-Díez E, et al. Data-driven design of metal-organic frameworks for wet flue gas CO₂ capture. *Nature*. 2019;576:253-6.

Biomass for tomorrow's fuels and chemicals

Prof. Jean-Paul Lange

Shell Global Solutions International B.V., Amsterdam, The Netherlands & Sustainable Process Technology, University of Twente, Enschede, The Netherlands

Is it possible to 'defossilise' the Earth and eliminate the fossil hydrocarbon we are using by replacing it with renewable energy sources while ensuring that the materials we use are carbon-neutral?

Nowadays, we use hydrocarbons for **the transportation and construction industries and for electricity production** by means of fossil fuels. Fossil hydrocarbon is also used to make **chemicals**. Based on this reality, to completely replace hydrocarbons with electricity in the near future now seems impossible.

The electricity sector could use renewable energy relatively easily in some industries (e.g. construction), but it would be much more complex and a much greater challenge in other sectors (e.g. industry and transport).

Problems and alternatives

In recent years, various scenarios have been developed to investigate how to stop the planet's temperature from rising 1.5 °C, which would be the point of no return. In this context, it is estimated that by the end of this century practically half of these sectors will be supported by renewable energies; but even so, almost the entire other half will continue to depend on fossil fuels (heavy transports such as aviation, or cement, steel or chemical industries [Figure 1]).¹

We are working so that by the end of the 21st century, renewable energy can be offered to consumers, although it is true that there will still be at least one-tenth of the sectors that will not be able to fully meet their needs with this type of energy. In the chemical sector, to cover the large amount of plastic currently demanded with renewable energies is particularly complex.

We should **recycle our chemicals much more and in a better way** to reduce the influence of hydrocarbon in this economic sector.

The role of biomass

As mentioned, a lot of carbon will be needed, but it has to be renewable and neutral so the atmospheric energy balance is



Prof. Jean-Paul Lange

maintained. This is why we consider that biomass could be a good resource for the balance of CO₂ in the atmosphere.

Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources defines **biomass** as 'the biodegradable fraction of products, waste and residues from biological origin from agriculture, including vegetal and animal substances, from forestry and related industries, including fisheries and aquaculture, as well as the biodegradable fraction of waste, including industrial and municipal waste of biological origin'.

Biomass is organic matter used as an energy source which includes a wide and heterogeneous range (both in terms of origin and nature) of organic matter.

In the **energy context**, biomass can be considered as organic matter originated in a biological process, spontaneous or induced, usable as an energy source. However, the use of biomass also faces typical and classic problems related to sustainability and abundance. The use of biomass to provide energy services is a strategically important

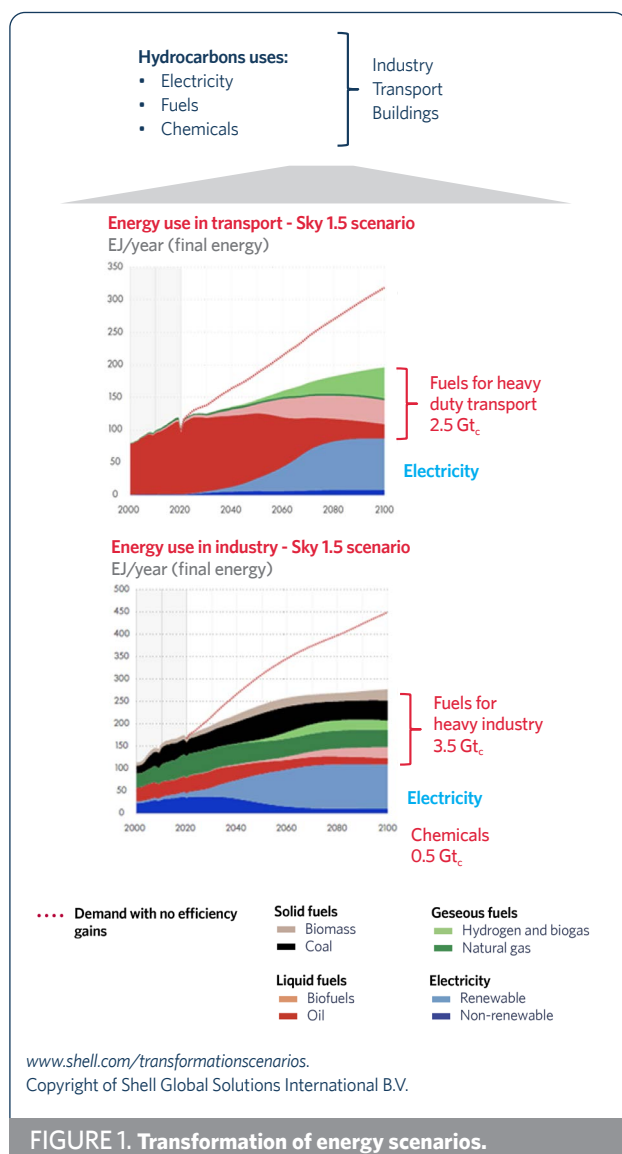


FIGURE 1. Transformation of energy scenarios.

option to increase the global adoption of renewable energy. However, the practical aspects of accelerating its use are not without controversy, such as potential resource conflicts, particularly with regard to land, water and biodiversity conservation.²

As for **biomass sustainability**, the main problem today lies in solving how and where to grow it. Currently, not only do we have biomass that covers basic needs (e.g. food), but also we have another part that is available for secondary products resulting from industry. Residues from agriculture and silviculture can be used for its harvesting. It would also be necessary to stop considering as waste any waste that has enough protein for food (allowing it to be supplemented), since it may be scarce and difficult to obtain in

the future. These surpluses (called *biomass by-products*) could also be used to generate energy or fuels.

Biomass can potentially be grown and harvested. It is a sustainable resource because it requires a low input for its production since it needs little irrigation water, few fertilisers, pesticides, etc. Even though its sustainability lies in the type of biomass used, how and where to grow it is equally important.

In reality, we cannot generalise what to do with biomass, but the most important thing is to identify and assess its characteristics locally: where it comes from, how it is going to be grown and what it is going to be used for biomass.

Despite all this, another question regarding its abundance arises: *Do we have enough biomass?* To answer this question, a thorough assessment of the essential preconditions for increasing biomass production levels is required. Today we are growing around 1.5 tonnes of hydrocarbon in biomass, which is one-third of what we use, and which could also be part of what we would need to cover electricity needs by the end of the century. But the limit is not there.²

Can we improve this data? Yes, since agriculture, forestry, land fertility and diet change can be improved, all this could help us to significantly increase the biomass available.

All these options could allow us to increase the amount of biomass available to more than 10 gigatons, as long as we establish a new use for waste and are very firm with the measures we have to take. Therefore, it could be said that biomass could play a significant role in our economy by providing the amount of carbon we need.²

Another possibility that arises is whether, instead of reusing biomass, it could be obtained **directly from the atmosphere**. However, there are already fuels produced from biomass whose cost is very low, so it would be difficult to compete with them due to the high cost of obtaining biomass from the atmosphere. Obtaining biomass from atmospheric CO₂ capture has significant costs; in addition, the cost of hydrogen must be taken into account. In an optimistic scenario, the cost of hydrogen could be as much as \$2 or \$3 per kilogram (recommended price: \$1/kg). Currently, the cost of capturing CO₂ from the atmosphere and hydrogen is much higher than the biomass we already have.

Therefore, obtaining these components from the atmosphere could only be competitive when costs are substantially reduced to flatten the global cost curve.

Over time, atmospheric CO₂ will play a key role, but biomass valuation is a much easier and cheaper short-term option (Figure 2).

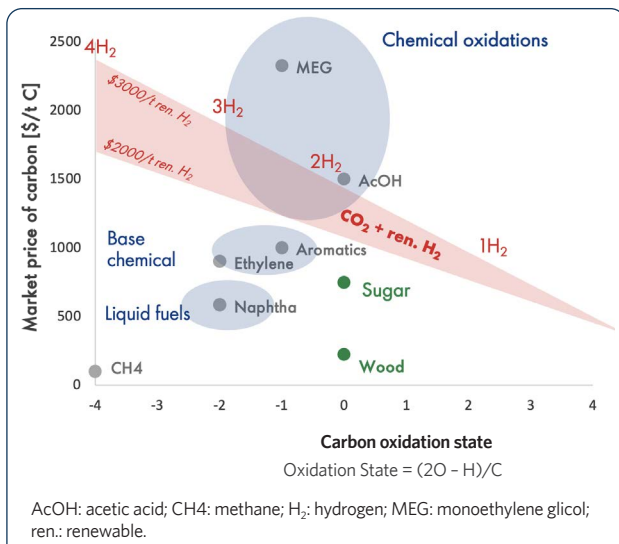


FIGURE 2. The biomass valuation as an option cheaper for the capture and use of atmospheric CO₂ in the future.

So, it seems clear that we are going to need renewable carbon for heavy fuels and chemicals, and that biomass is a raw material that holds the triple 'AAA': *Available, Affordable, Acceptable*, since it is available, it is economically affordable and it is acceptable or sustainable.

Technologies for digestible biomass

We have numerous technologies that allow us to use biomass and turn it into different products.

In the case of **digestible biomass** (i.e. which comes in the form of vegetable oils or sugar and starch) we have technologies that facilitate its transformation into a wide variety of products.

Vegetable oils can be turned into biodiesel or hydrotreated oil, while starch/sugar can be transformed into ethanol or lactic acid. Sugar can also generate various products used for biofermentation, hydrogenation or conversion into acids, so they can potentially evolve into biochemicals or fuel intermediates.

A particular case is that of emerging technologies for recalcitrant lignocellulose.

Lignocellulose is the main component of biomass, and represents the most economical, abundant and renewable organic source in the world.

Within lignocellulosic biomass, residues from agricultural, forestry or industrial processes can be found, which are produced in large quantities and are generally unused or eliminated by open-air combustion, causing serious environmental problems.

In this case, we face many challenges since we need technologies that help to convert this biomass, which is complex, heterogeneous and contains components such as lignin. They are oxygen-rich components that also have a high molecular weight. So, with the right technology, they could be degraded to a much lower molecular weight and, by interfering with part of the oxygen, the required right structure could be achieved (Figure 3).

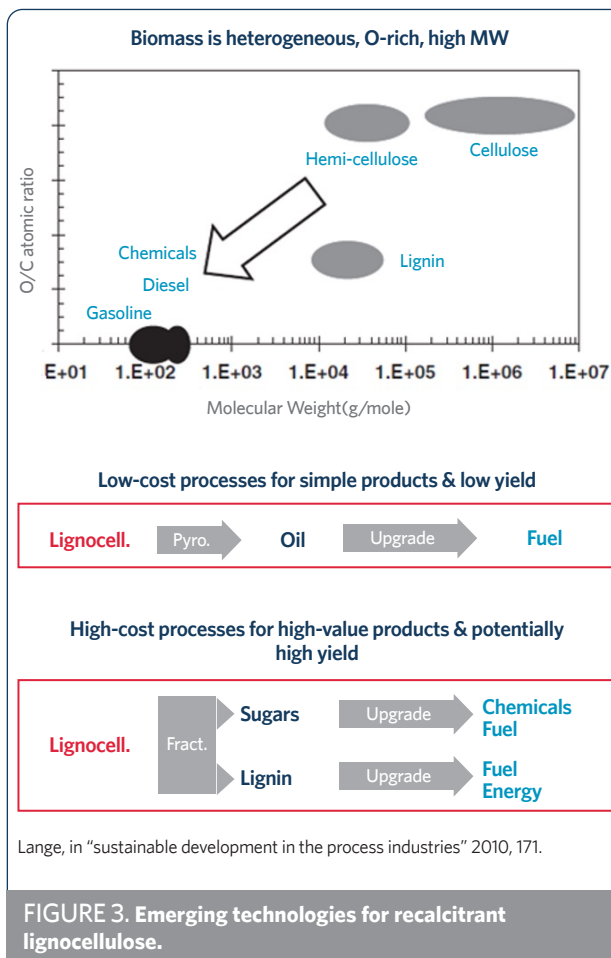


FIGURE 3. Emerging technologies for recalcitrant lignocellulose.

To carry out this process there are two different approaches:

1. You can choose to **use low-cost processes**: a very simple technology that converts biomass into oil. The process is easy, but the performance is very low and the product/fuel being produced has little value. In short, with this approach, low-cost processes are carried out for simple products with low performance.
2. The other alternative is to **adopt more expensive technologies**: they are much more complex, but reach a higher value. In these cases, oxygen is introduced into the biomass and the two components of the biomass (sugars and lignin) are separated by bifractionation and specifically improved according to their own biochemistry. They are high-cost processes, but they offer the possibility of obtaining high-value products with a potential high performance. In any case, its performance still needs to be improved to make this approach cost effective and practical.

From an industrial viewpoint, key performance indicators should be taken into account in order to optimise this process.

We have identified four indicators that must necessarily be assessed at an early stage of the research: **selectivity, reactor productivity, product concentration and distillation resistance**.

Selectivity indicates that we have a good efficiency of biomass because it is an expensive material and we want to use it as much as possible and in the best way. The other three factors focus on efficiency aspects, ensuring that is something simple, with a cost-effective reactor productivity, that reduces the need to use too many solvents and the recovery of these products is not too complex.

In the productivity and concentration of the product we are processing, the first step in the conversion process from lignocellulose to sugars is associated with low concentrations and with low reactivity. These first units are going to be expensive and big, but the beginning has to be like this. Once the process is stabilised and the molecular platforms are reached, we can distil or operate at high concentrations and with high productivity. This process needs to be followed step by step to ensure that we fulfil industrial needs so that it is cost-effective and its full potential is exploited.

CONCLUSIONS

- » I have tried to answer two basic questions: *Why will we need renewable carbon for high-performance fuels and chemicals? How can we achieve it?*
- » There are sufficient reasons to explain and justify **the need of biomass for fuels and chemicals**, and it is necessary to ensure that it meets its triple status: **available, profitable and acceptable or sustainable**.
- » I have also highlighted the current **availability of technologies to influence digestible biomass** and the importance of developing new ones to convert recalcitrant biomass (lignocellulose).

References:

1. The Energy Transformation Scenarios [Internet]. Available at: www.shell.com/transformationsscenarios
2. Slade R, Bauen A, Gross R. Global bioenergy resources. *Nature Clim Chang*. 2014;4:99-105.



How to manipulate the ocean to absorb more CO₂?

Prof. Rosalind E. M. Rickaby

Department of Earth Sciences, University of Oxford, Oxfordshire, United Kingdom

In recent years, significant progress has been made in the development of artificial techniques for absorbing CO₂ out of the atmosphere. I will explain how the natural world works in terms of absorbing CO₂ and, in particular, the basic aspects about the role that the ocean has and can play in CO₂ uptake.

An ocean of possibilities

The ocean is a good store of CO₂ and one of the largest reservoirs on the planet. In fact, the ocean already has an extraordinary volume of CO₂, and is estimated to contain 38,000 gigatons of carbon dioxide (GtCO₂) in its depths. The capacity of the ocean to absorb CO₂ is huge, and luckily, nowadays we have enough knowledge to easily manipulate CO₂ stored in this setting. However, many precautions must be taken, since any manipulation on our part can pose a risk by perhaps perturbing the very stability of the ocean as a store of CO₂.

It is important to recall the agreement reached at the Paris Climate Summit, where many countries firmly committed to try to prevent the Earth's temperature from rising 1.5°C in the future, with a series of effective measures and taking into account our current trajectory of global emissions. One of the main measures to be taken, without doubt, is to limit CO₂ emissions, and for this, we need to remove from 100 to 1,000 GtCO₂ before the next century, which is equivalent to a value of 1 to 10 GtCO₂ per year. This is a difficult goal to achieve.

Ocean CO₂ storage

To clearly determine where we are standing, the current balance of the oceans needs to be assessed and analysed. Data tell us where carbon is and where it has been stored since we started producing it from the time of the Industrial Revolution. Over the last 200 years, there has been a large accumulation of CO₂ emissions, and one-third has gone to the oceans, so they have already absorbed approximately 500 GtCO₂ from the atmosphere (out of 1,300 GtCO₂ of total anthropogenic emissions).



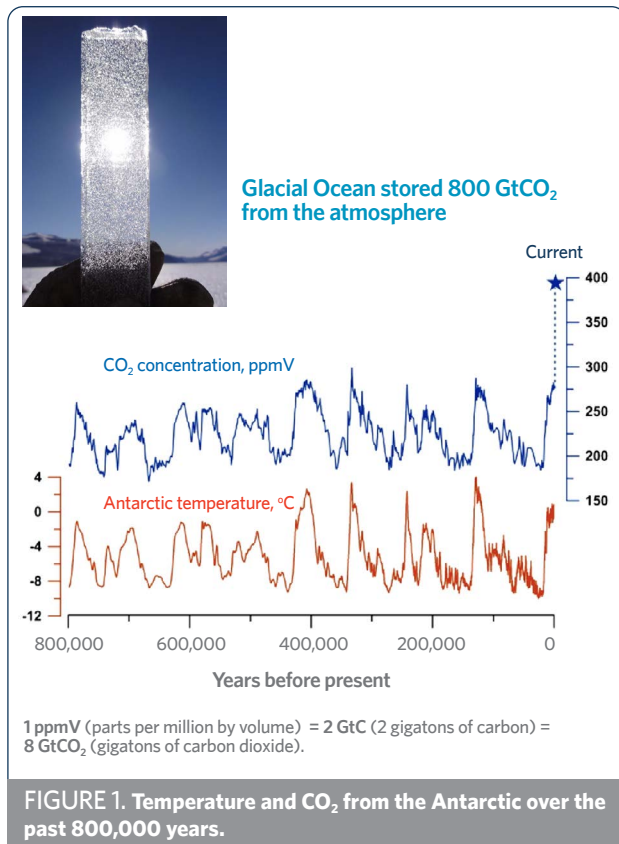
Prof. Rosalind E. M. Rickaby

Oceans currently absorb CO₂ at a rate of around 2 GtCO₂ per year. Since we started adding CO₂ to the atmosphere, the ocean has picked it up at a rate of about 9 GtCO₂/year.

The amount of CO₂ stored in the atmosphere accounts for one-third of the carbon emitted annually. Another third of this CO₂ is incorporated into the terrestrial biosphere, and the remaining third is building up in the atmosphere. This reveals that oceans have already cushioned the impact caused by CO₂ emissions.

Thanks to thermal sweeps made on ice remnant isotopes collected in Antarctica, we can study the history of the planet and go back up to 800,000 years. Thus, the small bubbles contained in the ice inform us exactly about what happened to CO₂ in the past. CO₂ came and went, with peaks during warm periods and valleys in cold periods (when the Earth's temperature dropped significantly). These variations in temperature have occurred continuously for thousands of years, so the ocean has been breathing in CO₂ in the warmer periods

and breathing it out when the temperature dropped. A rough estimate calculates that the glacial ocean has already stored at least 800 GtCO₂, by performing periodic gas exchanges (with an emission/absorption effect) (Figure 1).



In addition, the large areas of ice that spread over wide areas of the Earth, resulting in the ocean having to absorb a large amount of carbon from that shrinking land mass (about 2800 GtCO₂ from the reduced terrestrial biosphere), must also be taken into account. In total, this glacial ocean was able to store 3600 GtCO₂, which is equivalent to 0.07 Gt per year. The ocean has the capacity to absorb between 1 and 10 GtCO₂ a year, but its natural rate of sequestration is 100-fold slower than the speed we would actually need.

There are other ways to manipulate CO₂ and, in fact, the glacial ocean is serving as a test bed and confirmation of some hypotheses and alternatives.

The storage of CO₂ in the deep glacial ocean is based on a balance amongst biology, chemistry and physics.¹

There are models that show us how to get the oceans to contribute to reaching the necessary level of CO₂ uptake. For example, cooling and stratification of water would allow CO₂ to be stored at deeper levels. On the other hand, we know that the ocean has a limited level of ferric fertilisation; in addition, it has been confirmed that the productivity of the waters in terms of CO₂ uptake has to do with depth.¹

Ferric fertilisation is a component of the terrestrial carbon reduction process, as are coral reefs. If the sea level drops drastically, all those areas with coral reefs disappear. In this situation, reef material is added to the ocean and thereby changes its acidity, all of which ends up influencing its ability to absorb CO₂.

Solutions from biology, chemistry and physics

Biology, chemistry and physics are part of the complex equation that determines the ocean's ability and function to absorb CO₂. In addition, in this equation – in this delicate balance – we must also take into account other specific elements, such as the biological ‘pump’ of phytoplankton and zooplankton in the ocean, which are responsible for photosynthesis that only takes place on the ocean surface where sunlight can penetrate. That organic matter subsequently descends to the ocean floor and can accumulate for years (100 to 1000 years or more) in the so-called ‘mid-night zone’ (Figure 2).

On the basis of this reality, by manipulating the productivity of biological carbon, we could increase the amount of carbon that the ocean can absorb.

It is crucial to take into account the chemistry of the ocean, and to play with its acidity and alkalinity as ways of manipulating water.

Aqueous CO₂ is the one that exchanges with the atmosphere, so if the ocean pH and its alkalisation are increased, this CO₂ would be then converted into bicarbonate (HCO₃) and carbonate (CO₃), thus reducing the aqueous CO₂ that is returned to the atmosphere.

However, **physics** can also help to reach this goal. Oceans are like ‘CO₂ sponges’, and there are ocean areas where aqueous CO₂ returns to the atmosphere with greater intensity; these are located in areas of the Equator, the Pacific and the Southern seas. If we manipulate water physics or stratification, we can prevent CO₂ from returning to the atmosphere.

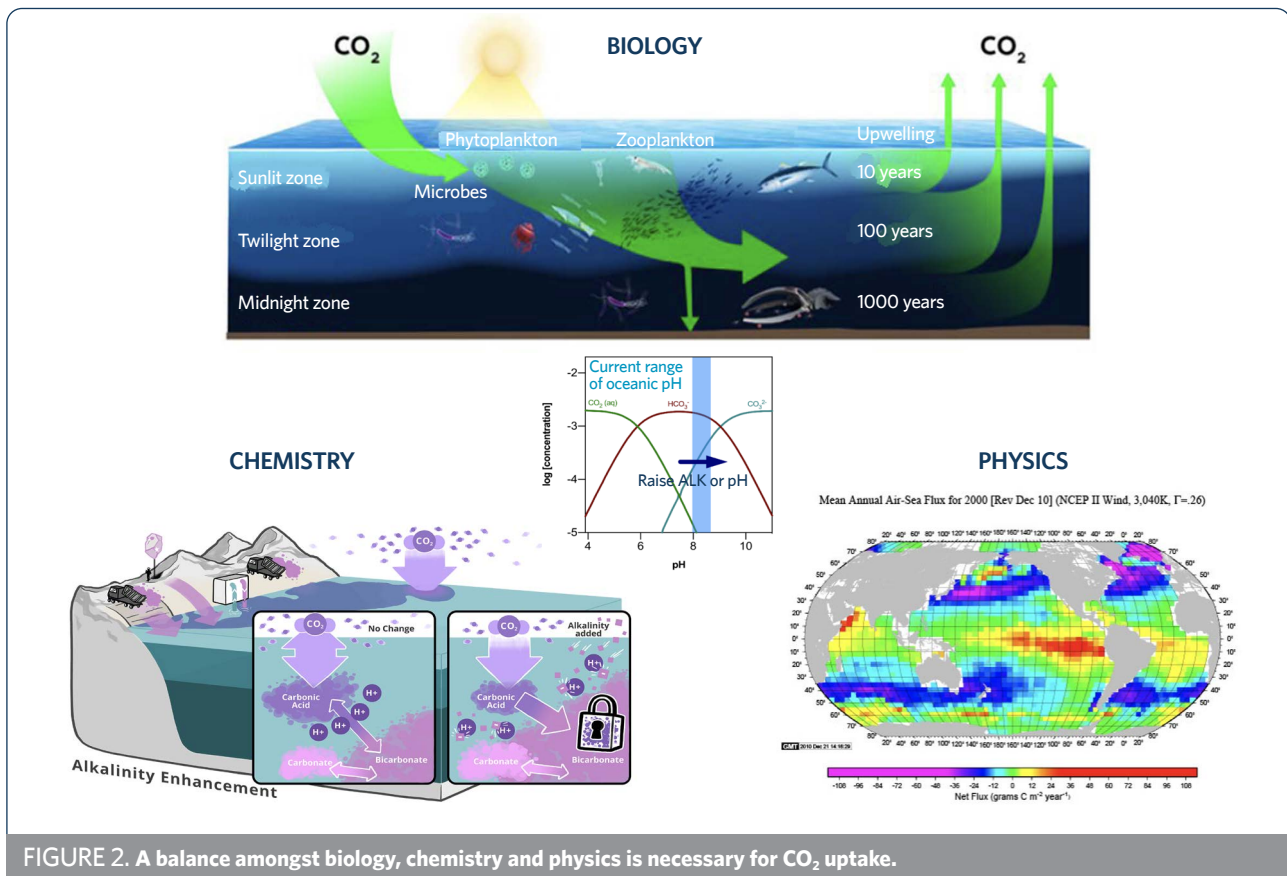


FIGURE 2. A balance amongst biology, chemistry and physics is necessary for CO₂ uptake.

Therefore, there are various mechanisms that are being tried to manipulate oceans to help us to store CO₂ in them:

- Dumping terrestrial biomass into the ocean.
- Fertilising the ocean with iron so that an oxidation effect occurs.
- Adding nitrates and phosphates, which are fertilisers used on land that work in the same way in the ocean.
- Alkalise the waters to achieve greater CO₂ absorption.
- Adopt new options for improving and manipulating mangroves (e.g. algae areas, to change the level of biomass in the physical terrain).
- Pumping the deep ocean so that phytoplankton ascends to higher levels.
- Artificially downwelling CO₂ to greater depths
- Manipulating ocean levels with pumps (Figure 3).

We could use various chemical combinations to remove some of the CO₂ that is in the ocean and help it absorb more; that is, remove or extract the CO₂ already stored to increase its ability to absorb more.

The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine has recently published a report that proposes a

research approach for the elimination and absorption of CO₂ in the oceans.²

Six approaches are addressed, which are classified on the basis of knowledge, efficiency, durability, carbon storage time, scalability, environmental risks and cost-benefit ratio.

The six approaches analyzed are²:

1. **Nutrient fertilisation.** The addition of micronutrients (e.g. iron) and macronutrients (e.g. phosphorus or nitrogen) to the ocean surface may, in some settings, increase the photosynthesis by marine phytoplankton and can thus improve CO₂ uptake and transfer of organic carbon to the deep sea where it can be sequestered for a century or longer.
2. **Artificial downwelling or upwelling.** *Artificial downwelling* is the downward transport of surface water with the aim to counteract eutrophication and hypoxia in coastal regions and as a means to carry carbon into the deep ocean. *Artificial upwelling* is a process where by water from depths (which are generally cooler and richer in nutrients and CO₂ than surface water) is pumped to the ocean surface.

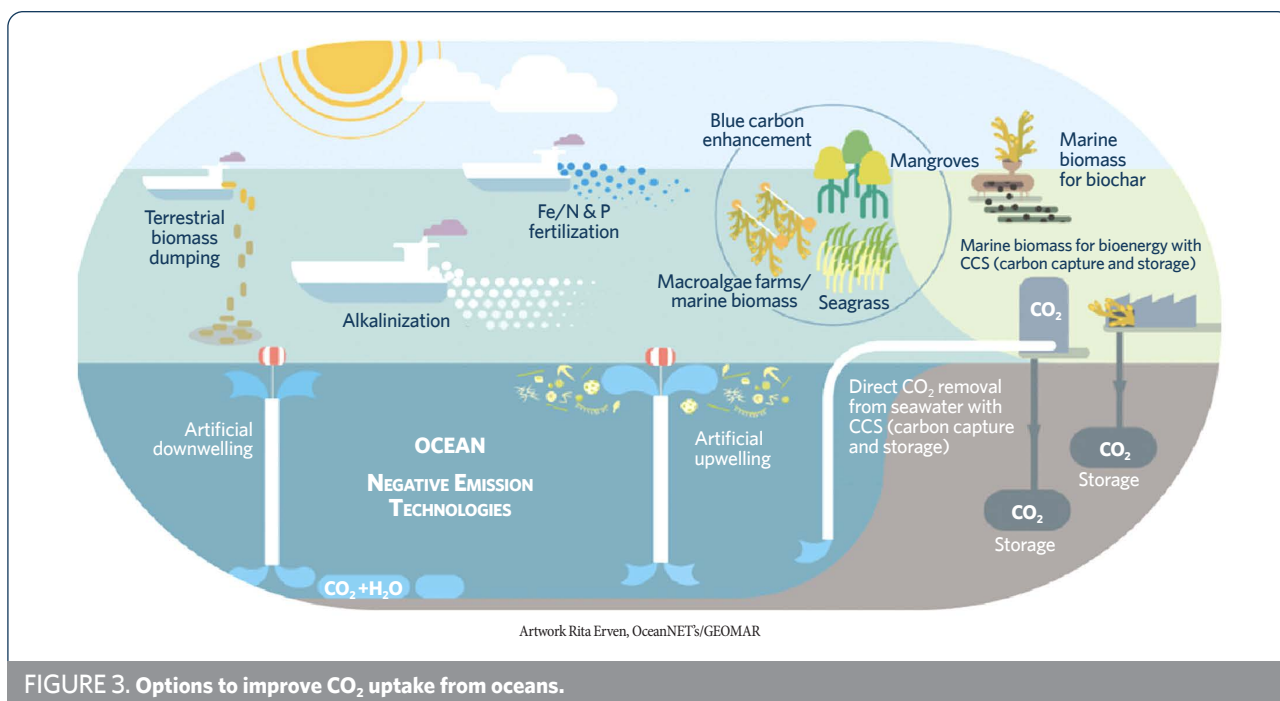


FIGURE 3. Options to improve CO₂ uptake from oceans.

3. **Seaweed cultivation.** Large-scale farming of macrophytes (seaweed) can act as a CO₂ removal approach by transporting organic carbon to the deep sea or into sediments.
4. **Recovery of ocean and coastal ecosystems.** CO₂ removal and sequestration through protection and restoration of coastal ecosystems (kelp forests and free floating *Sargassum*) and the recovery of fish, whales and other animals in the ocean.
5. **Ocean alkalinity improvement.** Altering seawater chemistry through the addition of alkalinity using various mechanisms, including enhanced mineral weathering and electrochemical or thermal reactions that release alkalinity into the ocean, with the aim of removing CO₂ from the atmosphere.
6. **Electrochemical approaches.** Removal of CO₂ or improvement of the storage capacity of CO₂ in seawater by manipulating its acidity or alkalinity, respectively.

Avoiding risks - a priority

After examining all the options, the approach based on ocean nutrient fertilisation is the one that has the most information so far. The key issue of this technique would be environmental risk, although water displacement, the use of algae and the manipulation of ecosystems could also pose a certain threat and environmental risk.

The essential principle that should govern any of these approaches is not to do anything that puts ecosystems at risk. Preserving them and making sure they are not at risk is paramount.

To avoid risks, it is necessary to pay attention to and learn from historical environmental events. There is ample evidence that over time there is a reduction in dissolved oxygen levels in the deep ocean as stratification increases. If any 'biological pump' mechanism is accelerated, a phenomenon of oxygenation of the ocean is induced, which may result in a reduction of the dissolved oxygen in its waters. Historically, this warns us about one of the potential consequences: an increase in 'water respiration' and a decrease in oxygen.

Various experimental works have been conducted in our laboratory to try to increase the alkalinity of the ocean. Several ideas have been put forward to achieve this goal and, by doing so, undo the process of ocean acidification and increase its capacity to store CO₂. However, this approach is not without challenges.

- One of the challenges is that by increasing alkalisation we could reduce ocean water acidification. Calcification may be increased in response to increased alkalinity, thus reducing the efficiency of CO₂ sequestration and storage. In the glacial ocean, decalcifiers increase in line with calcification to compensate, for example, the loss of coral reefs.

In our laboratory we have experimented with many manipulations that show how the **level of calcification increases as the alkalinity of the ocean rises.**

- To accelerate the natural process 100-fold above the normal rate at which it occurs, other elements can be added, so that the flow of substances – such as chromium, nickel or vanadium – would be inevitably increased, as well as the risk of toxicity, which would not be desirable.

If we manage to reach a level of zero emissions in the future, the CO₂ will be balanced and the CO₂ that is already in the ocean will be released and will come out of this environment again.

This means that the CO₂ will go back to the atmosphere depending on the depth at which we deposit it.³

- In recent months, the U.K. government has shown the actions it is taking together with the U.S. government to achieve zero CO₂ emissions, including mainly the replanting of trees and planting new trees.

In all these scenarios, attempts are made to develop policies without considering the ocean as a strategic part of the plan for CO₂ uptake. Therefore, another important challenge is to create a worldwide governance structure that includes the use of the ocean in all the policies that are implemented.

CONCLUSIONS

- » We can **manipulate the ocean to absorb more CO₂**. However, we still need to do more research to establish the best approach and to choose the most appropriate techniques. These technologies are in their infancy and we have the challenge of performing field tests that disturb the environment to some extent to learn what can happen when doing these manipulations on a large scale.
- » We will likely need a **mosaic of different techniques and approaches to balance the risk of scalability**. However, we should decide in advance what is definitely not going to work or what we cannot prove due to the possible negative environmental risk that comes with it.
- » As a scientist, I think **we have to be cautious about artificially increasing the natural speed of the ocean to capture CO₂**. It is necessary to calculate as accurately as possible the unintended consequences of speeding any process 10- to 100-fold above the natural rate.

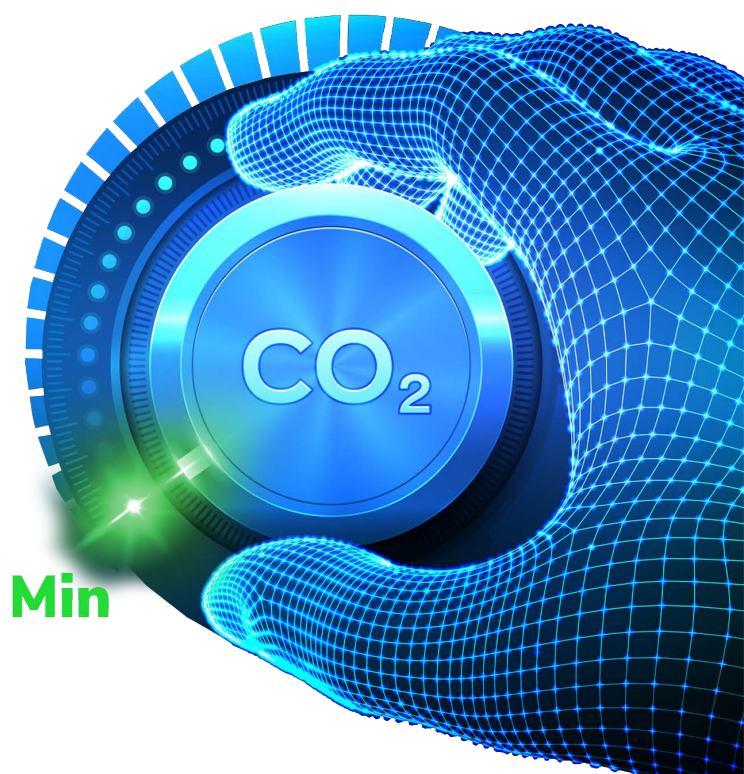
References:

1. Brovkin V, Ganopolski A, Archer D, et al. Lowering of glacial atmospheric CO₂ in response to changes in oceanic circulation and marine biogeochemistry. *Paleoceanography*. 2007;22(4).
2. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration. Washington, DC: The National Academies Press. Available at: <https://doi.org/10.17226/26278>.
3. Gruber N, Landschützer P, Lovenduski NS. The Variable Southern Ocean Carbon Sink. *Annu Rev Mar Sci*. 2019;11:16.1-16.28.

debate

Chairwoman:
Erika Pastrana

Round table:
Dr. Ah-Hyung (Alissa) Park
Prof. Jorge A. Rodríguez Navarro
Prof. Jean-Paul Lange
Prof. Rosalind E. M. Rickaby





Debate

To close this conference, a **colloquium-debate** with the speakers, moderated by Erika Pastrana, has allowed deeper comments to be made on the different global approaches that have been described throughout the session.

Erika Pastrana: *Alissa, in your lecture you have talked about how several industries are changing their practices, technologies and emission levels. What is your perspective on the real potential of these measures and whether they can allow us to become more successful?*

Dr Ah-Hyung (Alissa) Park: This area of climate change mitigation has really become a real global issue and the industry has taken it into account, due to the circular economy. To be truly effective, it is necessary to adopt measures that are based on three pillars: technology, market and policies. Each column has to establish a balance that allows us to create an overall effect.

Erika Pastrana: *You have also mentioned techniques that seem very simple, but that can help the general population to fight against climate change, such as the incorporation of furnace filters. To what extent are there really practical solutions that we can all use in our home and what role are we as citizens going to play at the individual level? What is the balance between industry and individuals? How are we going to make a difference?*

Dr Ah-Hyung (Alissa) Park: The energy sector was driven by large corporations, so individuals didn't have much to do, we couldn't choose energy resources or what kind of energy to use. Now, with the high penetration rate of renewable energies, it is already possible to implement a series of measures in the environment and in our daily lives.

Today we can understand its practical impact; however, the population does not have the necessary knowledge and skills.

This cannot change overnight, and achieving the goals is going to be very difficult. However, at present, new technologies are being incorporated rapidly; there is no doubt that the level of readiness for the implementation of the technology has accelerated tremendously in recent years.

The problem is that new technology can also, in turn, have an impact on the environment. For example, in relation to solutions based on ocean manipulation, although they are necessary, it is useful to know the consequences that could result from such manipulation. We need to plan better, and include in decision making all the stakeholders from academia, science, industry and individuals; with their knowledge and help it will be possible to know what the short-, medium- and long-term consequences of these measures will be.

I mentioned the issue of furnace filters. These are measures that are also taken in a simple way, which the general population can apply in their daily lives.

Undoubtedly, the more parties involved the sooner the population will appreciate the result of their decisions. That is why I like these approaches, although this does not mean that everyone has to take specific measures, but that we must implement measures together.

We have the technology, but the question is whether we can move this global process forward. The circular carbon economy is not only constrained by technological development, but also by the future availability of more affordable renewable energy as well as hydrogen.

Erika Pastrana: *In his lecture, Jean-Paul discussed the new sources of energy and focused on air travel. We cannot live without air transport; it is part of our society. Could you tell us a little more about what you think is going to happen with air travel? How can this type of transport be made more environmentally sustainable?*

Prof. Jean-Paul Lange: It's a very good question, Erika. I think we have different options for air travel. Some attempts have been made at electrification, which would be a solution for short distances, but not for long distances due to the weight of the battery that the plane would have to carry.

Aviation needs highly dense fuel, because the space available is very limited. It also weighs and you have to lift the device in the air at 10 km high, so fuel is crucial.

At the moment, we are examining two possible energies for aviation: hydrogen and renewable hydrocarbons. The best thing about hydrogen is that it is a very light fuel; however, it would need a very heavy tank and a lot of volume. In this regard, significant efforts are being made to modify the design of the planes, with ideas such as placing passengers on the wings and placing hydrogen fuel in the centre, in the fuselage. The design of the aircraft would be completely different from the current one and, perhaps, even that of the airports themselves, which should be adapted so that passengers could access the plane differently than they do now.

The other option being explored for application in aviation is carbon-based renewable fuels. It is worth mentioning biocarbon or CO₂. Today, biocarbon (which would be obtained from vegetable oils) is the one that is being valued the most because, among other things, it is the least expensive, although it is three to four times more expensive than the one currently used. This might be an initial step, but it's not going to be the long-term solution: there isn't as much of such a biomass in the world that would be needed to meet the high fuel demand of global aeronautics.

For this reason, we have to focus on other types of biomass to generate that carbon in the long term, such as capturing CO₂ from the atmosphere, or using of hydrogen. And if hydrogen can't be used directly in airplanes, it could surely be combined with carbon. From a technical viewpoint,

this last option is feasible – as we have shown in Amsterdam – since it has been possible to place half a ton of fuel on an aircraft. However, it has a very high cost and an immense margin for improvement.

Erika Pastrana: As for the new methods that are being used to design better materials, such as artificial intelligence, I would like to know Jorge's opinion on the role that this resource can play in finding new materials and in optimising the capture and release of CO₂. Where do you see most potential in the next 2 or 3 years? In which area will artificial intelligence bring more value?

Prof. Jorge A. Rodríguez Navarro: Big Data and artificial intelligence have enormous potential when it comes to finding new materials and optimising them. As my colleagues have pointed out in this meeting, we now know, for example, that over time the pH of the oceans will increase, which would have advantages and produce benefits, but it is unknown what the long-term impact would be, which could be potentially negative.

Artificial intelligence allows the analysis of multiple parameters and could help us to know what the factors are and how many should be considered to feel more confident when applying better approaches without the risk of causing a potential negative impact.

However, it is true that not all data obtained through this system based on artificial intelligence agree with what subsequently happens when applying the results to reality, since real-setting approaches always carry unforeseen consequences.

Erika Pastrana: Rosalind, what are the possible unintended consequences these new techniques regarding mani-

pulation of oceans could entail? What worries you most about this option?

Prof. Rosalind Rickaby: What worries me most are ecosystems and the biota. I guess not many people know about these life forms, but algae and ocean microorganisms provide half the oxygen we enjoy in our atmosphere and remove half of the CO₂, so they are of crucial importance to our lives. We should not forget that fish is the basis of nutrition in many countries, nor should we ignore the importance of coral reefs – the latter being ecosystems that, in addition to promoting underwater tourism, help protect the coast from tides, contribute to buffer other natural events harmful to humans and constitute a bioindicator of water health.

There is a risk of jeopardising all this with these new technologies. There are things we can do to reduce the risk level, but really my big fear when it comes to manipulating the ocean is oxygen. There are very deep levels of the ocean where the oxygen level is already very low; in this respect, it would be good if we could focus on those areas to bury carbon. In addition, the deep ocean has calcium carbonate sediments that would naturally react with the injected CO₂, which would make it possible for the acidity to neutralise at those depths over time.

Undoubtedly, the key in the ocean is the location where we are going to exercise our action. However, there are different regions that vary greatly from each other. We should make a 'regional' approach to the ocean: it is important to analyse and determine which approaches we can apply, depending on the ocean region, in order to obtain the maximum positive impact and the minimum negative impact.

CAPTURA DE CO₂ ATMOSFÉRICO: tecnologías para un futuro sostenible

Uno de los objetivos de la ONU en el marco de los «Objetivos de desarrollo sostenible» es la «acción por el clima» (*climate action*). A día de hoy, el calentamiento global es el problema más acuciante para las generaciones presentes y futuras. El aumento de la población mundial y las demandas crecientes de energía y agua ponen de manifiesto la dificultad para alcanzar este objetivo y la diversidad de esfuerzos e iniciativas que requiere.

Una de las medidas más importantes es la reducción de las emisiones de gases causantes del efecto invernadero a través de acuerdos internacionales y estrategias que garanticen un cambio significativo hacia el uso de energías renovables. Pero esta medida por sí sola no es suficiente; en paralelo, es necesario el empleo de métodos y tecnologías que reduzcan activamente la cantidad de estos gases en la atmósfera, en particular, de dióxido de carbono (CO₂).

La reducción o eliminación de CO₂ atmosférico puede realizarse con estrategias que permiten su almacenamiento en estructuras geológicas o con productos específicamente diseñados para su captura. A través de estos desarrollos científicos, junto con otras iniciativas como la ampliación de bosques, los cambios en la agricultura, la biomasa oceánica y la mineralización del carbono, se espera contribuir a un futuro más sostenible.

La conferencia se centrará en las tecnologías más punteras y prometedoras para capturar y almacenar el CO₂ atmosférico, tanto con compuestos organometálicos porosos como con otros derivados químicos, además de describir cómo transformar los residuos sólidos en energía renovable y utilizar la capacidad del océano para absorber el CO₂.

ATMOSPHERIC CO₂ CAPTURE: technologies for a sustainable future

One of the United Nations objectives within the «Sustainable Development Goals» framework is «climate action». Today, global warming is the most pressing problem for present and future generations. A growing world population and its increasing demands on energy and water underline the difficulty of achieving this goal and the diversity of efforts and initiatives required to achieve it.

One of the most important strategies is the reduction of greenhouse gas emissions through international agreements and other policies to ensure a significant shift towards the use of renewable energies. However, other actions are needed; new methods and technologies that actively reduce the amount of these gases in the atmosphere, in particular carbon dioxide (CO₂) could contribute to significantly reducing the current greenhouse gas emissions.

The reduction or elimination of atmospheric CO₂ can be achieved through strategies that stored it in geological structures, or through products specifically designed to capture it. These scientific developments, together with other initiatives, such reducing deforestation and changing in agriculture, ocean biomass and carbon mineralisation, will hopefully contribute to a more sustainable future.

This conference will focus on the latest and most promising technologies for capturing and storing atmospheric CO₂, both with metal-organic frameworks and other chemical compounds, as well as describing how to convert solid waste into renewable energy and using oceans to absorb CO₂.

