

ESFERIFICACIONES HÍBRIDAS DE ALGINATO:
QUÍMICA VERDE PARA LA FIJACIÓN DEL CO₂

FQM_ALGINATOCO₂

AUTOR: Irene Gasparri González
TUTORA: María Comes Navarro
CENTRO EDUCATIVO: IES Carles Salvador
POBLACIÓN: Aldaia

ÍNDICE

Resumen del proyecto.....	2
Introducción.....	3
Objetivos e hipótesis de la investigación.....	5
Experimentación.....	6
Materiales y métodos empleados.....	9
Síntesis.....	9
Desarrollo experimental.....	10
Propuestas para la vegetación terrestre.....	14
Propuesta para la vegetación acuática.....	14
Conclusiones.....	15
Agradecimientos.....	16
Bibliografía.....	17

RESUMEN DEL PROYECTO

La finalidad de este proyecto ha sido el diseño de un sistema complejo para la captura del dióxido de carbono atmosférico o disuelto en agua utilizando esferas de alginato.

La bibliografía recoge muchos ejemplos donde los hidrogeles de alginato se utilizan para la liberación controlada de fármacos así como para la microencapsulación o soporte de células y enzimas.

Aprovechando las propiedades de porosidad de la matriz, para la liberación o entrada controlada y ofreciendo su interior un medio estable para la reactividad química, hemos diseñado un sistema, donde utilizando las antocianinas extraídas de la col lombarda como sistema sensor de pH encapsuladas en esferas de alginato y rellenas de hidróxido de calcio, en presencia de dióxido de carbono, el sistema captura éste dióxido de carbono por mineralización.

El resultado de este proceso es monotorizado a simple vista por un cambio de color en el sistema sensor y por la consiguiente formación de carbonato de calcio que hemos podido comprobar por RX.

El sistema ha sido testado tanto en captura directa del aire (CDA) como en agua. En ambos se ha conseguido el resultado esperado.

Además se ha comprobado la estabilidad del sistema en el tiempo y en diferentes medios (agua, aire y tierra) de forma que hemos podido intuir que este sistema podría ser aprovechado por diferentes sistemas vegetales como nutriente una vez realizada la captura del dióxido de carbono. De esta forma, el diseño de este material contribuye a cerrar el ciclo del carbono además de cumplir los requisitos de la química verde.

INTRODUCCIÓN

En la COP21, la conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático que tuvo lugar en París, los gobiernos decidieron que es necesario movilizar con urgencia una acción climática más firme y exigente para cumplir los objetivos del Acuerdo de París. Según el PNUMA, si no se reducen las emisiones de dióxido de carbono es posible que en este mismo siglo la temperatura del planeta aumente en 2,9°C (*Climate Action*, n.d.). Esto es realmente preocupante pues cada vez más se nota este cambio en la vida diaria.

La acción no sólo debe ser impulsada por los gobiernos, los ayuntamientos, las comunidades autónomas, las compañías y los inversores, sino que también debe contar con la participación de la comunidad científica.

Aunque es obvio que la disminución de las emisiones de dióxido de carbono debe ser una de las principales metas de la sociedad y cumplir los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 tales como el ODS 13, Acción Climática, y el ODS 14, Vida Submarina, su captura y almacenamiento es una opción que podría ayudar a reducir las grandes concentraciones de este gas en la atmósfera terrestre.

La captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CAC) se compone de tres etapas principales. Primeramente, se captura el CO₂ en su fuente y se distingue de los otros gases producidos por los procesos industriales cuando es necesario. Después, se transporta el dióxido de carbono capturado a un lugar adecuado para almacenarlo. Por último, este almacenaje de CO₂ se lleva fuera de la atmósfera durante un largo período de tiempo, como en formaciones geológicas subterráneas, en las profundidades oceánicas o dentro de ciertos compuestos minerales. (*Consenso Científico Sobre Captura Y Almacenamiento De CO₂*, n.d.)

Obviamente la forma más común y respetuosa para la captura del dióxido de carbono lo realizan ampliamente la flora por el mecanismo fotosintético. Pero también existen ciertos tipos de cianobacterias que en vez de capturar el CO₂ siguen un proceso de mineralización carbonatada cianobacterial. De la misma manera que nuestra propuesta, las cianobacterias transforman el CO₂ en CaCO₃, siguiendo un proceso que se divide en varias etapas. En primer lugar capturan el dióxido de carbono de la atmósfera o del agua para realizar la fotosíntesis. Éste reacciona con el agua para dar HCO₃⁻, que se disocia en CO₃⁻ e iones H⁺. Como al realizar la fotosíntesis, las cianobacterias aumentan el pH del microambiente de alrededor de sus células, favorece a la producción de CO₃²⁻. Si hay iones de calcio cerca, reaccionarán y darán lugar al CaCO₃. Al final, el carbonato de calcio se precipita y se deposita para formar rocas sedimentarias como la calcita.

Con la idea de imitar la naturaleza con un esqueleto bio(in)orgánico, iniciamos nuestro estudio con el alginato.

El alginato de sodio es un biomaterial de cadena lineal unido al sodio que al introducirle Ca⁺² esferifica. (Dittmar et al., 2016) Aparte de ser utilizadas en dicho té, también son usadas para simular caviar e inclusive tiene aplicaciones en la medicina y en farmacia puesto que encapsulan medicamentos para que las capas de alginato al degradarse regulen la expulsión. (Raus et al., 2020). El uso del alginato y sus múltiples aplicaciones están en continuo desarrollo. Ya se aplica con éxito en distintos sectores. Algunos ejemplos son la generación de barreras en alimentos frescos y de humedad intermedia, apósitos biodegradables en el tratamiento de algunas patologías del ser humano, encapsulación en films de diversas sustancias, entre ellas fitocompuestos, fármacos y enzimas (Liakos et al., 2013; Soukoulis et al., 2014), inmovilización de microorganismos como bifidobacterias, bacterias ácido lácticas (Cui et al., 2000; Concha-Meyer et al., 2011), transporte de nanopartículas, compuestos antimicrobianos (Millette et al., 2007; Bajpai et al., 2012), hasta el diseño de matrices con liberación controlada de herbicidas y nutrientes minerales para el sector agrícola (Silva et al., 2010; Oliveira et al., 2011).

El proceso de la creación de las esferas es sencillo, se sumergen en el líquido o gas que se pretende encapsular y el alginato lo atraparé, manteniéndolo en su interior debido a su estructura de caja de huevo.

Al parecer, ya había artículos sobre cómo atrapar el CO_2 dentro de esferas de alginato. Sin embargo, al ser un polímero y este terminaría bio degradándose, pensamos en cómo se podía conseguir esa degradación pero que al mismo tiempo no se desprendiera de nuevo el dióxido de carbono a la atmósfera. Para conseguir esto, se nos ocurrió la idea de encapsular en el alginato $\text{Ca}(\text{OH})_2$, de manera que en el momento que entrase el CO_2 reaccionasen y así dar CaCO_3 , que serviría como nutriente para las plantas y la tierra.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

El principal objetivo de este proyecto ha sido cumplir con los principios de la química verde o sostenible, además de contribuir al desarrollo del Objetivo de Desarrollo Sostenible 14, cuya intención es, aparte de mantener bien conservados los océanos, mares y recursos marinos*, prevenir y reducir la acidificación de estos.

Además este proyecto ha querido desarrollar los siguientes objetivos:

1. Síntesis de esferas de alginato cargadas con un indicador ácido-base.
2. Estudio de su comportamiento a la variación del pH.
3. Estudio de la permeabilidad de la membrana cuando el entrecruzamiento polimérico se realiza con diferentes cationes divalentes (como Zn^{2+} o Cu^{2+})
4. Estudio y caracterización de la captura de dióxido de carbono, en agua y aire.
5. Estudio de la estabilidad de las esferas carbonatadas con el tiempo en función del medio (agua o aire)
6. Estudio de la aplicabilidad de las esferas carbonatadas en el medio accesible a las raíces de las plantas.

EXPERIMENTACIÓN

Alginato

El alginato es un polisacárido lineal proveniente del tipo de alga *phaeophyceae* o alga parda. El principal componente del alginato es el ácido algínico mientras que el alginato sódico (SA) es la sal Na del ácido algínico, que es un polímero con abundantes grupos hidroxilo y carboxilo libres distribuidos a lo largo de la cadena principal del polímero.

El polisacárido lineal está formado por dos monómeros que son residuos de ácidos urónicos, el ácido D-Manurónico y el L-Gulurónico. Estos forman 3 tipos de secuencias o bloques distintos: Bloque A, donde la relación es del 63% M y 37% G, Bloque B, considerado como un homopolímero M, ya que su relación es del 97% M y 3% G, y por último, el Bloque C, con una relación de 15% M y 85% G. (Ayarza León, 2014, 20) (Figura 1)

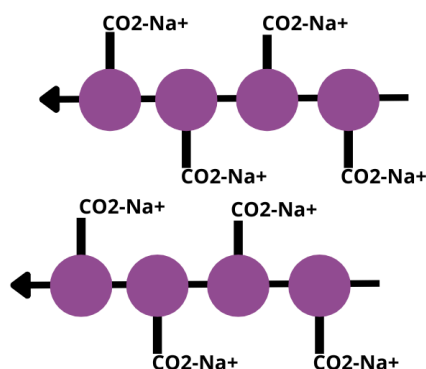


Figura 1. Cadenas lineales de alginato sódico

El alginato de sodio no es tóxico, es estable en el medio ambiente, con gran capacidad de gelificación, formación de películas y complejos. El gel de alginato sódico es blando y soluble en solución alcalina.

Debido a su no toxicidad, biocompatibilidad y capacidad de formar enlaces cruzados con cationes, el alginato se ha utilizado para encapsular compuestos químicos y biológicos con una amplia gama de aplicaciones en agricultura, tecnologías alimentarias, cosmética farmacéutica, ingeniería química, ingeniería medioambiental, textil y muchos otros ámbitos.

El alginato de sodio contiene un gran número de grupos funcionales, tales como el grupo hidroxilo y el grupo carboxilo junto con su cadena principal que pueden modificarse químicamente mediante entrecruzamiento, esterificación y eterificación. El proceso que tiene lugar para la formación del gel implica la interacción entre el alginato de sodio y el catión divalente (como los iones de calcio) o cationes poliméricos. Para poder esferificar el alginato se utilizan cationes divalentes que van a sustituir el catión Na^+ de la estructura, formando un gel de alginato cálcico con la característica forma de “caja de huevos” (Figura 2). El calcio queda interactuando con las cadenas lineales formando una estructura tridimensional.

El alginato esferificado se disuelve y se abre al estar en un medio de pH básico.

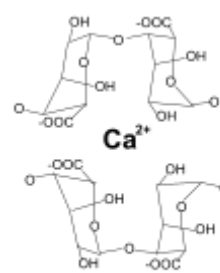


Figura 2. Estructura caja de huevo de alginato esferificado

En nuestro diseño experimental, hemos querido comprobar la versatilidad de la formación de esta estructura de huevo con diferentes cationes divalentes.

En la misma proporción del 5% en peso, se preparó una disolución de cloruro de cinc y una disolución de sulfato de cobre, y se dejó caer gota a gota la mezcla de alginato de sodio con el extracto de col lombarda.

Para la posterior introducción del hidróxido de calcio, se ha estudiado la estabilidad de las esferas de alginato con el pH. Según la bibliografía consultada, los iones hidróxido pueden difundir a través de la superficie de alginato de calcio y como podemos observar experimentalmente, hay un cambio de color de azul-violeta a verde, correspondiente al cambio de pH que nos debe indicar la antocianina.

CO₂

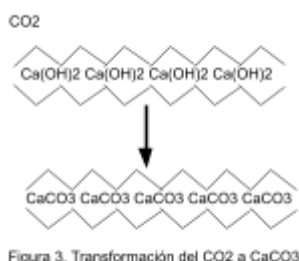
El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro formado mediante enlaces covalentes por dos átomos de oxígeno y uno de carbono.

Estudios científicos demuestran que el aumento de la temperatura media del planeta es una consecuencia de la emisión a la atmósfera de gases de efecto invernadero derivados de la actividad humana fundamentalmente. El CO₂ es el causante de más de un 60% del efecto invernadero, siendo actualmente la concentración de este gas en la atmósfera tan elevada como hace 650.000 años, momento en el que la actividad volcánica era muy intensa.

Los efectos del CO₂ atmosférico en altas cantidades afecta a los seres vivos y deteriora su vida, llegando a producir enfermedades como la *hipercapnia*, generada por un número considerado de CO₂ en la sangre, este CO₂ hace que el pH de la sangre se acidifique y termina resultando en *acidosis* o incluso afecta a la concentración, produce dolores de cabeza, entre otros. Es importante saber cómo nos afecta el exceso de CO₂ y es por ello que reducir las emisiones de CO₂ es uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Además, el CO₂ no afecta solo en la atmósfera, sino que provoca la acidificación de los océanos (ODS 14), ya que según un estudio de la UNEP, se ha producido un decrecimiento del 30% del pH. El incremento de CO₂ afecta a la reproducción de varias especies marinas y al sustento alimenticio de estas, a los arrecifes de coral y a la calcificación de especies jóvenes de moluscos que provocan cambios en su tamaño. Como consecuencia, esto afecta a las cadenas alimenticias y, por lo tanto, a la dieta que consumimos.

Según los investigadores Wickett y Caldeira, si no se reducen las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, en 100 años se duplicarían las concentraciones de iones H⁺, por lo que el pH de la superficie del océano podría alcanzar las 0.4 unidades. (Caldeira & Wickett, 2003)



El CO₂ puede ser encapsulado mediante esferas de alginato. Para asegurarse de que la fijación es máxima y que, además, al producirse la degradación del alginato el CO₂ no quedará expuesto, se introduce Ca(OH)₂ con la idea de que, junto con el dióxido de carbono, sea transformado a CaCO₃, nutriente importante para las plantas y otros seres vivos. (Figura 3).

En nuestro diseño experimental esta encapsulación se ha hecho directamente, haciendo pasar dióxido de carbono sobre las esferas preparadas, o introduciendo estas esferas en medio acuoso.

CaCO₃

El CaCO₃ es un compuesto químico sin sabor, blanco, inodoro e insoluble, es uno de los minerales más abundantes de la tierra. Normalmente se encuentra en forma de calcita o de aragonita. Está formado por un átomo de calcio, uno de carbono y tres de oxígeno (Figura 4)

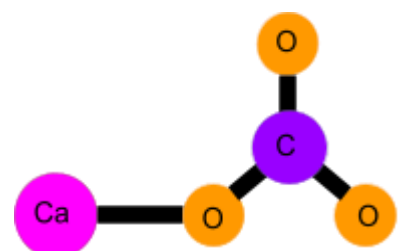


Figura 4. CaCO₃

El carbonato de calcio se encuentra en cualquier medio pero es más habitual en mares cálidos, tropicales y subtropicales.

El CaCO_3 toma importancia en varios procesos biogeoquímicos. En primer lugar, el carbonato de calcio es el componente principal de las rocas sedimentarias como las calizas. (Moreno Ramón et al., 2012) Este tipo de rocas se forma mediante la acumulación y condensación de los organismos marinos que hacen uso del CaCO_3 para crear sus caparazones y esqueletos. Esto influye en la topografía de la Tierra que como resultado proporciona recursos minerales.

Hay ciertas especies de animales en el océano que al realizar sus funciones metabólicas disminuyen los iones de carbonato en el medio, por lo que aumenta la acidez. (GLOBAL OCEAN EXPLORATION Inc., 2011)

Otro proceso en el que el carbonato de calcio participa es en el ciclo del carbono, donde el CaCO_3 se disuelve en el agua y libera iones de calcio que serán usados por organismos marinos para crear estructuras de carbonato cálcico. (NASA Earth Observatory, 2011). Este proceso es un aporte importante en cuanto al cambio climático, ya que regula las cantidades de carbono que se puede encontrar en la atmósfera y en los océanos. (Wilkin & Brainerd, 2017).

MATERIALES Y MÉTODOS EMPLEADOS

Para realizar este proyecto se ha usado:

- Sodio alginato | CAS[9005-38-3] | LOTE: 0120214
- CaCl_2 | CAS[10043-52-4] | LOTE: 23F37803
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | LOTE: PF23013010

SINTESIS

Para preparar las esferas híbridas utilizamos alginato sódico al 2% en peso que se disuelve en 25ml a temperatura ambiente y se le añade hasta 95% en peso una disolución del extracto de col lombarda. Esta mezcla es añadida gota a gota sobre una disolución de CaCl_2 al 5% y las esferas se forman inmediatamente. Para eliminar el exceso de reactivo, la muestra es filtrada y lavada con agua desionizada varias veces y secada al aire a temperatura ambiente.



Imagen 1. Preparación de las esferas de alginato con el extracto de col lombarda.

En otro recipiente, se prepara una disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturada, se filtra y se añade sobre las esferas durante 10 minutos, observando el cambio de color producido por la interacción del hidróxido sobre el indicador encapsulado. De nuevo las esferas se filtran y se lavan repetidamente con agua y se dejan secar al aire a temperatura ambiente.

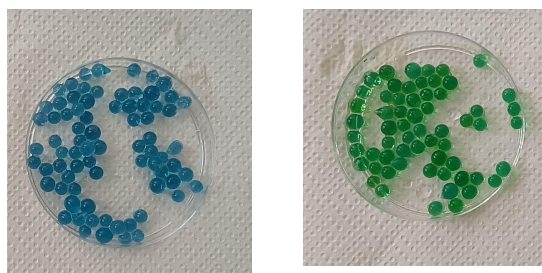


Imagen 2. Esferas de alginato con extracto de col lombarda. A la izquierda, sin reaccionar con hidróxido de calcio. A la derecha, una vez ha reaccionado con hidróxido de calcio.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El CO_2 puede ser capturado tanto atmosféricamente como en el agua, por eso se ha experimentado de ambas formas para ver cuál es el método más efectivo y además para verificar la versatilidad de las esferas híbridas.

Con un sistema de captación de CO_2 , formado por dos recipientes con tapones de dos bocas que son unidos por una goma enganchada a una boca de cada recipiente y con otra goma cada una en la otra boca, que pueden ser abiertos o cerrados mediante una llave que es colocada en cada goma del sistema.

En uno de los recipientes se han colocado las esferas llenas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y en el otro se ha puesto vinagre con bicarbonato para simular el aire con dióxido de carbono. Primero se han abierto las gomas que no están conectadas para dejar salir el aire, después son cerradas e inmediatamente se abre la llave de la goma que conecta los dos recipientes, consiguiendo que pase de un recipiente a otro el CO_2 . Al cabo de una hora es notorio el cambio de color en las esferas pasando de verde a azul. Las esferas son retiradas y se dejan secar durante 2 horas a 60°C . Al observarlas bajo una lupa se ve una estructura cristalina que es el CaCO_3 que se ha formado.

Para simular el agua carbonatada se repite el proceso anterior, la única diferencia es que en el recipiente donde han sido dejadas las esferas híbridas se le añade agua junto con las esferificaciones. Al ser secadas, se puede observar que también tienen apariencia cristalina. (Figura 4)



Imagen 4. Diseño experimental del sistema de captación de dióxido de carbono en aire.

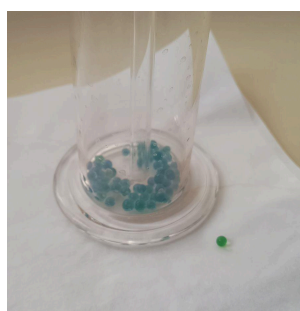


Imagen 5. Muestra del cambio de color después de 20 minutos de paso del CO_2 en el sistema de la imagen 4.



Imagen 6. Observación del cambio de color de las esferas de alginato cuando se burbujea dióxido de carbono sobre agua.

Para comprobar que realmente el dióxido de carbono ha entrado en la esfera y ha reaccionado con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se ha realizado un Rayos X. Han sido enviadas tres muestras, la primera son esferas deshidratadas que han capturado el CO_2 en el agua, la segunda, esferas también deshidratadas que han sido expuestas al dióxido de carbono atmosférico, y por último, esferas deshidratadas que no se les ha introducido $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y que por lo tanto, no han podido capturar CO_2 .

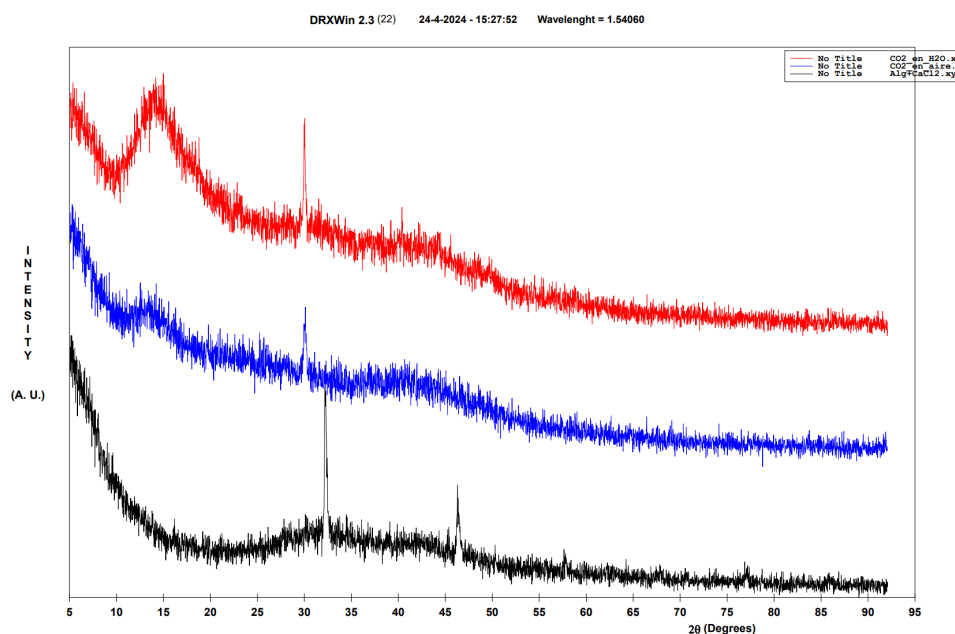


Figura 5. Difracción de Rayos X de las muestras a) después del proceso de captación de CO_2 en agua; b) después del proceso de captación de CO_2 atmosférico; c) esferas de alginato sin hidróxido de calcio.

Como se puede ver en los resultados obtenidos de difracción por RX que se muestran en la Figura 5 y en comparación con el patrón que se muestra en la figura 6., se ha encontrado que en las dos primeras muestras sí hay calcita (CaCO_3), mientras que en la tercera muestra no hay carbonato de calcio. Esto demuestra que hemos realizado bien el experimento.

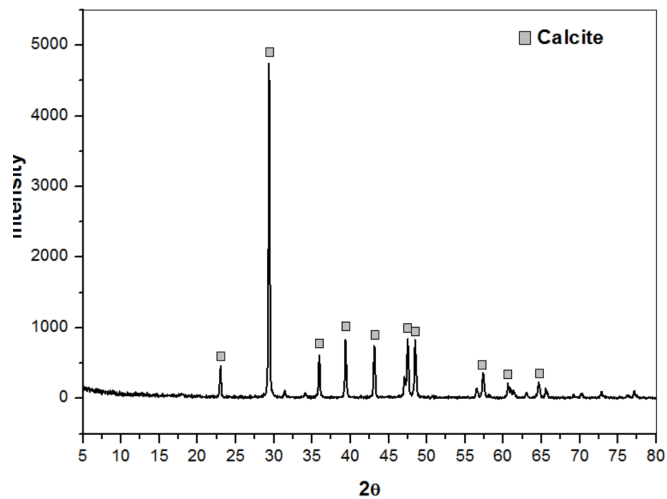


Figura 7. Patrón de difracción de RX para la Calcita.

Para comprobar su biocompatibilidad, introducimos esferas de alginato en agua y en tierra.

En agua, determinamos cualitativamente el avance de la reacción, por comparación visual del cambio de color.

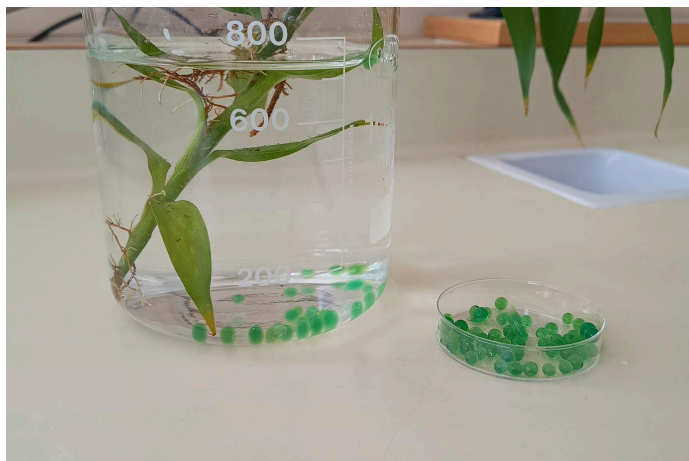


Imagen 8. Esferas de alginato con hidróxido de calcio introducidas en agua. Observación del crecimiento de la planta.



Imagen 9. Observación del cambio de color con el tiempo.

Este experimento se ha llevado a cabo también en tierra, con la observación cualitativa de los cambios experimentados de las esferas para el crecimiento de lentejas:



Imagen 10. Crecimiento de lentejas en tierra con esferas de alginato.

Con el tiempo, observamos que en agua las raíces de la planta buscan enredarse con las esferas de alginato. Esta observación no ha sido fácil de apreciar en el caso del estudio en tierra, pues las esferas acaban degradándose y queda un residuo cálcico que se confunde en el medio.



Imagen 11. Observación del crecimiento de las raíces de la planta sobre las esferas.

PROPUESTAS PARA LA VEGETACIÓN TERRESTRE

Al introducir carbonato de calcio en suelos de pH ácido, reacciona con los ácidos y aumenta el pH del suelo, lo que conlleva a que la tierra sea más adecuada para muchas más variedades de plantas y a la neutralización del suelo (Havlin et al., 2013). Asimismo, el aumento del pH del suelo influye en la solubilidad de otros nutrientes como lo son el nitrógeno, el potasio o el fósforo que son más solubles en medios menos ácidos y en consecuencia, las raíces de las plantas pueden absorber estos nutrientes con mayor facilidad (Brady & Weil, 2008). Además, el CaCO_3 libera calcio, que interviene en la creación de las paredes celulares y es parte de la estructura de las células vegetales. Si se abastece correctamente el suelo con calcio, mejora la estructura del suelo, que beneficia al crecimiento y desarrollo de las raíces, ya que fomenta mejor infiltración de agua y aireación (Marschner, 2012). La introducción de CaCO_3 en el suelo también hace que se reduzca la toxicidad de los metales pesados en el suelo. En medio ácido, el aluminio y el manganeso son muy solubles y estos son dañinos para la planta y afectan al crecimiento de ésta. Como el pH aumenta por el carbonato cálcico, se reduce la solubilidad de estos metales, y por consiguiente, la toxicidad (Kabata-Pendias & Pendias, 2001).

Las esferas de alginato podrían contribuir a disminuir el tiempo de regeneración de bosques cuando estos, por ejemplo, han sido devastados por un incendio, ya que se aprovecharía el exceso de CO_2 emitido por la combustión y al depositar las esferas de alginato bajo tierra, atraparían el dióxido de carbono y lo transformaría en calcita, que proporcionaría nutrientes y neutralizaría la tierra para favorecer la regeneración del medio.

La propuesta que planteamos sería de utilizar las esferas de alginato con Ca(OH)_2 e introducirlas en terrenos de zonas agrícolas para mejorar la calidad de vida de las plantas, mejorar su desarrollo y crecimiento, optimizar la eficiencia de fertilización y la salud general de los cultivos.

PROPUESTA PARA EL MEDIO ACUÁTICO

Las esferas pueden contribuir a la mejoría de la calidad del agua y a la reducción de la huella de carbono. Al liberar calcita en el agua, las esferas favorecen el pH neutro, mejorando la calidad de vida acuática. Asimismo, el CaCO_3 en el agua aumenta la alcalinidad, que contribuye a una mayor estabilidad del medio para procesos biológicos como la fotosíntesis o la respiración (Wetzel, 2001). El carbonato cálcico al disolverse en el agua emite iones de calcio que los habitantes acuáticos necesitan para desarrollarse. En los ecosistemas marinos, la presencia de calcio es fundamental para el correcto desarrollo de los esqueletos y caparazones de organismos como los moluscos y algunos crustáceos. (McPherson & Sundquist, 2013, 3-18). Los iones de carbonato cálcico interactúan con iones metálicos tales como el plomo y el cadmio, generando compuestos insolubles que precipitan fuera del agua. Esto disminuye la concentración de dichos metales que son nocivos para la naturaleza marina. En aguas menos ácidas, nutrientes como el fósforo y el nitrógeno son más solubles y, por lo tanto, el fitoplancton los absorberá con mayor facilidad. Así, se promueve una cadena alimentaria fuerte (Golterman, 2004). Para finalizar, el CaCO_3 reduce la toxicidad de metales pesados como el aluminio y el mercurio en el agua porque disminuye su solubilidad, de forma que se protege la vida de los organismos acuáticos (Schindler, 1988).

Los arrecifes de coral dependen del calcio para poder crear sus estructuras. La calcificación de los corales es esencial para la conservación de los ecosistemas, ya que no solo son hábitats para una gran cantidad de especies marinas, sino que también protegen las costas de la erosión (Kleypas et al., 1999).

Al introducir las esferas de alginato con hidróxido de calcio en el agua, este atraparé el CO_2 que haya en exceso y reducirá la acidificación, además, al transformarlo en CaCO_3 , se están aportando nutrientes y materiales necesarios para un correcto desarrollo a las especies acuáticas. Habría que introducirlas en zonas de arrecifes de coral para aportar el calcio necesario e incluso esparcirlas por el medio (no solo en los arrecifes) para reducir la acidificación de la mayor zona posible.

CONCLUSIONES

El diseño experimental presentado en este trabajo es una pequeña muestra de la versatilidad que ofrecen las esferas de alginato, debido a su porosidad, capacidad de almacenamiento de sustancias en su interior, medio óptimo para reacciones químicas, procesos de liberación controlada de sustancias y estabilidad.

Aunque las esferas de alginato pueden prepararse con diferentes cationes divalentes, no hemos encontrado ninguna ventaja a su uso, por lo que el trabajo experimental de biocompatibilidad se ha realizado con estructuras de alginato y calcio.

La estabilidad de las esferas en agua es infinita. Observamos que después de meses, las esferas de alginato mantienen el tamaño y estructura. Las raíces de la planta, buscan enraizarse en estas esferas y aumenta su crecimiento. En tierra, y cuando las esferas van deshidratándose, vemos la degradación de la esfera hasta llegar al residuo cálcico.

A la vista de los resultados, este sistema sí que permite la captura de dióxido de carbono, cuando éste se encuentra tanto en el aire como disuelto en agua. Además, puede funcionar como almacenamiento de nutrientes que las raíces de las plantas pueden aprovechar para su crecimiento.

Por tanto, podemos concluir que este proyecto contribuye a la captura del CO_2 transformándolo en CaCO_3 para poder aplicar estas esferas en diferentes sectores, es decir, que tiene varias aplicaciones que son compatibles con los principios de la química verde y que a su vez cumplen los Objetivos de Desarrollo Sostenible para poder mantener en buen estado el planeta y ayudar a la mejora de éste.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer al instituto IES Carles Salvador (y al profesorado) por haberme brindado la oportunidad de realizar este proyecto y apoyarme a lo largo del curso.

Además, agradecer a la Universidad de Valencia por proporcionarnos los medios necesarios para concluir el proyecto.

Quisiera mostrar mi gratitud a mis amigos y familiares, y sobre todo a mi tutora de este proyecto, María Comes Navarro. Ella me ha impulsado a elaborar este proyecto y me ha ayudado tanto académicamente como en lo personal.

BIBLIOGRAFÍA

- Ayarza León, J. L. (2014). Los alginatos: 20000 usos de las algas submarinas. *Revista de Química PUCP*, 28(1-2), 20. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/10413>
- Caldeira, K., & Wickett, M. E. (2003). Oceanography: anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, 425(365). <https://doi.org/10.1038/425365a>
- Climate action*. (n.d.). UNEP. Retrieved April 24, 2024, from <https://www.unep.org/topics/climate-action>
- Consenso Científico sobre Captura y Almacenamiento de CO2*. (n.d.). GreenFacts. Retrieved June 25, 2024, from <https://www.greenfacts.org/es/captura-almacenamiento-co2/captura-almacenamiento-co2-greenfacts-level2.pdf>
- Dittmar, J., Zowada, C., Yamashita, S., & Eilks, I. (2016, Mayo 26). *Molecular gastronomy in the chemistry classroom*. Science in School. Retrieved February 29, 2024, from https://www.scienceinschool.org/wp-content/uploads/2016/06/issue36_bubbles.pdf
- Ducci, M. (2019). Redox Reactions in Sodium Alginate Beads. *SciEP*, 7(2), 40-44. <http://pubs.sciepub.com/wjce/7/2/2>
- GLOBAL OCEAN EXPLORATION Inc. (2011, Octubre 12). *Western Arctic Log › What is Ocean Acidification?* Western Arctic Log › Ocean Acidification in the Western Arctic Ocean. Retrieved June 26, 2024, from <http://arcticocean.globaloceanexploration.com/?p=104>
- Golterman, H. L. (2004). *The Chemistry of Phosphate and Nitrogen Compounds in Sediments*. Springer Netherlands.
- Havlin, J., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (Eds.). (2014). *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. Pearson.
- Kabata-Pendias, A. (2000). *Trace Elements in Soils and Plants* (3rd ed.). <https://doi.org/10.1201/9781420039900>
- Kleypas, J. A., Buddemeier, R. W., Archer, D., Gattuso, J.-P., Langdon, C., & Opdyke, B. N. (1999). Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science*, 284(5411), 118-120. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.284.5411.118>

- Marschner, H. (2011). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (H. Marschner & P. Marschner, Eds.). Elsevier Science.
- McPherson, B. J., & Sundquist, E. T. (Eds.). (2013). *Carbon Sequestration and Its Role in the Global Carbon Cycle*. Wiley. 10.1029/GM183
- Moreno Ramón, H., Ibáñez Asensio, S., & Gisbert Blanquer, J. M. (2012). *ROCAS SEDIMENTARIAS QUÍMICAS*. Riunet.
<https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/16579/rocas%20quimicas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- NASA Earth Observatory. (2011, June 16). *The Carbon Cycle*. NASA Earth Observatory. Retrieved June 26, 2024, from <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>
- Raus, R. A., Nasaruddin, R. R., & Wan Nawawi, W. M. F. (2020, Noviembre 5). *Alginate and alginate composites for biomedical applications*. ScienceDirect. Retrieved February 29, 2024, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1818087620306437>
- S., E., Murdock, C. R., Didas, S. A., & Jones, C. W. (2016, Agosto 25). *Direct Capture of CO₂ from Ambient Air*. ACS Publications. Retrieved February 29, 2024, from <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.6b00173>
- Schindler, D. W. (1988). Effects of Acid Rain on Freshwater Ecosystems. *Science*, 239(4836), 149-157. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.239.4836.149>
- Weil, R. R. (2016). (PDF) *The Nature and Properties of Soils. 15th edition*. ResearchGate. Retrieved June 27, 2024, from https://www.researchgate.net/publication/301200878_The_Nature_and_Properties_of_Soils_15th_edition
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*. Elsevier Science.
- Wilkin, D., & Brainerd, J. (2017). *The carbon cycle (article)* | *Ecology*. Khan Academy. Retrieved June 26, 2024, from <https://www.khanacademy.org/science/biology/ecology/biogeochemical-cycles/a/the-carbon-cycle>