

Sistema para la formación de arrecifes marinos artificiales y estructuras submarinas con recubrimiento calcáreo inducido por electrólisis

System for the Formation of Artificial Marine Reefs and Submarine Structures with Calcareous Coating Induced by Electrolysis

Carlos Antón¹, Alejandro Carmona², Miguel Ángel Climent^{3*}, Pedro Garcés⁴, Vicente Montiel⁵, Alfonso Ángel Ramos-Esplá⁶

Resumen

La degradación de los hábitats marinos puede deberse a factores tanto naturales como causados por la actividad humana. Para abordar este problema, se han desarrollado estructuras artificiales en el medio marino entre cuyas finalidades se encuentran la restauración del hábitat marino y la protección de las costas. Con este propósito, se han venido utilizando materiales de diferente naturaleza, desde materiales de desecho a materiales de construcción específicos. Sin embargo, el aumento del número de estas estructuras puede tener posibles impactos negativos sobre los hábitats marinos, lo que ha llevado al desarrollo de la “eco-ingeniería marina” para reducir los impactos ambientales y fomentar el uso de materiales más ecológicos.

En este trabajo se ha investigado el uso de estructuras carbonatadas fabricadas mediante electrólisis en el medio marino con el fin de desarrollar un sistema que sea respetuoso con el medio ambiente y no altere el ecosistema. Estas estructuras pueden tener aplicaciones en la biología marina, la remediación ambiental y la acuicultura.

El texto describe el proceso de fabricación de estas estructuras. Se presentan los resultados de ensayos de crecimiento del depósito calcáreo obtenido por electrólisis, mostrando la morfología y el espesor del recubrimiento en función del tiempo y la intensidad de corriente. Se destaca la flexibilidad del sistema en cuanto a la fabricación y ubicación de las estructuras, lo que permite construir sistemas modulares y de mayor tamaño según las necesidades. Además, se analiza su capacidad para incentivar la colonización de especies marinas con el objetivo de poder ser usados como elementos biofiltrantes.

Palabras clave: arrecifes artificiales, arrecifes electrolíticos, biofouling, eco-ingeniería marina.

Abstract

The degradation of marine habitats can be due to factors both natural and human-induced factors. To address this problem, artificial structures have been developed in the marine environment with the aim of restoring marine habitats and protecting coasts. For this purpose, materials of different nature have been used, ranging from waste materials to specific construction materials. However, the increasing number of these structures may have potential negative impacts on marine habitats, which has led to the development of “marine eco-engineering” to reduce environmental impacts and encourage the use of environmentally friendly materials.

In this work, the use of carbonated structures manufactured by electrolysis in the marine environment has been investigated in order to develop a system that is respectful with the environment and does not alter the ecosystem. These structures may have applications in marine biology, environmental remediation, and aquaculture.

The text describes the fabrication process of these structures. The results of growth tests of the calcareous deposit obtained by electrolysis are presented, showing the morphology and thickness of the coating as a function of time and current intensity. The flexibility of the system in terms of the fabrication and location of the structures is highlighted, allowing for the construction of modular and larger systems according to the needs. In addition, the ability of the calcareous deposit to encourage the colonization of marine species is analyzed with the aim of being used as biofiltering elements.

Keywords: Artificial reefs, electrolytic reefs, biofouling, marine eco-engineering.

* Autor de contacto: ma.climent@ua.es

¹ Doctor en Electroquímica, Ciencia y Tecnología por la Universidad Autónoma de Madrid (Investigador Contratado en el Departamento de Ciencias del Mar y Biología Aplicada de la Universidad de Alicante).

² Máster en Conservación de la Biodiversidad y Restauración del Medio Marino y Terrestre (Estudiante de Doctorado en el Departamento de Ciencias del Mar y Biología Aplicada de la Universidad de Alicante).

³ Doctor en Ciencias Químicas por la Universidad de Alicante (Catedrático de Universidad en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Alicante).

⁴ Doctor en Ciencias Químicas por la Universidad de Alicante (Catedrático de Universidad en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Alicante).

⁵ Doctor en Ciencias Químicas por la Universidad de Alicante (Catedrático de Universidad en el Departamento de Química Física e Instituto Universitario de Electroquímica de la Universidad de Alicante).

⁶ Doctor en Ciencias Biológicas por la Universidad de Barcelona (Catedrático de Universidad en el Departamento de Ciencias del Mar y Biología Aplicada y Centro de Investigación del Mar de Santa Pola (CIMAR) de la Universidad de Alicante).

1. INTRODUCCIÓN

La degradación de los hábitats marinos puede deberse a muchos factores, pudiéndose considerar, entre otros, las olas marinas de calor que hacen profundizar la termoclina estacional, la actividad pesquera ilegal, la degradación derivada de los desechos orgánicos de las jaulas de engorde de peces en las explotaciones industriales de acuicultura, la carga orgánica generada por los vertidos, aguas estancadas y aliviaderos, o la posible masificación de buceadores. Con el fin de minimizar este problema, surgen las estructuras artificiales ubicadas en medio marino (Firth *et al.*, 2016).

Dentro de este tipo de estructuras se encuentran los arrecifes artificiales que se colocan en el fondo marino para una amplia variedad de propósitos, entre ellos, la mejora de la pesca al proteger los fondos marinos, el buceo recreativo, la restauración de hábitats y la defensa de la costa (Lee *et al.*, 2018). En las últimas dos décadas, la investigación en arrecifes artificiales ha pasado de un enfoque pesquero a otro más centrado en la rehabilitación o restauración de ecosistemas marinos y mitigación de impactos (Bayraktarov *et al.*, 2020). En este periodo se está produciendo un cambio en los materiales utilizados (Baine, 2001), a partir de desechos o “materiales de oportunidad”, tales como neumáticos, vehículos de desguace, barcos, plataformas petrolíferas, etc.; a materiales de construcción *ad hoc* utilizados para determinados fines específicos (pesca, protección y rehabilitación de fondos, buceo, etc.), tales como hormigón, PVC, fibra de vidrio, hierro/acero y otros. De hecho, en la Comunidad Valenciana, se han desarrollado arrecifes artificiales de hormigón, principalmente como elementos disuasorios a la pesca de arrastre (Belda y Jover, 1992; Ramos-Esplá *et al.*, 2000), para proteger las praderas submarinas y los fondos de algas calcáreas.

Sin embargo, el aumento de este tipo de estructuras a nivel mundial ha incrementado la preocupación sobre sus posibles impactos negativos (Hunter, 2006), especialmente en lo relativo al uso de materiales inadecuados, elaborándose protocolos de actuación (Ministerio de Medio Ambiente, 2008; OSPAR, 2013; UNEP, 2019). A este respecto, se está desarrollando una tecnología emergente, denominada “eco-ingeniería marina” o “construcción marina verde” (Dafforn *et al.*, 2015), para reducir los impactos ambientales de las infraestructuras sumergidas y abogar por “materiales ecológicos” (Dennis *et al.*, 2018).

Entre los nuevos materiales utilizados se encuentran las estructuras carbonatadas por electrólisis sobre una matriz metálica, desarrolladas inicialmente por Hilbertz a finales de la década de los setenta (Hilbertz, 1979; Schuhmacher y Schillak, 1994; Siboni *et al.*, 2009). Dicho proceso de fabricación de estructuras submarinas por electrólisis ha sido utilizado en diversas zonas costeras del mundo para la restauración de arrecifes de coral en zonas degradadas (Goreau, 2012, 2014; Strömberg *et al.*, 2010). No obstante, hasta donde conocemos, no existen antecedentes de su uso en las costas españolas, ni como elementos de restauración de la biodiversidad ni como elementos biofiltrantes o de mitigación de impactos.

En la bibliografía se encuentran procedimientos patentados para la creación de arrecifes artificiales empleando la electrólisis en agua de mar, utilizando corriente continua,

pulsada o intermitente (Hilbertz y Goreau, 1996). En dicha propuesta, aunque no se describe detalladamente la naturaleza ni el diseño del sistema anódico, sí se indican los posibles problemas de acidificación del medio por la formación de ácido clorhídrico en la reacción electroquímica anódica. A ello habría que añadir la posibilidad de generar sustancias tóxicas como el cloro gas o la liberación de metales pesados en el caso de ciertos tipos de ánodos. Otro método patentado (Streichenberger, 1986) describe la posibilidad de utilizar un sistema de par galvánico para la obtención de un depósito calcáreo por electrólisis sobre un cátodo de hierro o acero, es decir aprovechar la creación de una pila electroquímica por contacto eléctrico entre dicho cátodo y un ánodo de un metal menos noble que el acero (aluminio, cinc o magnesio). Los posibles inconvenientes de este sistema serían la imposibilidad de control sobre los parámetros electroquímicos (intensidad de corriente y diferencia de potencial) y de nuevo la posibilidad de liberar iones de metales pesados en el caso de ciertos tipos de ánodo.

Por los motivos anteriormente expuestos, sería interesante desarrollar un sistema que permita la formación de estructuras carbonatadas que solucionen los problemas citados y sean respetuosos con el medio, tanto con el hábitat de las especies como con las especies mismas, para lo cual dicho sistema debería ser lo más inocuo posible y no alterar el ecosistema que se pretende restaurar.

El objetivo del proyecto de investigación en que se enmarca esta publicación es demostrar la viabilidad de un sistema de fabricación de estructuras metálicas recubiertas de capas calcáreas inducidas por electrólisis que combine las características de mínima alteración del medio marino, máxima flexibilidad y facilidad de las etapas de producción y fondeo de las estructuras y reducción de costes del proceso en su conjunto. En cuanto a la utilidad de dichas estructuras, una vez ubicadas en el medio marino y colonizadas por especies bentónicas filtradoras, pueden ser aplicadas a los campos de la biología y remediación marina. El sistema puede tener un impacto positivo en la mitigación de la contaminación orgánica tanto en los puertos comerciales como pesqueros y deportivos. Por otro lado, la fabricación de estructuras con capacidad de bio-filtración podría ser de utilidad en el sector de la acuicultura al contribuir a disminuir la carga orgánica asociada al engorde de peces (heces, alimento no consumido); y la fabricación de arrecifes de recreo favorecería la atracción de buceadores deportivos, lo que permitiría situar nuevas áreas de buceo, alejadas de zonas comprometidas medioambientalmente, desviando el interés hacia posibles parques subacuáticos y evitando zonas de elevado valor biológico.

En el presente trabajo se describen las características de las estructuras que se pueden obtener mediante el procedimiento detallado en un modelo de utilidad desarrollado por los autores (Antón *et al.*, 2021). En particular se presenta información novedosa sobre la naturaleza de los depósitos calcáreos obtenidos por electrólisis, sobre la velocidad de crecimiento del espesor de la capa de CaCO_3 , y sobre la capacidad de dichas superficies carbonatadas de incentivar la colonización superficial por parte de especies bentónicas sésiles en comparación con otros sustratos de referencia.

2. METODOLOGÍA

El procedimiento de fabricación de las estructuras por electrólisis en el medio marino ha sido descrito en detalle en un modelo de utilidad aprobado por la Oficina Española de Patentes y Marcas (Antón *et al.*, 2021). Mediante dicho proceso se obtienen estructuras ligeras basadas en un sustrato metálico recubierto por capas de material pétreo calcáreo o calco-magnesiano similares en su textura superficial (porosidad y rugosidad) y dureza a la roca caliza que puede encontrarse en el medio marino o al material excretado por los corales.

El dispositivo consiste en un cátodo de mallazo de acero, permitiendo el uso de cualquier malla disponible en el mercado, y en un ánodo metálico. Dichas unidades (cátodo y ánodo) conforman la célula electrolítica básica para la formación del depósito calcáreo sobre el cátodo. Tanto la forma y tamaño como las características geométricas del cátodo (por ejemplo, la luz de malla) pueden seleccionarse en función de las necesidades u objetivos de la estructura. El suministro de corriente continua puede ser por transformación de la red convencional, a partir de energía eléctrica acumulada en baterías o basada en energía solar (paneles fotovoltaicos). La electrólisis puede realizarse en condiciones galvanostáticas (intensidad de corriente constante) o potencioestáticas (potencial constante), con una duración que se puede modular en función del espesor de recubrimiento deseado (Antón *et al.*, 2021). Típicamente es posible obtener recubrimientos de 2 o 3 mm de espesor en tiempos de electrólisis de aproximadamente 2 meses, véase Sección 3. Es destacable que, durante el proceso de electrólisis, no se liberan al medio sustancias químicas tóxicas o peligrosas (Antón *et al.*, 2021).

Una de las características del sistema propuesto es la flexibilidad que permite en el proceso de fabricación y ubicación (fondeo) de los arrecifes electrolíticos. Estos pueden fabricarse tanto en agua de mar como en otros medios halinos (puertos, salinas, desaladoras, etc.), en entornos industriales controlados o en mar abierto. Mediante la agrupación y ensamblaje de estructuras sencillas, con la forma y tamaño adecuados, pueden construirse de forma modular estructuras más complejas y de mayor tamaño en función de las necesidades. Por ejemplo, pueden obtenerse sistemas de biofiltros (para la mitigación de la contaminación orgánica), estructuras destinadas a la restauración de la biodiversidad en ecosistemas marinos degradados (fijación de larvas y esporas), o arrecifes artificiales para la atracción del submarinismo recreativo (Antón *et al.*, 2021).

En la siguiente Sección se presentan los resultados de dos estudios encaminados a establecer las características físicas y composición química de los recubrimientos obtenidos por electrólisis, y la capacidad de dichos

recubrimientos de incentivar la colonización superficial por parte de especies bentónicas sésiles (naturaleza y abundancia de las especies reclutadas), en comparación con otros sustratos de referencia.

3. CARACTERÍSTICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS OBTENIDOS

Se llevaron a cabo ensayos de crecimiento del depósito calcáreo inducido por electrólisis durante 4 meses. Para ello se desarrollaron cuatro estructuras cilíndricas compuestas de ánodo y cátodo (figura 1A), tres conectadas a fuentes de alimentación con suministro directo de la red convencional (figura 1B) y una cuarta conectada directamente a un panel solar interponiendo un limitador de intensidad (figura 1C). Todas ellas fueron sumergidas en uno de los muelles del puerto de Alicante mediante grúas construidas *ad hoc* (figura 1D).

Para el desarrollo de los diferentes ensayos de fabricación, se aplicaron tres intensidades de corriente diferentes (0,4, 0,8 y 1,2 A). La intensidad correspondiente a “panel solar” se corresponde con uno de los ensayos realizados con la fuente de corriente continua (0,8 A) pero en este caso el paso de corriente es sólo durante las horas de luz, al haber conectado directamente al panel solar, sin interponer ningún acumulador de energía eléctrica.

En el transcurso de las fases de crecimiento se fue realizando un seguimiento de la naturaleza del depósito calcáreo (morfología, textura superficial y composición), en función del tiempo, para cada intensidad de corriente establecida. En la figura 2 se muestran dos ejemplos de morfología de los depósitos de carbonato obtenidos a distintas edades e intensidades, donde se puede apreciar una porosidad y rugosidad que recuerda a los depósitos excretados por los corales.

Durante los ensayos se realizaron medidas de espesor de recubrimiento en seis zonas diferentes de cada estructura carbonatada. Las medias de los espesores de recubrimiento registradas a lo largo de los ensayos (figura 3) muestran una tendencia lineal en el crecimiento de la pared calcárea, con coeficientes de correlación muy cercanos a la unidad.

De igual modo, cada mes, durante el tiempo de duración del ensayo se extrajo una muestra, mediante corte con sierra radial, de una zona de la estructura escogida al azar para ser analizada por difracción de Rayos X (figura 4), con el fin de estudiar si la naturaleza cristalina del depósito era parecida a la de un arrecife natural (tabla 1). La estructura cristalina de los arrecifes naturales es de tipo aragonito (Goreau, 1963).

De los datos de la tabla 1, se puede concluir que las especies mayoritarias son aragonito y calcita en todos los depósitos carbonatados.

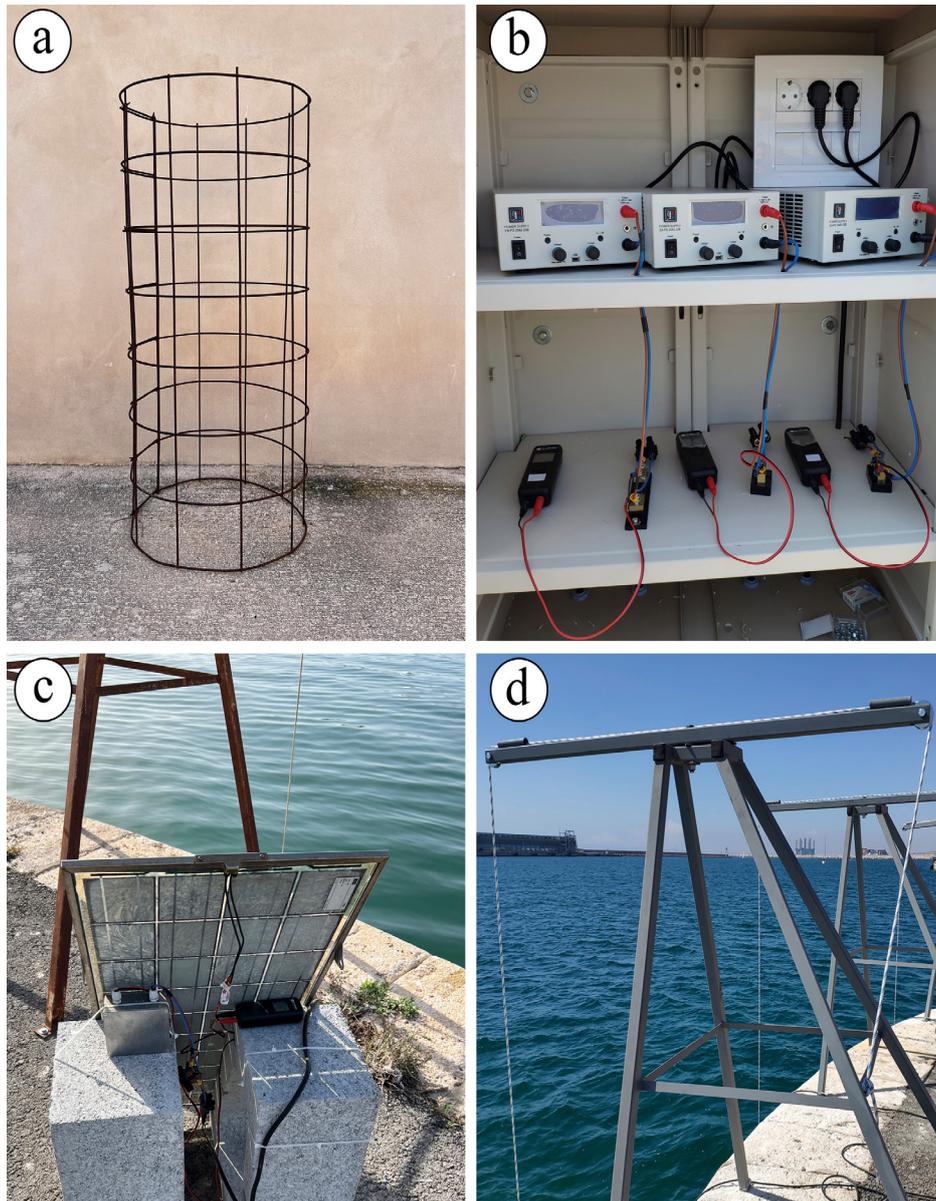


Figura 1. Elementos usados en la fabricación de estructuras carbonatadas: (A) cátodo cilíndrico de malla de acero electrosoldada; (B) instalación de las fuentes de alimentación y de los sistemas de adquisición de datos; (C) instalación del panel solar con sistema de anclaje Solarbloc® y sistema de adquisición de datos; (D) disposición de las grúas en uno de los muelles del puerto de Alicante con las estructuras sumergidas (Imágenes: Carlos Antón).



Figura 2. Detalle de la película de carbonato depositada sobre las estructuras de malla (cátodos). La figura A corresponde a una intensidad de 0,8 A y 60 días de paso de corriente. La figura B corresponde a 0,4 A y 100 días de paso de corriente (Imágenes: Carlos Antón).

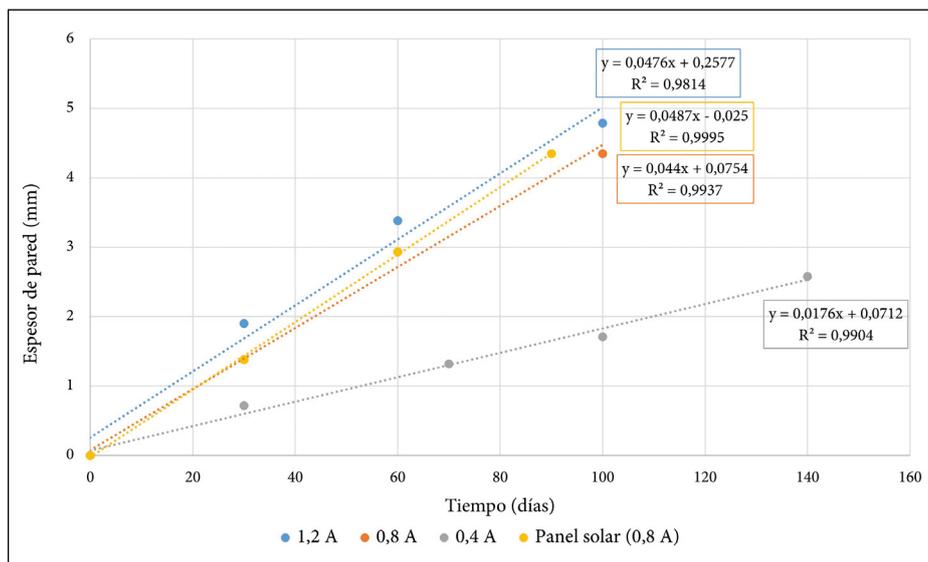


Figura 3. Evolución del crecimiento de la pared calcárea para varias intensidades de corriente.

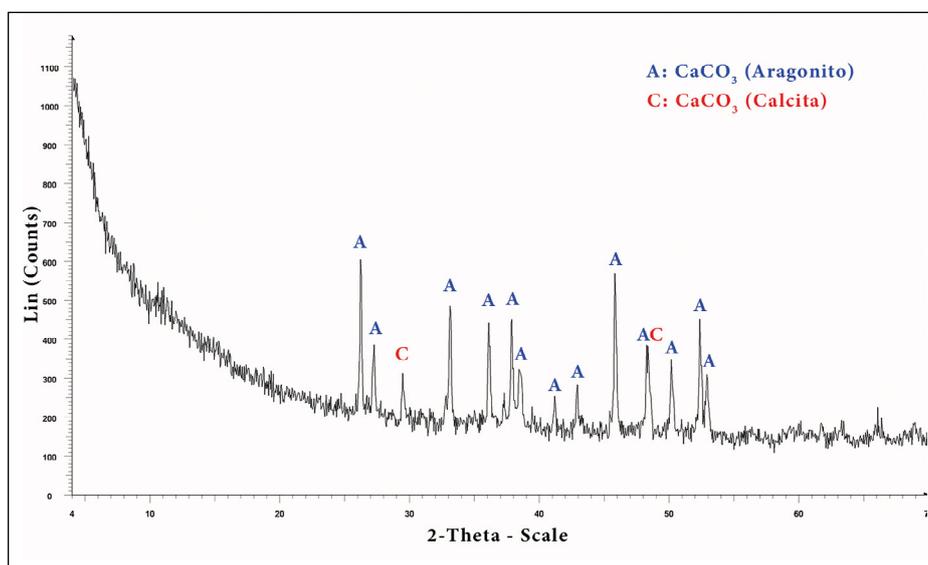


Figura 4. Difractograma de rayos X correspondiente a una muestra tomada de una estructura sometida a electrólisis con una intensidad de 0,8 A durante 60 días.

Tabla 1. Especies químicas detectables en los difractogramas de rayos X de los depósitos obtenidos por electrólisis

Intensidad (A)	Tiempo (días)	Especies químicas constituyentes del depósito				
		Aragonito (CaCO ₃)	Calcita (CaCO ₃)	Brucita (Mg(OH) ₂)	Dolomita (CaMg(CO ₃) ₂)	Dipingita (4MgCO ₃ ·Mg(OH) ₂ ·5H ₂ O)
1,2	30	X	X			
	60	X	X			
	100	X	X	X		
0,8	30	X	X			
	60	X	X			
	100	X	X			
0,4	70	X	X			
	100	X	X			
	140	X	X			
Panel solar (0,8 A)	31	X	X		X	X
	61	X	X			

4. CAPACIDAD DE FIJACIÓN DE ORGANISMOS BENTÓNICOS SÉSILES

Una segunda fase del trabajo consistió en analizar la capacidad de fijación de organismos bentónicos sésiles en las estructuras carbonatadas y compararla con estructuras desnudas (malla de acero sin carbonatar) durante 9 meses de sucesión ecológica y comprobar si existían diferencias significativas en el reclutamiento sobre el sustrato carbonatado y el sustrato de acero sin carbonatar.

Se llevó a cabo un muestreo estacional de las comunidades del biofouling portuario por medio de 24 mallas de hierro de 15 x 15 x 0.5 cm, de las cuales 12 presentaban una capa rugosa de CaCO₃ precipitado por electrólisis (figura 5), con la metodología expuesta anteriormente (empleando la intensidad de corriente de 0,8 A y tres meses de electrólisis), y 12 sin ella (control). Estas mallas se dispusieron en 3 soportes lineales, donde cada soporte contenía 8 mallas, colocadas de forma alterna.

Los soportes con las mallas se fondearon a 2 metros de profundidad, cada uno a 1.5 m de distancia del otro. Dicha profundidad fue constante debido al régimen micromareal del mar Mediterráneo, siendo su variación media inferior a 20 cm (Ibáñez *et al.*, 2000). El procedimiento de muestreo consistió en extraer dos mallas (una carbonatada y otra control) de cada uno de los 3 soportes, una vez cada tres meses, coincidiendo con las diferentes estaciones del año en el ambiente marino, con el fin de observar el reclutamiento y estructura de la comunidad a lo largo de la sucesión ecológica.

Tras la extracción de las mallas, éstas se sumergieron en cubetas con agua de mar (figura 6) y se transportaron al laboratorio. El estudio se llevó a cabo durante un periodo de 9 meses de inmersión, coincidente con las estaciones de otoño, invierno y primavera (etapas de reclutamiento, colonización y sucesión temprana).

Las mallas se dejaron almacenadas en agua de mar durante 24-48 horas aproximadamente, con el objetivo de reducir el estrés de los organismos previo a la fijación y como método de anestesia (por hipoxia). Transcurrido ese tiempo, se fijaron las muestras con formol al 10 % en agua de mar y se dejaron almacenadas un tiempo mínimo de 48 h hasta su identificación. Como paso previo a analizar las placas ya fijadas, se dejó la malla sumergida en agua dulce durante 24 h para eliminar los restos de formol. Posteriormente, cada una de las mallas fue fotografiada por ambas

caras para su posterior análisis de imagen; así como registrar la disposición general de los organismos en la placa para facilitar el análisis.

Finalmente, se raspó la placa, separando *de visu* los diferentes taxones y guardándolos en recipientes con etanol al 70 %. La identificación del macrobentos sésil ($\varnothing > 1\text{mm}$) se llevó a cabo mediante lupa binocular y microscopio óptico siempre intentando llegar al taxón más bajo posible (familia, género o especie). Una vez identificados los diferentes organismos, se actualizaron los nombres científicos mediante la base de datos World Register of Marine Species (WoRMS: www.marinespecies.org).

Los mayores índices de riqueza específica y diversidad se han dado en el sustrato carbonatado, y estos son mayores a medida que aumenta el periodo de inmersión (figura 7). Ello coincide con los resultados de otros estudios que utilizan sustratos similares al sustrato carbonatado (cemento, hormigón, roca natural) en los que se obtienen mayores índices de diversidad con respecto a otros materiales artificiales como el acero (Albano y Obenat, 2018; Brown, 2005; Ushiamo *et al.*, 2016). Además, se ha observado por otros investigadores (Albano y Obenat, 2018; Neves *et al.*, 2007) que el sustrato de tipo calcáreo presenta una mayor abundancia de organismos como se desprende también del presente estudio.

El hecho de obtener mayores índices de riqueza específica y abundancia indica una comunidad más estructurada y desarrollada, ya que estas diferencias son significativas desde los 3 meses de inmersión y se mantienen durante, al menos, 9 meses. Esto ocurre también con otros sustratos metálicos como el acero donde se ha comprobado que su tasa de reclutamiento es más baja que el cemento (Ushiamo *et al.*, 2016). Además, se observa que el sustrato carbonatado parece presentar una comunidad más estable, ya que, incluso en el periodo que coincide con los meses de invierno (6 meses) en el que las tasas de reclutamiento y abundancia del biofouling son menores (Dziubińska y Janas, 2007; Floerl *et al.*, 2010), mantiene sus valores estables y no se reducen tal y como ocurre en el sustrato metálico control.

Es importante señalar que todo el sustrato carbonatado ha sido colonizado desde el primer periodo; mientras que no ha sido así en el control, como ocurre en otros materiales artificiales (Lezzi *et al.*, 2018; Lezzi y Giangrande, 2018). Al respecto, la dispersión encontrada en el caso del sustrato de acero (control) es mayor que en el carbonatado, en concordancia con resultados de otros autores (Brown, 2005;

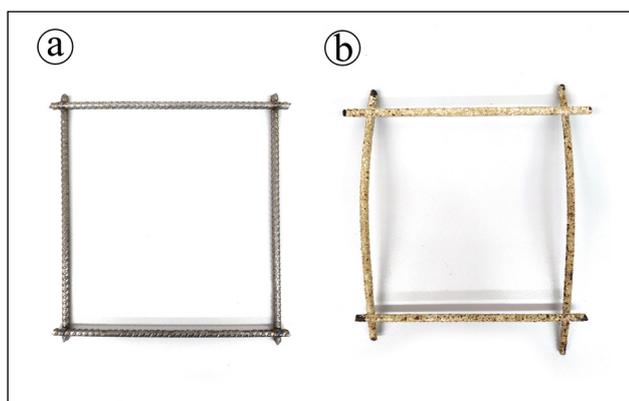


Figura 5. Mallas empleadas para el estudio de biofouling, a la izquierda malla control sin carbonatar, a la derecha malla carbonatada (Imágenes: Carlos Antón).



Figura 6. Extracción y almacenamiento en agua de mar de las mallas de reclutamiento de *biofouling* situadas en el puerto de Alicante (Imagen: Carlos Antón).

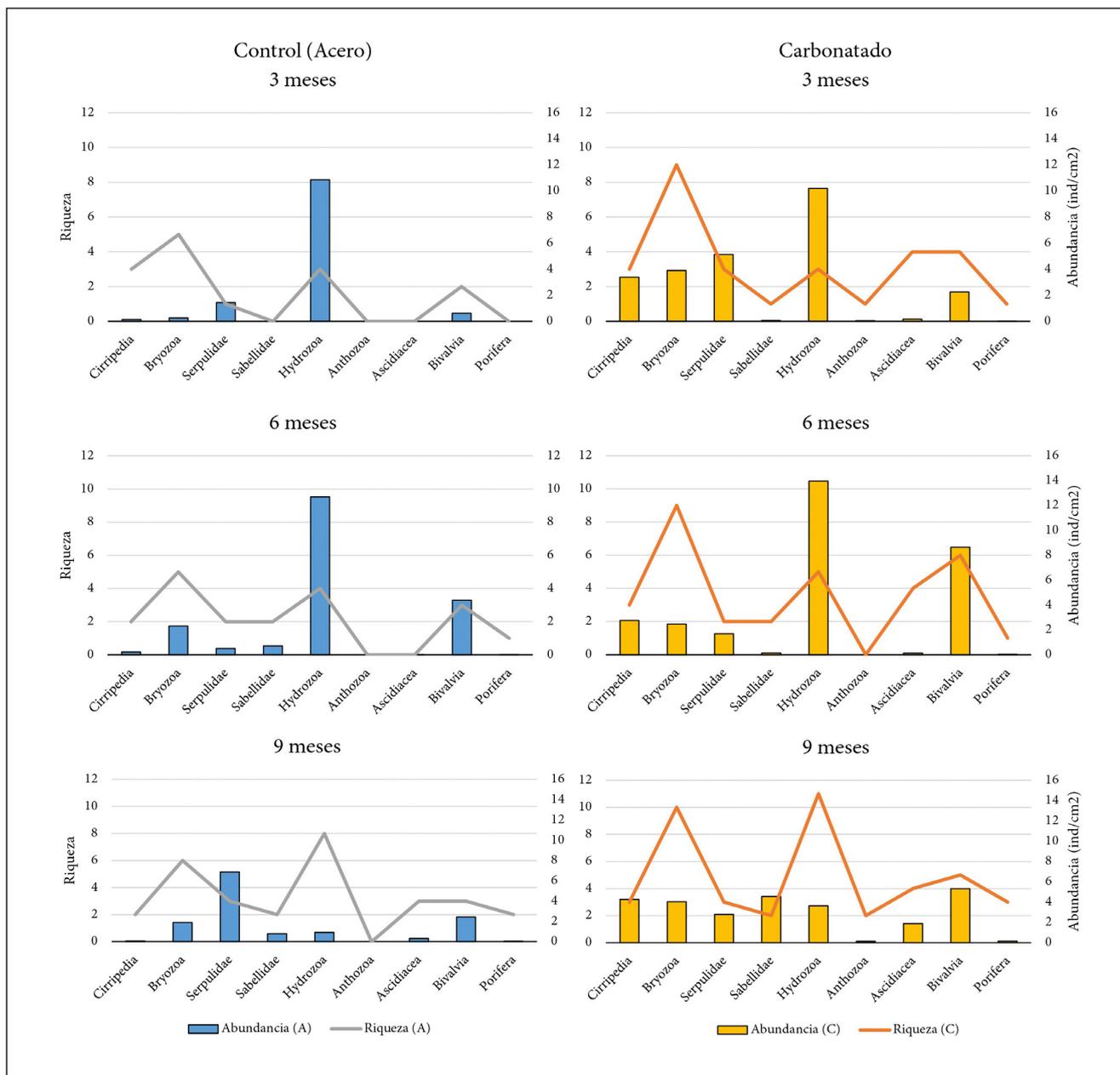


Figura 7. Representación gráfica de la riqueza específica y la abundancia (individuos/cm²) por taxón en cada época y para cada sustrato (control y carbonatado).

Ushiyama *et al.*, 2016). El haber encontrado diferencias entre los poblamientos de ambos sustratos coincide con otros autores en que el sustrato es condicionante (Sempere-Valverde *et al.*, 2018).

Respecto a las especies filtradoras, clave en el empleo de los arrecifes electrolíticos como biofiltros, se ha visto que presentan mayores abundancias en el sustrato carbonatado, lo que indica una mayor preferencia. Además, se observa una tendencia a aumentar a los 6 meses de inmersión (invierno), donde se ha producido una elevada abundancia de mejillones (*Mytilus galloprovincialis*), importante filtrador. No obstante, otras especies con una alta tasa de filtración como las ascidias (p.e. *Styela plicata*) (Draughon *et al.*, 2010; Fiala-Médioni, 1978; Stuart y Klumpp, 1984) han presentado mayores abundancias al cabo de 9 meses (primavera). Por ello, en caso de utilizar este material como sustrato para biofiltros, habría que tener en cuenta qué tipo de organismos interesa más reclutar (por ejemplo, mitilidos o ascidias).

Debido a ello, este material carbonatado resulta ser de gran interés a la hora de construir nuevos arrecifes artificiales, y que, como se ha expuesto anteriormente, el hecho de utilizar mallazos de hierro permite un manejo más fácil, mayor maleabilidad y reducir significativamente el peso, comparándolo con los bloques de hormigón que se usan normalmente (Baine, 2001; Bohnsack y Sutherland, 1985; Burt *et al.*, 2009). Además, debido a la elevada superficie para la fijación de larvas, estos arrecifes artificiales tendrían una gran potencialidad, ya que no solo podrían usarse para restauración de hábitats marinos, sino también como biofiltros (Van Treec y Schuhmacher, 1999).

5. COMPONENTE INNOVADORA Y POSIBLES IMPACTOS DE LA PROPUESTA

El sistema propuesto de fabricación de arrecifes artificiales por electrólisis en un medio salino (Antón *et al.*, 2021) presenta una componente innovadora que

puede resumirse en las siguientes características diferenciales:

- Los arrecifes artificiales pueden fabricarse *in situ* en el lugar de su ubicación definitiva, o bien pueden ser fabricados en ambientes más controlados, tales como piscinas, zonas portuarias, salinas o recintos industriales. Esto último facilita un control más exhaustivo de su proceso de fabricación.
- La corriente continua necesaria para el proceso puede obtenerse mediante fuentes de corriente (transformación de la energía de la red eléctrica), a partir de sistemas de acumulación de energía, o bien empleando energía fotovoltaica, siendo esta variante la más interesante para fabricación *in situ*.
- Durante el proceso de electrólisis no se libera en el medio marino ninguna sustancia química tóxica o peligrosa. Tampoco se introduce ningún elemento extraño en el medio, salvo el sustrato metálico, que finalmente queda recubierto por una capa pétreo que, al estar constituida fundamentalmente por carbonato de calcio (CaCO_3) e hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), es muy similar a la roca caliza que puede encontrarse en fondos marinos o al material excretado por los corales.
- Los daños que se puedan ocasionar en los recubrimientos calcáreos de los arrecifes pueden repararse reanudando el proceso de electrólisis.
- Existe una gran flexibilidad en cuanto a las formas y dimensiones de las estructuras obtenidas (tamaño, formas geométricas, luz del mallado). Todas estas características pueden ser establecidas en función de los objetivos de los arrecifes a fabricar: biofiltros, remediación de la biodiversidad, estructuras de atracción del buceo deportivo.
- Es posible construir estructuras más complejas y de grandes dimensiones por ensamblaje modular en el lugar de fondeo de unidades básicas, fáciles de transportar y almacenar, con posibilidad de unión entre ellas, formando agrupaciones o apilamientos diseñados para fines específicos. La figura 8 muestra ejemplos de unidades básicas carbonatadas, con posibilidad de apilamiento mediante uniones sencillas (cubos y cilindros, figuras 8A y 8B); y modelos de estructuras ‘orgánicas’, obtenidas mediante el ensamblaje de unidades más sencillas carbonatadas por separado (figura 8C). Es preciso considerar la necesidad de fijación al fondo marino dado que se trata de estructuras ligeras que podrían ser arrastradas por las corrientes, o debido a otras circunstancias tales como las operaciones ligadas a la pesca de arrastre, y perderse en el mar.
- La relación superficie/volumen de las estructuras es muy elevada (debido a la naturaleza del sustrato metálico), lo que implica una mayor superficie de fijación para el biofouling.
- La relación peso/volumen de las estructuras es muy baja, hecho que se traduce en una simplificación y reducción de costes de los procesos de transporte y fondeo.
- Tanto durante la fase de electrólisis como durante la fase de desarrollo de la colonización por especies bentónicas sésiles (especies calcáreas) se contribuye al secuestro de CO_2 , reduciendo la huella de carbono.

- Las estructuras carbonatadas por electrólisis presentan una mejora de la atracción y capacidad de fijación de las larvas de organismos bentónicos sésiles respecto a otros tipos de arrecifes artificiales (no electrolíticos).

La utilización de esta tecnología para fabricación de estructuras submarinas con recubrimiento calcáreo inducido por electrólisis podría generar unos impactos positivos tanto en el sector logístico-portuario como en otros ámbitos industriales, tanto a nivel económico como social:

a) Impacto económico:

- Frente a otros arrecifes de restauración de los hábitats marinos, la relación coste/beneficio es menor, al tratarse de estructuras más ligeras (no de hormigón) fácilmente transportables en tierra y en mar, y cuyo fondeo no es complicado. Estas últimas actuaciones (transporte y fondeo) son las que más encarecen los proyectos (Ramos-Esplá *et al.*, 2000).
- Las unidades básicas modulares pueden ser fácilmente ensambladas generando arrecifes más complejos, en función del volumen deseado, ello minimiza los costes de construcción y transporte.
- Posibilidad de depósito *in situ* del carbonato mediante la utilización de energía fotovoltaica, que permite reducir costes e, incluso, incorporar esta tecnología donde no haya posibilidad de suministro eléctrico convencional. Además, puede incidir en el mercado de las energías limpias.
- Desarrollo de nuevas líneas de actuación dentro de la eco-ingeniería marina y “construcción marina verde”, con la posibilidad de creación de empresas y empleos.
- Mejora de la Responsabilidad Social Corporativa de entidades tales como puertos o empresas por la instalación y uso de estos dispositivos, que puede redundar en un aumento de la actividad económica de la empresa.

b) Impacto social:

- Estructuras con materiales no contaminantes (acero y carbonato cálcico del agua de mar), frente a otras (caso de arrecifes de “ocasión” y de hormigón).
- Mitigación de impactos con la disminución de la carga contaminante orgánica (jaulas de engorde de peces, emisarios submarinos) al ser reutilizada por los invertebrados bentónicos filtradores.
- Rehabilitación de hábitats degradados mediante la utilización de estructuras carbonatadas que son colonizadas por la flora y fauna de los hábitats circundantes, permitiendo el aumento de la biodiversidad y los recursos vivos.
- Creación de zonas de atracción del buceo deportivo en zonas protegidas (áreas de amortiguación), disminuyendo el impacto por erosión en los hábitats naturales.
- Fácilmente aceptables por la sociedad ya que, aparte de no contaminar y disminuir la carga orgánica, esta tecnología contribuye a bloquear carbono

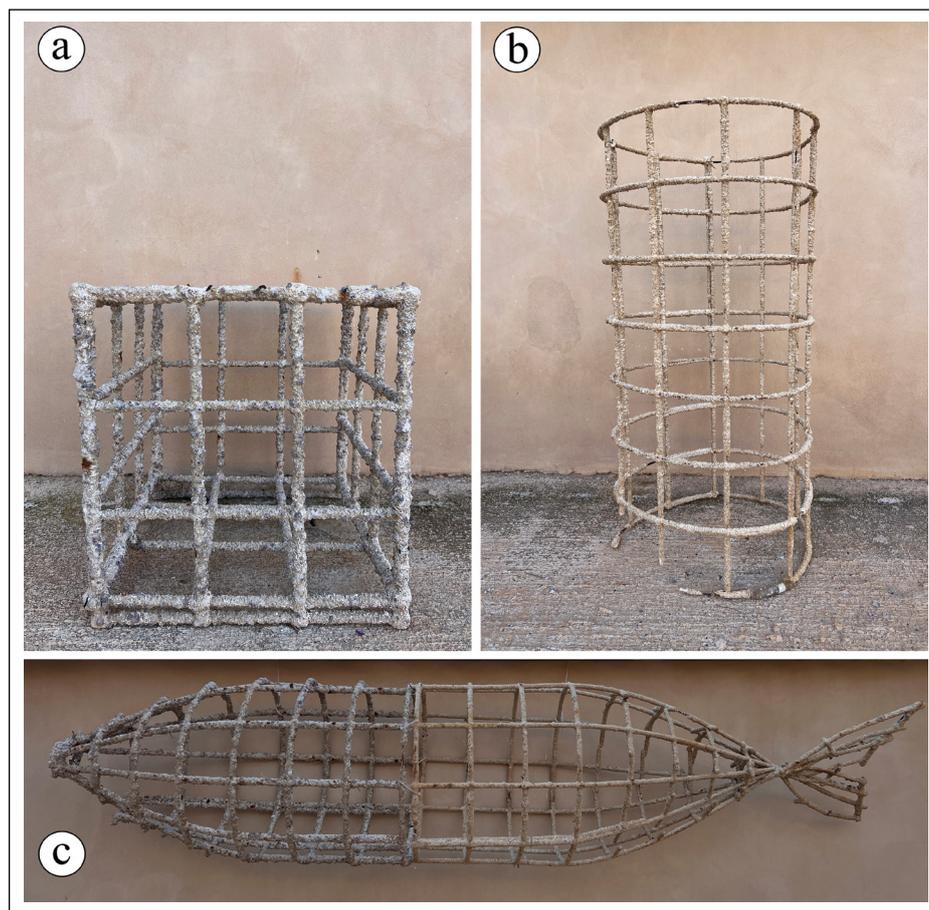


Figura 8. Ejemplos de estructuras carbonatadas: (A) cubo; (B) cilindro; (C) 'pez' (Imágenes: Carlos Antón).

al depositarlo en capas carbonatadas y en estructuras calcáreas de invertebrados bentónicos (antozoos, serpúlidos, cirrípedos, bivalvos, briozoos). Además de la posibilidad de utilizar energías renovables (fotovoltaica).

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo agradecen expresamente la financiación pública recibida a través del Fondo "Ports 4.0" de Puertos del Estado (Idea 2.24 correspondiente a la convocatoria de 2021). De la misma manera se agradece la inestimable colaboración de la Autoridad Portuaria de Alicante, materializada en la cesión temporal de uso de espacios y el apoyo recibido por parte de su personal, así como la brindada por la empresa Pretensados Durán, S.L. (Badajoz, España) por la donación de unidades del sistema Solarbloc® de anclaje de paneles solares.

7. REFERENCIAS

- Albano, M.J., y Obenat, S.M. (2018). Fouling assemblages of native, non-indigenous and cryptogenic species on artificial structures, depths and temporal variation. *Journal of Sea Research*, Vol. 144, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2018.10.002>
- Antón, C., Carmona-Rodríguez, A., Climent, M.Á., Garcés, P., Montiel, V., y Ramos-Esplá, A.Á. (2021). *Sistema para la formación de arrecifes marinos artificiales y estructuras submarinas con recubrimiento calcáreo inducido por electrólisis* (Patent nº 1278154). Oficina Española de Patentes y Marcas (Ministerio de Industria, Comercio y Turismo/Gobierno de España).
- Baine, M. (2001). Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance. *Ocean & Coastal Management*, 44(3-4): pp. 241-259. [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(01\)00048-5](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(01)00048-5)
- Bayraktarov, E., Brisbane, S., Hagger, V., Smith, C.S., Wilson, K.A., Lovelock, C.E., Gillies, C., Steven, A.D.L., y Saunders, M.I. (2020). Priorities and motivations of marine coastal restoration research. *Frontiers in Marine Science*, Vol. 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00484>
- Belda, L., y Jover, M. (1992). *Los arrecifes artificiales de la Comunidad Valenciana*. Valencia: Consellería de Agricultura y Pesca (Generalitat Valenciana).
- Bohnsack, J.A., y Sutherland, D.L. (1985). Artificial Reef Research: A Review with Recommendations for Future Priorities. *Bulletin of Marine Science*, 37(1): pp. 11-39.
- Brown, C.J. (2005). Epifaunal colonization of the Loch Linnhe artificial reef: Influence of substratum on epifaunal assemblage structure. *Biofouling*, 21(2): pp. 73-85. <https://doi.org/10.1080/08927010512331344197>
- Burt, J., Bartholomew, A., Bauman, A., Saif, A., y Sale, P.F. (2009). Coral recruitment and early benthic community development on several materials used in the construction of artificial reefs and breakwaters. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 373(1): pp. 72-78. <https://doi.org/10.1016/J.JEMBE.2009.03.009>
- Dafforn, K., Glasby, T., Airolidi, L., Rivero, N.K., Mayer-Pinto, M., y Johnston, E.L. (2015). Marine urbanization: An ecological framework for designing multifunctional artificial structures. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(2): pp. 82-90. <https://doi.org/10.1890/140050>
- Dennis, H.D., Evans, A.J., Banner, A.J., y Moore, P.J. (2018). Reefcrete: Reducing the environmental footprint of concrete.

tes for eco-engineering marine structures. *Ecological Engineering*, Vol. 120, pp. 668-678. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2017.05.031>

Draughon, L.D., Scarpa, J., y Hartmann, J.X. (2010). Are filtration rates for the rough tunicate *Styela plicata* independent of weight or size? *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 45(2): pp. 168-176. <https://doi.org/10.1080/10934520903429816>

Dziubińska, A., y Janas, U. (2007). Submerged objects - A nice place to live and develop. Succession of fouling communities in the Gulf of Gdańsk, Southern Baltic. *Oceanological and Hydrobiological Studies - OCEANOL HYDROBIOL STUD*, 36(4): pp. 65-78. <https://doi.org/10.2478/v10009-007-0026-1>

Fiala-Médioni, A. (1978). Filter-feeding ethology of benthic invertebrates (ascidians). IV. Pumping rate, filtration rate, filtration efficiency. *Marine Biology*, 48(3): pp. 243-249. <https://doi.org/10.1007/BF00397151>

Firth, L., Knights, A.M., Bridger, D., Evans, A.J., Mieszkowska, N., Moore, P.J., O'Connor, N.E., Sheehan, E.V., Thompson, R.C., y Hawkins, S.J. (2016). Ocean sprawl: challenges and opportunities for biodiversity management in a changing world. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, Vol. 54, pp. 189-262.

Floorl, O., Wilkens, S., Woods, C., e Inglis, G. (2010). Temporal Development of Biofouling Assemblages. Christchurch (Nueva Zelanda): Department of Agriculture, Fisheries and Forestry. *Department of Agriculture, Fisheries and Forestry*. <https://www.agriculture.gov.au/sites/default/files/sitecollectiondocuments/temporal-development-biofouling-assemblages.pdf>

Goreau, T.F. (1963). Calcium carbonate deposition by coralline algae and corals in relation to their roles as reef-builders. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 109(1): pp. 127-167. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1963.tb13465.x>

Goreau, T.J. (2012). Marine electrolysis for building materials and environmental restoration. En V. Linkov y J. Kleperis (Eds.), *Electrolysis* (cap. 13). Rijeka: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/48783>

Goreau, T.J. (2014). Electrical stimulation greatly increases settlement, growth, survival, and stress resistance of marine organisms. *Natural Resources*, 5(10): pp. 527-537. <https://doi.org/10.4236/nr.2014.510048>

Hilbertz, W.H. (1979). Electrodeposition of minerals in sea water: Experiments and applications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 4(3): pp. 94-113. <https://doi.org/10.1109/JOE.1979.1145428>

Hilbertz, W.H., y Goreau, T.J. (1996). *Method of enhancing the growth of aquatic organisms, and structures created thereby* (U.S. Patent n° 5543034A). U.S. Patent and Trademark Office.

Hunter, W. (2006). Artificial reefs: a review and critical perspective. *The Glasgow Naturalist*, 24(4): pp. 39-47. <https://www.biodiversitylibrary.org/part/236804>

Ibáñez, C., Curco, A., Day, J.W., y Prat, N. (2002). Structure and Productivity of Microtidal Mediterranean Coastal Marshes. En M.P. Weinstein y D.A. Kreeger (Eds.), *Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology* (pp. 107-136). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/0-306-47534-0_7

Lee, M.O., Otake, S., y Kim, J.K. (2018). Transition of artificial reefs (ARs) research and its prospects. *Ocean & Coastal Management*, 154, pp. 55-65. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2018.01.010>

Lezzi, M., Del Pasqua, M., Pierri, C., y Giangrande, A. (2018). Seasonal non-indigenous species succession in a marine macrofouling invertebrate community. *Biological Invasions*, 20(4): pp. 937-961. <https://doi.org/10.1007/s10530-017-1601-3>

Lezzi, M., y Giangrande, A. (2018). Seasonal and bathymetric effects on macrofouling invertebrates' primary succession in a mediterranean non-indigenous species hotspot area. *Mediterranean Marine Science*, 19(3): pp. 572-588. <https://doi.org/10.12681/mms.14786>

Ministerio de Medio Ambiente (2008). *Guía metodológica para la instalación de arrecifes artificiales* (Actualmente en proceso de revisión). Madrid: Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente.

Neves, C.S., Rocha, R.M., Pitombo, F.B., y Roper, J.J. (2007). Use of artificial substrata by introduced and cryptogenic marine species in Paranaguá Bay, southern Brazil. *Biofouling*, 23(5): pp. 319-330. <https://doi.org/10.1080/08927010701399174>

OSPAR (2013). *Guidelines on Artificial Reefs in Relation to Living Marine Resources*. OSPAR Commission Agreement 2013-03 (Reference number: 2012-3).

Ramos-Esplá, A.A., Guillén, J.E., Bayle, J.T., y Sánchez-Jérez, P. (2000). Artificial anti-trawling reefs off Alicante, South-Eastern Iberian Peninsula: Evolution of reef block and set designs. En A.C. Jensen, K.J. Collins, y A.P.M. Lockwood (Eds.), *Artificial Reefs in European Seas* (pp. 195-218). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4215-1_12

Schuhmacher, H., y Schillak, L. (1994). Integrated electrochemical and biogenic deposition of hard material—A nature-like colonization substrate. *Bulletin of Marine Science*, 55(2-3): pp. 672-679.

Sempere-Valverde, J., Ostalé-Valriberas, E., Farfán, G.M., y Espinosa, F. (2018). Substratum type affects recruitment and development of marine assemblages over artificial substrata: A case study in the Alboran Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 204, pp. 56-65. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.02.017>

Siboni, N., Martínez, S., Abelson, A., Sivan, A., y Kushmaro, A. (2009). Conditioning film and initial biofilm formation on electrochemical CaCO₃ deposition on a metallic net in the marine environment. *Biofouling*, 25(7): pp. 675-683. <https://doi.org/10.1080/08927010903097204>

Streichenberger, A.O. (1986). *Process for Orienting and Accelerating the Formation of Concretions in a Marine Environment* (U.S. Patent n° 4623433). U.S. Patent and Trademark Office.

Strömberg, S.M., Lundälvi, T., y Goreau, T.J. (2010). Suitability of mineral accretion as a rehabilitation method for cold-water coral reefs. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 395(1-2): pp. 153-161. <https://doi.org/10.1016/J.JEMBE.2010.08.028>

Stuart, V., y Klumpp, D.W. (1984). Evidence for food-resource partitioning by kelp-bed filter feeders. *Marine Ecology - Progress Series*, 16(1): pp. 27-37.

United Nations Environment Programme (UNEP) (2019). *Updated Guidelines Regulating the Placement of Artificial Reefs at Sea*.

Ushiyama, S., Smith, J.A., Suthers, I.M., Lowry, M., y Johnston, E.L. (2016). The effects of substratum material and surface orientation on the developing epibenthic community on a designed artificial reef. *Biofouling*, 32(9): pp. 1049-1060. <https://doi.org/10.1080/08927014.2016.1224860>

Van Treeck, P., y Schuhmacher, H. (1999). Artificial Reefs Created by Electrolysis and Coral Transplantation: An Approach Ensuring the Compatibility of Environmental Protection and Diving Tourism. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49(Supplement 1): pp. 75-81. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(99\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(99)80011-0)