



Carbono inmovilizado en las valvas provenientes de cultivos industriales de *Argopecten purpuratus* en el Perú y su potencial en el mercado de carbono

Romulo Loayza Aguilar^{1,*} , Raúl Valencia Cruz² , Gustavo Valencia Cruz³

(1) Escuela de Biología en Acuicultura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional del Santa. Av. Universitaria, s/n, Urb. Bella Mar. Nuevo Chimbote, Perú.

(2) Nemo Corporation SAC. Mz N' Lote 4, Urbanización Miraflores. Piura, Perú.

(3) Maricultura del Norte SAC. Piura, Perú.

* Autor de correspondencia: R. Loayza [rloayza@uns.edu.pe]

> Recibido el 27 de septiembre de 2022 - Aceptado el 29 de abril de 2023

Como citar: Loayza Aguilar, R.E., Valencia Cruz, R., Valencia Cruz, G. 2023. Carbono inmovilizado en las valvas provenientes de cultivos industriales de *Argopecten purpuratus* en el Perú y su potencial en el mercado de carbono. *Ecosistemas* 32(2): 2461. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2461>

Carbono inmovilizado en las valvas provenientes de cultivos industriales de *Argopecten purpuratus* en el Perú y su potencial en el mercado de carbono

Resumen: En el Perú el cultivo industrial de *Argopecten purpuratus* genera importantes cantidades de valvas, consideradas como un residuo; sin embargo, son estructuras que para su desarrollo inmovilizan el carbono presente en el agua, contribuyendo a la mitigación del cambio climático. En este sentido, a fin de cuantificar la cantidad de carbono que secuestran las valvas de *A. purpuratus* en cultivo, y analizar su potencialidad en el mercado de los bonos de carbono, se obtuvieron muestras de organismos vivos y valvas vacías, procedentes de los cultivos en Piura y Ancash, y se ha revisado información documental de la producción en el país desde 1996. Para determinar la cantidad de carbono en las valvas, se aplicó el método termogravimétrico, y luego se ha hecho una proyección de inmovilización de carbono al 2030. Se calcula que en el periodo 2010-2020, la inmovilización de carbono por las valvas del cultivo en el país, fue de unas 10 000 t de CO₂ año⁻¹, o 2730.79 tC inmovilizado año⁻¹, estimándose que en el año 2030 la producción de *A. purpuratus* sea de 117 299.43 t, y que en el periodo 2021-2030, ser habría secuestrado 198 182.45 tCO_{2e} o inmovilizado 54 119.40 tC. Esta información permitiría al Perú considerar la posibilidad de incursionar en el Mercado Voluntario de Carbono.

Palabras clave: cambio climático; mercado voluntario de carbono; secuestro de carbón; sumidero de carbón

Carbon immobilised in the shells of industrially farmed *Argopecten purpuratus* in Peru and its potential in the carbon market

Abstract: In Peru, the industrial cultivation of *Argopecten purpuratus* generates significant amounts of shells, considered as waste; however, they are structures that for their development sequester the carbon present in the water, contributing to the mitigation of climate change. In this sense, in order to quantify the amount of carbon sequestered by the *A. purpuratus* valves in culture, and to analyze their potential in the carbon bonds market, samples of living organisms and empty valves were obtained from the cultures. In Piura and Ancash, and documentary information on production in the country since 1996 has been reviewed. To determine the amount of carbon in the shells, the thermogravimetric method was applied, and then a projection of carbon sequestration to 2030 has been made. It is estimated that in the period 2010-2020, the sequestration of carbon by the shells of the crop in the country was about 10 000 t of CO₂ year⁻¹, or 2730.79 tC immobilized year⁻¹, estimating that in the year 2030 the production of *A. purpuratus* is 117 299.43 t, and that in the period 2021-2030, 198,182.45 tCO_{2e} would have been sequestered or immobilized 54,119.40 tC. This information would allow Peru to consider the possibility of entering the Voluntary Carbon Market.

Keywords: climate change; voluntary carbon market; carbon sequestration; coal sump

Introducción

La mayor preocupación actual sobre el clima mundial, se centra en el calentamiento de la atmósfera de la Tierra, debido al inequívoco incremento antropogénico de los gases de efecto invernadero (GEI), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), desde la época preindustrial (Canadell et al. 2021). Este incremento, compromete la temperatura de los ecosistemas, la criosfera, el incremento del nivel medio del mar y la acidificación de océanos, la disponibilidad de nutrientes, la productividad primaria, la biodiversidad, la expansión de enfermedades, la provisión de

bienes y servicios ecosistémicos, y la producción de alimentos para la humanidad (Naciones Unidas (NU) 1992; Mendo et al. 2020; Bezner et al. 2022; Caretta et al. 2022; Cooley et al. 2022; Parmesan et al. 2022). Contribuyen con el incremento de los GEI, los gases sintéticos, como hexafluoruro de azufre (SF₆), hidrofluorocarbonos (HFC's), perfluorocarbonos (PFC's) (NU 1998). De todos los GEI, el CO₂ es el más importante, ya que es la causa de aproximadamente el 60 % del total del calentamiento (Rodríguez-Sánchez y Calva-Vásquez 2013). La concentración de este gas entre 1970-2004 paso de 21 a 30 Gt (IPCC 2007), alcanzando un máximo de 52.4 ± 5.2 GtCO₂ en 2019 (UNEP 2020).

Con el propósito de frenar mayores emisiones de GEI a la atmósfera, en 1992 se creó la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) (NU 1992), y en su tercera Conferencia, en 1997 en Kioto (Japón), se incorporó el Protocolo de Kioto, comprometiéndose a los países desarrollados y con economías en transición a una economía de mercado (Anexos I y II de la Convención), a reducir las emisiones de GEI, en promedio 5.2 % con respecto a 1990, entre los años 2008-2012 (GLOBE Advisors 2012). En 2012 se extendió la aplicación de este Protocolo a una segunda fase 2013-2020, estableciendo compromisos vinculantes de todas las Partes para conservar y mejorar los sumideros y depósitos de GEI, y evitar que la temperatura mundial en este siglo sobrepase los 2 °C respecto del nivel preindustrial, y si fuera posible no más de 1.5 °C (NU 2015).

Para el logro del Protocolo de Kioto se crearon tres mecanismos de mercado: comercio de emisiones, implementación conjunta, y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), siendo los dos primeros aplicables para países del Anexo I y II, en tanto que el MDL, permite que los países incluidos en estos Anexos, con obligación cuantificable de reducción de emisiones GEI, puedan adquirirlas de proyectos ejecutados en países en desarrollo, orientados a mitigar las emisiones o incrementar la absorción antropogénica por sumideros en cualquier sector de la economía (NU 1998). En estos proyectos, una tonelada de CO₂ equivalente (tCO₂e) que se deja de emitir a la atmósfera o se remueve, equivale a un certificado de emisiones reducidas (CERs), el que puede ser canjeable, vendido o comprado en el mercado de bonos de carbono (Mayorca et al. 2018, datos sin publicar).

Paralelamente al mercado obligatorio de créditos de carbono, surge el Mercado Voluntario de Carbono (MVC), de naturaleza facultativa, que no representa obligación alguna para sus participantes, originado principalmente en proyectos de reducción de emisiones, conocidas como Reducciones de Emisiones Verificadas (VER) o simplemente compensaciones de carbono (GLOBE Advisors 2012); por ejemplo, en el año 2014 el centro comercial Open Plaza Ucayali (Perú), como estrategia para ingresar al mercado de la ciudad de Pucallpa, compró 8 mil certificados de bonos de carbono en el MVC del proyecto REDD+ del Parque Nacional Cordillera Azul (Mayorca et al. 2018, datos sin publicar). En este mismo país, el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP), desarrolla 3 proyectos de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD+) comprometiendo cuatro áreas naturales protegidas: Parque Nacional Cordillera Azul, Bosque de Protección Alto Mayo, Reserva Nacional Tambopata y Parque Nacional Bahuaja Sonene (Larson et al. 2012), con ventajas singulares: conservación de 2.07 millones de hectáreas de bosques y reducción de 25.48 millones de tCO₂e en 10 años, habiéndose comercializado más de 14 millones de dólares de créditos de carbono (Sullivan et al. 2022).

Aun cuando existe un gran potencial forestal del Perú en el mercado de los bonos de carbono, podría coadyuvar en este propósito, la acuicultura de *Argopecten purpuratus* que se practica desde los años 1970 (Valdivia y Benites, datos sin publicar) en bahías de su litoral. En 2013 y 2015 la producción de *A. purpuratus* en Perú fue de 67 694 t y 23 029 t, respectivamente, con ingresos de 298.2 x 10⁶ US\$ y 233.3 x 10⁶ US\$, respectivamente (Ministerio de la Producción (PRODUCE) 2016a). Esta actividad se caracteriza porque en el mercado solo se coloca la gónada y musculo aductor, que representan el 20 % del peso total del organismo, constituyéndose las valvas, que representan el 54.2 % del peso total del organismo (Alcázar y Mendo 2008), en residuos, con problemas en su disposición final. Si se toma en cuenta, por ejemplo, la producción en 2013 (67 694 t), se habrían producido, en ese año, 40 616 t de valvas. La estructura química de las valvas es carbonato de calcio (CaCO₃), siendo la fuente de carbono, el CO₂ disuelto en el agua, y el carbono orgánico por ingestión del fitoplancton (Feng et al. 2023). La biomineralización del CaCO₃ es muy compleja, gobernada por el pH, suministro de calcio desde el manto, y la tasa de conversión de CO₂ a bicarbonato y carbonato (Wilbur 1964), que

en primer lugar da lugar a la formación de un coloide amorfo de carbonato de calcio, culminando con un proceso de cristalización de CaCO₃ (Rivera y Hernández 2020). Producto de este proceso, a través de la maricultura se elimina una masa considerable de carbono del océano, cristalizado como CaCO₃ en las valvas de los bivalvos (Tang et al. 2011).

Bax et al. (2020), señalan que cuando la energía en base de carbono llega a animales con esqueletos o caparzones duros, al proceso se le denomina inmovilización de carbono, aplicable para el caso de *A. purpuratus*, ya que el carbono es retirado del ciclo durante años o siglos en la medida que se mantiene la matriz del esqueleto duro. En este sentido, este tipo de cultivo podría ser un método eficaz para secuestrar el carbono de los océanos (Ren 2021), con la ventaja de ser una tecnología de emisión negativa, con bajo consumo de energía y capacidades de almacenamiento de carbono prolongadas, esenciales para cumplir con los ambiciosos objetivos globales de mitigación de carbono (Feng et al. 2023).

Los volúmenes de valvas calcáreas que se producen por el cultivo industrial de *A. purpuratus* en el Perú, que en perspectiva seguirá creciendo, se constituyen en una importante forma de inmovilizar carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático, pudiendo ser una opción potencialmente rentable para incursionar en el mercado de los bonos de carbono (Díaz-Cruz 2016), y consecuentemente mejorar la rentabilidad e imagen de las empresas, y contribuir al desarrollo social. No obstante, no existe información de los volúmenes de carbono inmovilizado por las valvas de los organismos en cultivo, y las proyecciones de producción en el largo plazo, que puedan despertar el interés a los empresarios que cultivan *A. purpuratus* y los órganos competentes del gobierno, para poder acceder al mercado de los bonos de carbono. Por ello, se propuso determinar las cantidades de carbono inmovilizado en las valvas de *A. purpuratus* procedentes del cultivo industrial en el Perú, y su proyección para el largo plazo, que permita evaluar su oportunidad para incursionar en el mercado bursátil de los bonos de carbono.

Material y Métodos

Muestras

En estos 10 últimos años el cultivo de *A. purpuratus* en el Perú se ha concentrado en los departamentos de Piura (81 % de la producción nacional), Ancash (18.5 %), e Ica (0.5 %) (PRODUCE 2021), por lo que las muestras para el estudio procedieron solo de la empresa Nemo Corporation SAC (ensenada Nunura 5°50'09" S y 81°06'34" W, Piura), y de la empresa Aquapesca (bahía de Guayuná 9°20'52" S y 78°25'35" W, Ancash), donde se practica el cultivo en sistema suspendido en líneas flotantes. Las muestras fueron organismos vivos y valvas vacías, correspondientes a la cosecha realizada en setiembre de 2021, en ambas empresas. Se recibieron 140 organismos de Nemo Corporation SAC y 120 de Aquapesca, en ambos casos en submuestras de 20 organismos, obtenidos al azar durante la cosecha y contenidos en bolsas plásticas codificadas. El peso húmedo de las valvas vacías fue de 20 kg, las cuales fueron colectadas después del proceso de eviscerado de los mismos lotes cosechados.

Tratamientos de las muestras

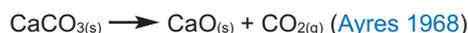
Las muestras vivas fueron procesadas en el Laboratorio de Biología Acuática de la Universidad Nacional del Santa (Perú). Para distinguir el aporte ponderado de carbono en las valvas, entre lugares, se registró la altura valvar (dimensión desde el umbo al margen dorsal), el peso fresco total (organismo completo, incluido las valvas), y el peso fresco de las gónadas, del musculo aductor y de las vísceras, utilizando para ello un vernier (\pm 1mm) y balanza eléctrica (\pm 0.1g). Con los datos del peso total sin valvas (PT) y la altura valvar (L), se calculó el Factor de Condición de Fulton (Froese 2006), a fin de evaluar el grado de bienestar o robustez de ambas

poblaciones en respuesta a sus factores ambientales (Cisneros et al. 2008):

$$FC = PT * L^{-3} * 100$$

El peso de CaCO₃ en las valvas (Lorrain et al. 2004; Díaz-Cruz 2016), se determinó empleando las valvas de los organismos llegados vivos al laboratorio, las que fueron lavadas con abundante agua dulce, y con una escobilla y pinzas se retiraron epibiontes e impurezas. Luego las valvas fueron secadas en estufa a 80 °C por 24 horas, y pesadas en balanza analítica (± 0.0001 g).

Para determinar la cantidad de CO₂ en las valvas, se utilizaron las valvas procedentes del proceso de eviscerado, las que fueron lavadas con agua dulce, y con pinzas y escobilla, se retiró epibiontes e impurezas. Seguidamente fueron secadas al sol, y retirando el eventual polvo depositado en su superficie con el uso de una escobilla, fueron almacenadas en bolsas plásticas. Las valvas secas fueron trituradas en una máquina de abrasión de Los Ángeles (molino de 12 bolas) en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional del Santa. El material triturado se pasó por un tamiz de 250 micras (N° 60), y el producto fue almacenado en bolsas de cierre hermético. Luego, utilizando crisoles de porcelana limpios y sometidos a estufa a 105 °C por 1 hora y pesados en balanza analítica (± 0.0001 g), se tomaron muestras de 2 g del tamizado (22 réplicas), los que fueron sometidos proceso termogravimétrico, para lograr la descomposición térmica del CaCO₃, mediante la siguiente reacción:



La calcinación se realizó a 900 °C (Ayres 1968), en una mufla Thermoline, por 30 minutos. Las muestras calcinadas fueron colocadas en campana desecadora, registrando luego su peso seco en balanza analítica.

Procesamiento de los datos

La cantidad de CO₂ contenido en las muestras se determinó según la siguiente fórmula:

$$\text{Peso de CO}_2 \text{ (g)} = \text{Peso valvas tamizadas (g)} - \text{Peso valvas calcinadas (g)}$$

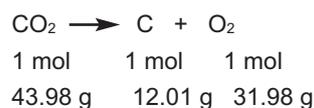
El porcentaje en peso de CO₂ en las valvas, se calculó con la siguiente fórmula:

$$\text{CO}_2 \text{ (\%)} = \text{Peso de CO}_2 \text{ (g)} / \text{peso valvas tamizadas (g)} * 100$$

Se calculó el potencial de fijación de CO₂, relacionando la cantidad CO₂ (g) contenido en las valvas secas y el peso fresco total del organismo (g) (FOESA 2013a, 2013b).

Para determinar la cantidad de carbono inmovilizado por las valvas de *A. purpuratus* a través del cultivo en el Perú, se tuvo en consideración: 1) la producción histórica del recurso, revisando in-

formación documental (Cavero y Rodríguez 2008; PRODUCE 2009, 2015, 2020, 2021), 2) el porcentaje promedio que representan las valvas, respecto del peso total del organismo, en términos de CaCO₃, 3) el porcentaje de CO₂e contenido en las valvas, en base a los datos del presente trabajo, y 4) la siguiente relación estequiométrica:



La proyección de la producción de *A. purpuratus* y por tanto de la cantidad de CO₂ secuestrado en las valvas y el carbono inmovilizado, para un horizonte de 10 años, se realizó en base a la tasa anual de crecimiento obtenido en el presente estudio. Las unidades de CO₂ secuestrado por *A. purpuratus* está dada como CO₂ equivalente (CO₂e), en atención a la definición de IPCC (2013), y carbono inmovilizado en toneladas de carbono (tC).

Tratamiento estadístico

Se compara la altura valvar, peso total y peso de las valvas vacías, así como también el porcentaje de CO₂ contenido en las valvas de *A. purpuratus*, de ambos lugares de procedencia, aplicando estadística de t de Student (Scheffler 1981). Para la estimación de la proyección del crecimiento en la producción de *A. purpuratus* en el Perú al 2030, se utilizó el modelo de regresión lineal simple, utilizando Microsoft Excel 2019.

Resultados

Datos del muestreo

Los organismos de *A. purpuratus* procedentes de Piura y Ancash, tienen altura valvar estadísticamente iguales ($t_{0.05, 13 \text{ gl}} = 2.16$, $t_c = 1.85$), sin embargo, existen diferencias estadísticamente significativas a nivel del peso total ($t_{0.05, 13 \text{ gl}} = 2.16$, $t_c = 5.24$), debido fundamentalmente al peso de CaCO₃ contenido en las valvas (Tabla 1): las valvas de Piura son 13.25 % más pesadas que las de Ancash. En promedio las valvas de *A. purpuratus* cultivados en el Perú, representan el 52.8 % del peso total fresco del organismo, y el CaCO₃ contenido en dichas valvas el 40.28 % del peso total (Tabla 1).

CO₂ en valvas y potencial de carbono inmovilizado

No se encontró diferencia estadísticamente significativa entre el porcentaje de CO₂e contenido en las valvas de las muestras de Piura (43.62 ± 0.004 %) y Ancash (43.25 ± 0.77 %) ($t_{0.05, 42 \text{ gl}} = 2.021$, $t_c = 0.299$), representando en promedio el 43.44 % del peso de la valva. El potencial de fijación promedio es de 0.23 kg de CO₂ kg⁻¹ de organismo de talla comercial, equivalente a inmovilizar 0.06 kg C kg⁻¹ de organismo de talla comercial (Tabla 1).

Tabla 1. Datos de cosecha de *A. purpuratus* de cultivo suspendido, en Nunura (Piura) y Guaynuná (Ancash), realizado en setiembre de 2021.

Table 1. Harvest data of *A. purpuratus* from suspended culture, in Nunura (Piura) and Guaynuná (Ancash), carried out in September 2021.

Parámetro	Procedencia		Promedio
	Nunura	Guaynuná	
Altura valvar (cm)	8.06 ± 0.36	7.97 ± 0.30	8.02
Peso total (g)	92.66 ± 16.07	78.64 ± 10.08	85.65
Peso gónada (g)	5.47 ± 1.39	4.41 ± 1.55	4.94
Peso musculo aductor (g)	14.40 ± 2.84	11.72 ± 1.80	13.06
Peso de viseras (g)	24.65 ± 5.77	20.20 ± 3.60	22.43
Peso valvas frescas (g)	48.13 ± 10.43	42.31 ± 6.24	45.22
Peso de valvas secas (CaCO ₃) (g)	36.98 ± 5.43	32.02 ± 3.11	34.50
Factor de Condición de Fulton (%)	8.50 ± 1.44	7.18 ± 0.94	

Proyección de la inmovilización de carbono por las valvas

La producción histórica de *A. purpuratus* en el Perú, en función de la tasa anual de crecimiento, tiene tres momentos: a) 39.78 % entre 1996-2009, b) 42.29 %, entre 2010-2015 (periodo errático), y c) 34.4 % entre 2016-2020. El periodo errático, genera sesgo para establecer una línea de tendencia real. Se calcula que en el periodo 1996-2020 se han producido 556 276.35 t y 293 713.91 t, como peso bruto de organismos y valvas, respectivamente, habiéndose fijado 127 589.32 tCO₂e, o inmovilizado 34 841.92 tC (Fig. 1).

En base a la tasa anual de crecimiento lineal de la producción de *A. purpuratus* para el periodo 2016-2020 (Fig. 2), la producción estimada en el año 2030 es 117 299.43 t, con una fijación de 26 904.07 tCO₂e, y un acumulado de 198 182.45 tCO₂e en el periodo 2021-2030. En términos equivalentes, en el año 2030 se habría inmovilizado 7 346.93 tC y acumulado de 54 119.40 tC en el periodo 2016-2030.

Discusión

Producción de *A. purpuratus*

A. purpuratus es una especie adaptada a las condiciones marinas entre el norte del Perú (bahía de Sechura) y Valparaíso (Chile) (Cantillanez et al. 2005), donde su crecimiento depende de factores como temperatura, pH y alimento (Bertolini et al. 2021). En este sentido el peso total, peso de gónadas y musculo aductor y Factor de Condición (proporción de individuos madurantes) de los organismos procedentes de Piura, mayores en promedio entre 15.53 y 19.38 %, que los organismos procedentes de Ancash (Tabla 1), serían debidos, entre otros factores, a una mejor temperatura del agua en bahía de Sechura (Piura) (14-24 °C) (Instituto del Mar del Perú (IMARPE) 2007; Morón et al. 2013), con relación a la bahía de Samanco (Ancash) (16.3-21.5 °C) (IMARPE 2009).

Las valvas de los organismos procedentes de Piura, en términos de CaCO₃, son 1.15 veces más pesadas que las procedentes de Ancash (Tabla 1), aspecto relevante para cálculos futuros de inmovilización de carbono por este tipo de cultivo en el Perú, en tanto, la formación de las valvas está gobernada por la disponibilidad de calcio, CO₂, bicarbonato, alcalinidad total, oxígeno disuelto, salinidad, fotosíntesis del fitoplancton, temperatura, disponibilidad de alimento, desarrollo gonadal (Wilbur 1964; Lorrain et al. 2004; Nakayama et al. 2022), que podrían variar localmente o motivadas por el cambio del clima mundial. De estos factores, el de mayor preocupación actual es el pH, debido a la tendencia inequívoca de un aumento antropogénico del CO₂ disuelto en las capas superiores de los océanos, incrementado en un 30 % en los últimos 200 años, que ocasiona una disminución de sus valores, afectando negativamente a los organismos calcificadores, como *A. purpuratus*, con pérdidas económicas (Laffoley et al. 2017; Bezner et al. 2022). Se ha sometido experimentalmente *A. purpuratus* a pH de 7.4 (tratamiento) y 7.8 (control), registrando una tasa de crecimiento y una tasa de calcificación de 0.30 mm día⁻¹ y 66.24 mgCaO₃ g⁻¹ día⁻¹, respectivamente, para el tratamiento, y 0.33 mm día⁻¹ y 73.51 mgCaCO₃ g⁻¹ día⁻¹, respectivamente, para el control. Al final del experimento el peso promedio de la valva para el control fue de 0.82 g y para el tratamiento de 0.66 g (Córdova 2016, datos sin publicar). En este sentido la variación del pH en las bahías en donde se cultiva *A. purpuratus* podría disminuir, afectando el proceso de calcificación, y consecuentemente el peso de las valvas de los organismos en cultivo.

Secuestro de carbono en valvas

La acuicultura de bivalvos está ganando atención debido a su rol en el ciclo biogeoquímico del carbono (FOESA 2013b; Figueira et al. 2015), ya que, por ejemplo, una granja de ostras en Australia puede secuestrar entre 3.81 y 17.94 tC ha⁻¹ año⁻¹ (Hickey 2008). En las rías gallegas (España), el cultivo de mejillón en bateas secuestra unas 40 000 tCO₂ año⁻¹ (Macías et al. 2005), con un potencial de fijación entre 0.15 - 0.17 kgCO₂ kg⁻¹ de mejillón de talla

comercial (FOESA 2013b), y en laguna costera de Sacca di Goro (Italia), *Venerupis philippinarum* y *Mytilus galloprovincialis*, secuestran 0.254 y 0.146 kgCO₂ kg⁻¹ de organismo cosechado de granjas marinas, respectivamente (Tamburini et al. 2022). Jansen y van den Bogaart (2020), en base al estudio del potencial de secuestro de carbono por las valvas de mejillón de acuicultura de los Países Bajos, estiman que equivale entre 4 000 y 7 600 tC año⁻¹. En este contexto, el secuestro de CO₂ por el cultivo de *A. purpuratus* en el Perú, entre 2010 y 2020, muestra una tendencia de 10 000 tCO₂e año⁻¹, equivalente a 2730.79 tC año⁻¹ (Fig. 1), con un potencial de fijación de 0.23 kgCO₂ kg⁻¹ de organismo de talla comercial, equivalente a inmovilizar 0.06 kgC kg⁻¹ de organismo (Tabla 1), demostrando que las valvas no deberían seguir siendo consideradas un desperdicio, sino un biomaterial valioso que puede reutilizarse para obtener beneficios ambientales y económicos (Morris et al. 2018), es decir en un recurso con valor agregado (Fig. 3). Por estas características, se podría considerar a este cultivo como de doble propósito: sus tejidos, para consumo humano directo (interés económico) y las valvas, en el mercado de bonos de carbono (interés ecológico y económico). Esto debería motivar la generación de políticas para ampliar las oportunidades del Perú en el comercio de los bonos de carbono, en tanto la humanidad requiere con urgencia desplegar esfuerzos para reducir las emisiones globales de GEI en un 43 % para 2030 y evitar que las temperaturas suban más de 1.5 °C (World Bank 2022).

Proyección de la inmovilización de carbono por las valvas

Se constituyen en soporte de la proyección de la inmovilización de carbono por las valvas de *A. purpuratus* en cultivo en el Perú al 2030 (Fig. 2), los siguientes supuestos: a) de las 44 mil hectáreas habilitadas en el ámbito marino para acuicultura (PRODUCE 2009), solo 28 % están en uso productivo (Saldarriaga y Regalado 2017), lo que significa que la frontera productiva se podría ampliar hasta en 72 %, b) la existencia de fondos concursables en I+D+i en acuicultura (PRODUCE 2016b) y de Concytec/Fondecyt, orientados a la innovación y eficiencia productiva; la creación de Centros de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica (CITE de acuicultura), y los procesos de adaptación y transferencia tecnológica, hacia la inversión privada en acuicultura (PRODUCE 2010), que en suma, promueven mayor productividad y competitividad, e inclusive se prevé instalaciones off-shore (Mendoza et al. 2016), c) el crecimiento de la producción acuícola peruana de 21 veces entre 1993-2018 (Baltazar 2020), con expectativas de crecimiento de 120.9 % entre 2016-2030 (Kleeberg 2019), y d) la tendencia del crecimiento de la acuicultura mundial durante las últimas décadas, en promedio 5.3 % anual (período 2001-2018), con países, que entre 2009-2018 crecieron 12.4 % (Indonesia), 12 % (Ecuador), 9.1 % (Bangladesh) y 8.4 % (Egipto) (FAO 2020), que sirven de estímulo para el desarrollo de la acuicultura peruana.

Potencialidad en el mercado de carbono

Samayoa (2011) considera que los riesgos en la viabilidad de proyectos de secuestro de carbono son la no-permanencia (no almacenamiento indefinido) y la incertidumbre (grado de imprecisión en la medición de la cantidad de CO₂), como en las alternativas de reforestación, gestión forestal y prácticas agrícolas para mejorar el almacenamiento de carbono en el suelo, ya que la descomposición de la madera muerta y las hojas caídas en los bosques naturales liberan CO₂ y otros GEI a la atmósfera (Tang et al. 2011; Moore 2020). Estos riesgos no ocurren con el secuestro e inmovilización de carbono por las valvas de *A. purpuratus*, y de bivalvos en general, ya que el carbono es convertido en cristales de CaCO₃, a través de un proceso de biomineralización (Jansen y van den Bogaart 2020; Moore 2020), pudiéndose mantener por miles de años, como en núcleos de aguas profundas de antiguos sedimentos costeros (Fariñas-Franco et al. 2018; Moore 2020) y montones de basura antigua (Rollins et al. 1987; Roosevelt et al. 1991), retardando en ciclo del carbono (FOESA 2013b); pero además porque se puede medir la cantidad de CO₂ secuestrado (Hamrick et al. 2018).

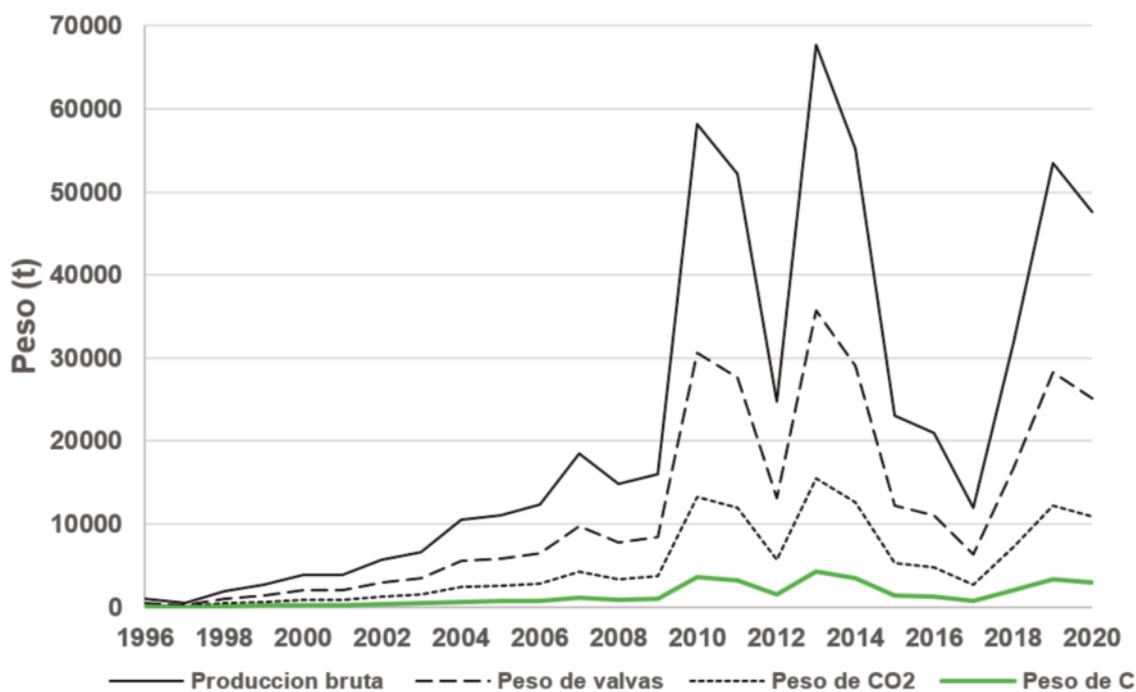


Figura 1. Producción de *Argopecten purpuratus* procedentes de la acuicultura en Perú, 1996-2020 (Fuente de datos: Cavero and Rodríguez 2008; PRODUCE 2009, 2015, 2020), el peso de valvas, CO₂e y C inmovilizado.

Figure 1. Production of *Argopecten purpuratus* from aquaculture in Peru, 1996-2020 (Data source: Cavero and Rodríguez 2008; PRODUCE 2009, 2015, 2020), weight of shells, CO₂e and C immobilised.

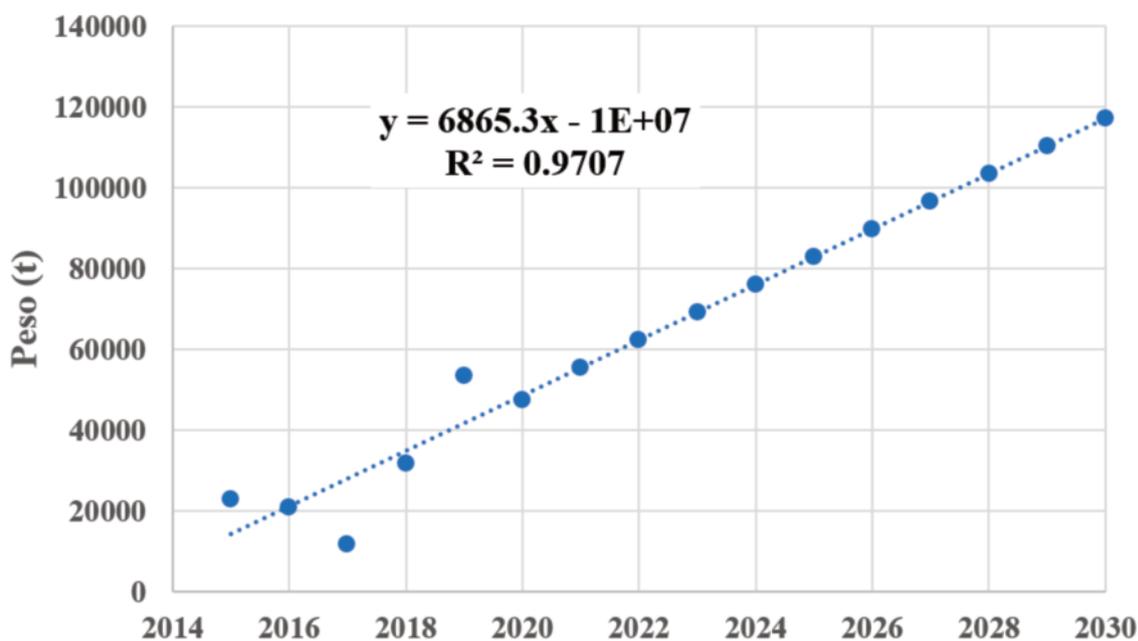


Figura 2. Proyección del crecimiento en la producción de *Argopecten purpuratus* en el Perú, del 2014 al 2030.

Figure 2. Projected growth in production of *Argopecten purpuratus* in Peru, from 2014 to 2030.

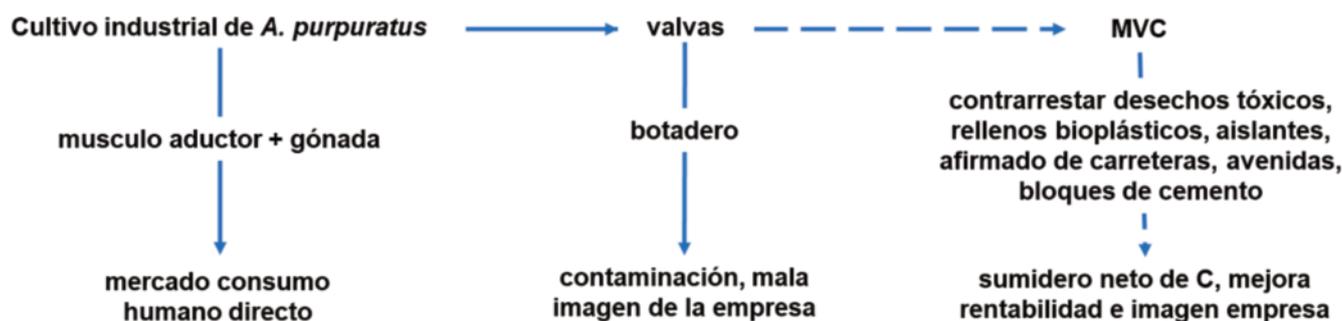


Figura 3. Alternativa para el uso de las valvas de *A. purpuratus* en el marco del Mercado Voluntario de Carbono (MVC) en el Perú.

Figure 3. Alternative for the use of *A. purpuratus* shells in the framework of the Voluntary Carbon Market (VCM) in Peru.

Jansen y van den Bogaart (2020), estiman que el potencial de secuestro de carbono mediante el cultivo industrial de mejillones en Holanda fluctúa entre 4 000 y 7 600 tC año⁻¹, argumentando que esta actividad puede ser considerada un sumidero neto de carbono. Comparativamente, las estimaciones de inmovilización de carbono por el cultivo de *A. purpuratus* en el año 2030 en el Perú, sería de 7 346.93 tC, con un acumulado de 54 119.40 tC en el periodo 2021-2030 (Fig. 2), que revelan la importancia de la actividad para contribuir a la mitigación del cambio climático, y con ello la oportunidad para promover el Mercado Voluntario de Carbono (MVC) a nivel de microempresas (menos de 50 000 tCO₂e año⁻¹) y empresas grandes (hasta 500 000 tCO₂e año⁻¹) dedicadas a este cultivo (Trove Research 2021), que colocarían el carbono inmovilizado en empresas que decidan compensar voluntariamente sus emisiones para reducir su huella de carbono o cumplir con objetivos de responsabilidad social corporativa (Sullivan et al. 2022).

La colocación del carbono inmovilizado o carbono azul en el MVC requerirá del acompañamiento por parte de los gobiernos locales y regionales, y de los sectores de la energía, bienes de consumo, finanzas y seguros (Donofrio et al. 2021). En este mercado, las valvas podrían ser empleadas para contrarrestar desechos y microbios tóxicos en aguas contaminadas (Moore 2020), rellenos bioplásticos, aislantes, producción de cemento (Jansen y van den Bogaart 2020), construcción de defensas marinas, en lugar de arena (Kumar et al. 2016; van der Schatte et al. 2020, afirmado de carreteras, avenidas, calles, o en la construcción de bloques de cemento, garantizando la condición de sumidero indefinido de carbono, y además porque estas actividades no requieren de un procesamiento de alta energía, y la tecnología es simple, sostenible y económicamente viable (Morris et al. 2018). El agregado de valvas puede costar entre \$240 y \$2 400 t⁻¹ (Morris et al. 2018), y unos 20\$ t⁻¹ de CO₂e secuestrado (Macías et al. 2005). Esto permitiría a las empresas de acuicultura una fuente adicional de ingresos económicos, fuera de su cadena de valor (Samayoa 2011), y adicionalmente mejorar su imagen al revertir la inadecuada disposición de las valvas en los botaderos municipales, que además implica costos por disposición final (Fig. 3).

Actualmente en el norte del Perú, existen un incipiente mercado para el uso de las valvas de *A. purpuratus* orientado a la producción de óxido de calcio, a través de procesos térmicos, lo que implica volver grandes volúmenes de CO₂ a la atmósfera. En este sentido, adquiere relevancia la inmovilización indefinida del carbono por las valvas de estos organismos a través de proyectos de adicionalidad (Fig. 3), contribuyendo a enfrentar el calentamiento global.

No obstante la importancia de las valvas de bivalvos en cultivo para inmovilizar el carbono, algunos autores cuestionan que el secuestro de carbono tenga un balance neto positivo, ya que en el proceso de calcificación de las valvas se forma CO₂ (Ca²⁺+2HCO₃⁻ → CaCO + CO₂ + H₂O) (Filgueira et al. 2015; Alonso et al. 2021), que podría conducir a un aumento de la pCO₂ en las aguas superficiales costeras poco profundas donde se cultivan los moluscos, y ser liberado a la atmósfera, constituyéndose en una fuente de CO₂ at-

mosférico (Frankignoulle et al. 1994; Raven et al. 2005; Fodrie et al. 2017); sugiriendo que, en el balance del crecimiento de las valvas, debe tenerse en cuenta la liberación de CO₂ (Jansen y van den Bogaart 2020; Bertolini et al. 2021). Otros, sin embargo, argumentan que el carbono secuestrado por el cultivo de bivalvos, o carbono azul (Hickey 2008; Jansen y van den Bogaart 2020; van der Schatte et al. 2020; Shafiee 2021), como el caso de *A. purpuratus*, al ser biomineralizado como CaCO₃ y retenido indefinidamente en las valvas, se constituye en un sumidero neto de carbono (Hickey 2008), ya que este es eliminado de su ciclo y bloqueado (Johnston y Radeloff 2019), por cientos o miles de años, o incluso millones de años (Bax et al. 2020), contribuyendo a mitigar el cambio climático (FOESA 2013b). Li et al. (2021), estudiaron la bahía de Sanggou (China), en donde se cultiva moluscos bivalvos a gran escala, observando que el cultivo redujo significativamente la alcalinidad total del agua de mar producto de una rápida deposición de CaCO₃, y aunque la respiración liberó CO₂ en el agua de mar, elevó el nivel de pCO₂ y redujo el pH, sorprendentemente, el carbono inorgánico disuelto en el agua de mar se redujo significativamente en el área de cultivo de bivalvos, producto que los organismos fijaron mayor cantidad de carbono inorgánico por calcificación, que el liberado en el agua de mar por la respiración.

Frente a la falta de consenso descrito en el párrafo anterior, se debe considerar que la producción acuícola de bivalvos (almejas, mejillones, ostras) en el mundo es alta (Jansen y van den Bogaart 2020), unos 17.7 millones de toneladas en 2018 (FAO 2020), en el que indefectiblemente habrá valvas, conteniendo carbono almacenado a largo plazo, que por ahora generalmente se descartan, e implica un costo para su eliminación (unos \$150 t⁻¹ en Australia) (Yan y Chen 2015). Por esta razón se justifica considerar a los cultivos de bivalvos, como parte de las alternativas a estudiar en la mitigación del cambio climático (Macías 2004; GLOBE Advisors 2012), en un contexto de urgencia climática, para alcanzar los objetivos de 1.5 °C del Acuerdo de París para 2030, y la carbono neutralidad para 2050 (Cámara de Comercio de Bogotá 2022); pero además, debido a los múltiples usos potenciales de las valvas (Fig. 3), podrían proporcionar ingresos en lugar de ser un costo, si se valora como agregado (van der Schatte et al. 2020).

Moore (2020) y Tang et al. (2011), sugieren que, en el propósito de mitigar el cambio climático, debería haber un cambio de enfoque en el cultivo de moluscos bivalvos, para utilizar permanentemente el carbono disponible en el agua y aceptar el alimento como subproducto; posición coherente con las estadísticas de China, que entre 2015 a 2019, se fijaron aproximadamente 6.23 Mt CO₂e a través del secuestro neto de carbono por cultivo de moluscos, además proporcionaron 0.37 Mt de proteína cosechada y se redujeron aproximadamente 37.39 Mt CO₂e en comparación a la misma cantidad de proteína proporcionada por la carne de res (Feng et al. 2023); demostrando que la acuicultura de moluscos tienen el potencial de servir como una actividad de almacenamiento de carbono, con una huella de carbono más pequeña que el consumo de proteína animal (Ray et al. 2019; Alonso et al. 2021).

El Perú cuenta con Estrategia Nacional ante el Cambio Climático (Ministerio del Ambiente (MINAM) 2015), Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (MINAM 2021) y una Ley Marco sobre Cambio Climático (Perú 2018). Sin embargo, el mercado regulado de bonos de carbono es incipiente, con restricciones en el procedimiento de acreditación (Ciclo del Proyecto MDL) para la generación de los CERs. Frente a esta situación, y teniendo en perspectiva el potencial desarrollo del cultivo de *A. purpuratus* en la costa peruana hacia el 2030 (Fig. 2), resulta prudente establecer incentivos de reducción de impuestos (Sullivan et al. 2022), y créditos fiscales, para invertir en soluciones de secuestro y almacenamiento de carbono (BATTLE 2021), para que, en el mediano plazo, el comercio derivado del secuestro indefinido de carbono por las valvas de estos organismos, se desarrolle en el marco del MVC. En este mercado los compradores y vendedores negocian por su propia voluntad, o como parte del mercado de cumplimiento, donde las regulaciones gubernamentales requieren que los emisores reduzcan sus emisiones o adquieran compensaciones (Hamrick et al. 2018; Pizarro 2021). Por otro lado, debido al incremento en los niveles de conciencia ambiental a nivel empresarial y su reputación en el mercado, el MVC ha crecido de 0.3 MtCO_{2e} en 2008 a 42.8 MtCO_{2e} en 2018 (Hamrick et al. 2018), alcanzando 95 MtCO_{2e} en 2020 (Sullivan et al. 2022), aunque otras cifras señalan que en 2021 se habría alcanzado 416 MtCO_{2e} (Climate Focus 2021).

El Perú, como país signatario del Acuerdo de París está obligado, en el breve plazo, a implementar un sistema de impuestos sobre el carbono y un sistema de comercio de emisiones GEI (Pizarro 2021; World Bank 2021; Sullivan et al. 2022), como los tienen Argentina, Chile, Colombia y México (Pizarro 2021); por ello, cualquier iniciativa orientada al secuestro de carbono, como a través del cultivo de *A. purpuratus* y otros bivalvos, se constituye en una oportunidad para contribuir a alcanzar la meta climática, incursionando en el MVC, aprovechando la ventaja que, por la demanda, los precios serán más altos durante la próxima década. Se espera que por la creciente presión sobre las corporaciones para que muestren acciones climáticas, la demanda de MVC crezca entre 5-10 veces durante los próximos diez años, entre 8-20 para 2040 y entre 10-30 para 2050 (Trove Research 2021). DECC (2011), estiman que al 2030, 1 tCO_{2e} negociado, en promedio, tendría un precio de €70; que teóricamente podrían representar €1.88 millones por la colocación del carbono inmovilizado por las valvas procedentes del cultivo industrial de *A. purpuratus* en el Perú. Añaden que, no obstante, la incertidumbre que significa hacer proyecciones a largo plazo, pero más allá de 2030, el mercado global de carbono estará en pleno funcionamiento, con un el valor del carbono en 2100 de €268 por tCO_{2e}. En este contexto, si las empresas que cultivan *A. purpuratus* colocaran sus valvas en el MVC, podrían adicionalmente acceder a certificaciones verdes, ya que estarían propiciando un adecuado uso de este biomaterial, evitando el *greenwashing*, ya que legítimamente serían beneficiosas para el ambiente (Alejos 2013), practicando la economía circular sin desperdicio, la sostenibilidad ambiental y el mercado de créditos de carbono (Alonso et al. 2021).

Conclusiones

El cultivo de *Argopecten purpuratus* en el Perú es una actividad en pleno crecimiento, cuyos productos de venta, mayormente exportación, son bajo la forma de gónadas y musculo aductor, sin embargo, los grandes volúmenes de valvas, que representan el 52.8 % del peso total, son un recurso que no tiene mercado, ni precio, constituyéndose en un problema para su disposición final; sin embargo, estas valvas se desarrollan secuestrando el carbono presente en el agua e inmovilizándolo indefinidamente, bajo la forma de CaCO₃, de allí su importancia para contribuir a los esfuerzos de mitigación del cambio climático. En este marco, en el periodo 2010-2020, el secuestro de CO₂ por las valvas procedentes del cultivo en el país, muestra una tendencia de 10 000 tCO_{2e} año⁻¹ equivalente a una inmovilización de 2 730.79 tC año⁻¹.

En base la tasa anual de crecimiento del periodo 2016-2021 en la producción de *A. purpuratus* en el Perú, en el periodo 2021-2030 las valvas de estos organismos habrían secuestrado 198 182 tCO_{2e} o inmovilizado 54 119 tC.

Tomando en consideración la cantidad actual de carbono inmovilizado indefinidamente por las valvas de *A. purpuratus* en cultivo en el Perú, y la proyección al 2030, se aperturan posibilidades para incorporar este recurso en el mercado de bonos de carbono, de modo particular en el Mercado Voluntario de Carbono (MVC), en donde se negocie la compra-venta del CO₂ secuestrado o carbono inmovilizado, entre entidades que buscan rentabilidad y compensar las emisiones de GEI. Aunque el cultivo como tal no está orientado a mitigar el cambio climático, sin embargo, este trabajo propone valorizar la inmovilización de carbono por las valvas, como contribución del país para alcanzar las metas del Acuerdo de París: no sobrepasar 1.5 a 2 °C por encima del nivel preindustrial para evitar cambios irreversibles en el clima global.

Agradecimientos

A Tito Herson Tapia Torres y Julio Rodríguez Imán, de la Escuela de Biología en Acuicultura de la Universidad Nacional del Santa por su colaboración en el procesamiento de las muestras. A los revisores anónimos de este documento por su revisión crítica.

Contribución de los autores

Romulo Loayza: Análisis formal, Conceptualización, Investigación, Metodología, Redacción-revisión y edición, Supervisión, Visualización. Raúl Valencia: Metodología, Recursos, Investigación, Redacción-revisión y edición. Gustavo Valencia: Recursos, Investigación, Revisión y edición.

Referencias

- Alcázar, J., Mendo, J. 2008. Crecimiento y supervivencia de juveniles de *Argopecten purpuratus* en sistemas de fondo y suspendido en la zona de Casma, Perú. *Ecología aplicada* 7: 71-80.
- Alejos, C. 2013. Greenwashing: ser verde o parecerlo. *Cuadernos de la cátedra "la caixa" de responsabilidad social de la empresa y gobierno corporativo*. IESE Business school. Universidad de Navarra. Disponible en: <https://media.iese.edu/research/pdfs/ST-0328.pdf>
- Alonso, A., Álvarez-Salgado, X., Antelo, L. 2021. Assessing the impact of bivalve aquaculture on the carbon circular economy. *Journal of Cleaner Production* 279: 123873.
- Ayres, G. 1968. *Análisis Químico Cuantitativo*. Segunda Edición. Harper and Row Publishers, Inc, México.
- Baltazar, P. 2020. Producción y diversificación de la acuicultura en el Perú. *IX Foro Iberoamericano de los Recursos Marinos y Acuicultura* 9: 75-84.
- BATTLE 2021. *Monetizing your carbon emissions with 45Q Tax Credits*. Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio. Estados Unidos.
- Bax, N., Sands, C., Gogarty, B., Downey, R., Moreau, C., Moreno, B., Held, C., et al. 2020. Perspective: increasing blue carbon around Antarctica is an ecosystem service of considerable societal and economic value worth protecting. *Global Change Biology* 27: 5-12.
- Bertolini, C., Bernardini, I., Brigolin, D., Matozzo, V., Milan, M., Pastres, R. 2021. A bioenergetic model to address carbon sequestration potential of shellfish farming: example from *Ruditapes philippinarum* in the Venice lagoon. *ICES Journal of Marine Science* 78: 2082-2091.
- Bezner, R., Hasegawa, T., Lasco, R., Bhatt, I., Deryng, D., Farrell, A., Gurney-Smith, H., et al. 2022. Food, fibre, and other ecosystem products. *Climate change* 713-906.
- Cámara de Comercio de Bogotá 2022. *Guía de Descarbonización y Acción Climática*. Cámara de Comercio de Bogotá. Bogotá, Colombia.
- Canadell, J., Monteiro, P., Costa, M., Cotrim da Cunha, L., Cox, P., Eliseev, A., Henson, S., et al. 2021. Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. En: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., et al. (eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working*

- Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 673–816. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, Estados Unidos.
- Catillanez, M., Avendaño, M., Thouzeau, G., Le Pennec, M. 2005. Reproductive cycle of *Argopecten purpuratus* (Bivalvia: Pectinidae) in La Rinconada marine reserve (Antofagasta, Chile): response to environmental effects of El Niño and La Niña. *Aquaculture* 246: 181-195.
- Caretta, M., Arfanuzzaman, A., Betts, M., Gelfan, R., Hirabayashi, A., Lissner, Y., et al. 2022. Water. En: Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegria, A., Craig, M., et al. (eds.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, Estados Unidos.
- Cavero, P., Rodríguez, P. 2008. Producción sostenida de moluscos bivalvos en el Perú: acuicultura y repoblamiento. En: Lovatelli, A., Fariás, A., Uriarte, I. (eds). Estado actual del cultivo y manejo de moluscos bivalvos y su proyección futura: factores que afectan su sustentabilidad en América Latina, pp. 209-218. Taller Técnico Regional de la FAO. 20–24 de agosto de 2007, Puerto Montt, Chile. *FAO Actas de Pesca y Acuicultura*. No. 12. Roma, Italia.
- Cisneros, R., Bautista, J., Argüelles, J. 2008. Crecimiento comparativo de la concha de abanico (*Argopecten purpuratus*) en sistemas suspendidos. *Ecología Aplicada*, 7(1, 2): 81-87.
- Climate Focus 2021. Voluntary Carbon Market Update 2022 - H1. *Climate Focus*. Disponible en: <https://climatefocus.com/publications/voluntary-carbon-market-update-2022-h1/> [Accedido 27 de febrero de 2023].
- Cooley, S., Schoeman, D., Bopp, L., Boyd, P., Donner, S., Ito, S., Kiessling, W., et al. 2022. Oceans and coastal ecosystems and their services. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. En *IPCC AR6 WGII*, Cambridge University Press.
- DECC 2011. *Guidance on estimating carbon values beyond 2050: an interim approach*. Department of Energy and Climate Change GOV.UK. Disponible en: <https://www.gov.uk/government/publications/guidance-on-estimating-carbon-values-beyond-2050-an-interim-approach> [Accedido 27 de febrero de 2023].
- Díaz-Cruz, M. 2016. Bonos de carbono: un instrumento en el sistema financiero internacional. *Libre Empresa* 13: 11-33.
- Donofrio, S., Maguire, P., Myers, K. 2021. *Buyers of Voluntary Carbon Offsets, a Regional Analysis - State of the Voluntary Carbon Markets 2020* - Ecosystem Marketplace. Disponible en: <https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/buyers-of-voluntary-carbon-offsets-a-regional-analysis-state-of-the-voluntary-carbon-markets-2020-third-installment-featuring-european-and-north-american-buyers-offsets-2020/> [Accedido 27 de febrero de 2023].
- FAO 2020. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción*. FAO, Roma, Italia. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>
- Fariñas-Franco, J., Pearce, B., Mair, J., Harries, D., MacPherson, R., Porter, J., Reimer, P., et al. 2018. Missing native oyster (*Ostrea edulis* L.) beds in a European Marine Protected Area: Should there be widespread restorative management? *Biological Conservation* 221: 293-311.
- Feng, J.-C., Sun, L., Yan, J. 2023. Carbon sequestration via shellfish farming: A potential negative emissions technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 171: 113018.
- Filgueira, R., Byron, C., Comeau, L., Costa-Pierce, B., Cranford, P., Ferreira, J., Grant, J., et al. 2015. An integrated ecosystem approach for assessing the potential role of cultivated bivalve shells as part of the carbon trading system. *Marine Ecology Progress Series* 518: 281-287.
- Fodrie, F., Rodríguez, A., Gittman, R., Grabowski, J., Lindquist, N., Peterson, C., Piehler, M., et al. 2017. Oyster reefs as carbon sources and sinks. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 284: 20170891.
- FOESA 2013a. *Cambio climático y acuicultura*. FOESA, Madrid, España. 210 p.
- FOESA 2013b. *Guía para el cálculo de la huella de carbono en productos acuícolas*. FOESA, Madrid, España. 64 p.
- Frankignoulle, M., Canon, C., Gattuso, J. 1994. Marine calcification as a source of carbon dioxide: Positive feedback of increasing atmospheric CO₂. *Limnology and Oceanography* 39: 458-462.
- Froese, R. 2006. Cube law, condition factor and weight-length relationships: history, meta-analysis and recommendations. *Journal of applied ichthyology* 22: 241-253.
- GLOBE Advisors 2012. *Primer on Climate Change & Carbon Trading*. GLOBE Advisors Vancouver, A division of the GLOBE Group. British Columbia, Canada. 61 p.
- Hamrick, K., Gallant, M., Yoshimoto, E. 2018. Voluntary carbon markets: outlooks and trends January to March 2018. *Ecosystem Marketplace*, June 2018.
- Hickey, J.P. 2008. *Carbon sequestration potential of shellfish*. University of South Australia. Disponible en: <https://thefishsite.com/articles/carbon-sequestration-potential-of-shellfish>. [Accedido 27 de febrero de 2023].
- Instituto del Mar del Perú (IMARPE) 2007. *Estudio de línea de base del ámbito marino de la bahía Sechura 14-28 enero 2007*. Laboratorio Costero de Paita. Piura, Perú. 116 p.
- Instituto del Mar del Perú (IMARPE) 2009. *Informe final estudio de línea base en el ámbito marino de bahía de Samanco 13 - 24 diciembre 2008*. Instituto del Mar del Perú. Chimbote, Perú.
- IPCC 2007. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza. Disponible en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf
- IPCC 2013. *Cambio climático 2013: Bases físicas, Resumen para responsables de políticas, Resumen técnico y Preguntas frecuentes. Contribución del grupo de trabajo I al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*. Thomas, F., Stocker, Qin, D., Plattner, G., Melinda M., Simon, T., Boschung, A. et al. (edit.). 204 p. Disponible en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf
- Jansen, H., van den Bogaart, L. 2020. Blue carbon by marine bivalves: Perspective of Carbon sequestration by cultured and wild bivalve stocks in the Dutch coastal areas. *Wageningen Marine Research report C116/20*
- Johnston, C., Radeloff, V. 2019. Global mitigation potential of carbon stored in harvested wood products. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116: 14526-14531.
- Kleeberg, F. 2019. *Productividad y competitividad del sector acuícola en el Perú*. CIEPLAN, Santiago, Chile.
- Kumar, P., Kumar, C., Yuvaraj, P., Kumar, B., Mohan, E. 2016. A partial replacement for coarse aggregate by sea shell and cement by lime in concrete. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research* 2: 1131-1136.
- Laffoley, D., Baxter, J., Turley, C., Jewett, L., Lagos, N. (eds.) 2017. *Una introducción a la acidificación del océano: Lo que es, lo que sabemos y lo que puede suceder*. UICN, Gland, Suiza, 30 pp.
- Larson, A., Che, H., Suárez, G. 2012. *REDD y REDD+: iniciativas para reducir las emisiones de carbono derivadas de la deforestación y degradación de los bosques. Diálogos Ambientales con la prensa*. Ministerio del Ambiente. Lima, Perú.
- Li, J., Zhang, W., Ding, J., Xue, S., Huo, E., Ma, Z., Yu, W., et al. 2021. Effect of large-scale kelp and bivalve farming on seawater carbonate system variations in the semi-enclosed Sanggou Bay. *Science of the Total Environment* 753: 142065.
- Lorrain, A., Paulet, Y., Chauvaud, L., Dunbar, R., Mucciarone, D., Fontugne, M. 2004. $\delta^{13}\text{C}$ variation in scallop shells: increasing metabolic carbon contribution with body size? *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68: 3509-3519.
- Macías, F. 2004. Sumideros de carbono para el forzamiento climático antropoceno. Una visión de alternativas de actuación desde la ciencia del suelo. *Edafología* 11: 7-25.
- Macías, F., Arbestain, M., Lado, L. 2005. Alternativas de secuestro de carbono orgánico en suelos y biomasa de Galicia. *Recursos rurales* 71-85.
- Mendo, J., Caille, G., Massutí, E., Punzón, A., Tam, J., Villasante, S., Gutiérrez, D. 2020. Recursos pesqueros. En: Moreno, J.M., Laguna-Defior,

- C., Barros, V., Calvo Buendía, E., Marengo, J.A., Oswald Spring U. (eds.) *Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos – Informe RIOCCADAPT*, pp. 291-346. Red Iberoamericana del Cambio Climático.
- Mendoza, D., Berger, C., Berger, K. 2016. La Acuicultura Peruana - Una Mirada al 2025. *Infopesca Internacional* (63):17-23.
- Ministerio del Ambiente (MINAM) 2015. *Estrategia Nacional ante el Cambio Climático*. Ministerio del Ambiente. Lima, Perú, 85 p.
- Ministerio del Ambiente (MINAM) 2021. *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Perú: un insumo para la actualización de la Estrategia Nacional ante el Cambio Climático*. Ministerio del Ambiente. Lima, Perú. 611 p.
- Ministerio de la Producción (PRODUCE) 2009. *Plan Nacional de Desarrollo Acuícola*. Lima, Perú.
- Ministerio de la Producción (PRODUCE) 2010. Plan Nacional de Desarrollo Acuícola (2010–2021). Decreto Supremo 001-2010-PRODUCE del 07 de enero de 2010. Ministerio de la Producción, Lima, Perú.
- Ministerio de la Producción (PRODUCE) 2015. *Anuario estadístico pesquero y acuícola 2015*. Ministerio de la Producción, Lima, Perú.
- Ministerio de la Producción (PRODUCE) 2016a. *Anuario estadístico pesquero y acuícola 2015*. Ministerio de la Producción, Lima, Perú.
- Ministerio de la Producción (PRODUCE) 2016b. *Experiencia Global en Gobernanza de Sistemas de Innovación en Pesca y Acuicultura: Taller Internacional*. Ministerio de la Producción, Lima, Perú. Disponible en: http://biblioteca.imarpe.gob.pe/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=21289 [Accedido 27 de febrero de 2023].
- Ministerio de la Producción (PRODUCE) 2020. *Anuario estadístico pesquero y acuícola 2019*. Ministerio de la Producción, Lima, Perú.
- Ministerio de la Producción (PRODUCE) 2021. *Anuario estadístico pesquero y acuícola 2020*. Ministerio de la Producción, Lima, Perú.
- Moore, D. 2020. A biotechnological expansion of shellfish cultivation could permanently remove carbon dioxide from the atmosphere/Una ampliación biotecnológica del cultivo de moluscos bivalvos podría eliminar permanentemente el dióxido de carbono de la atmósfera. *Mexican journal of biotechnology* 5: 1–10.
- Morón, O., Velazco, F., Beltrán, L. 2013. Características hidrográficas y sedimentológicas de la Bahía de Sechura. *Boletín Instituto del Mar del Perú* 40: 150-159.
- Morris, J., Backeljau, T., Chapelle, G. 2018. Shells from aquaculture: a valuable biomaterial, not a nuisance waste product. *Reviews in Aquaculture* 11: 42-57.
- Naciones Unidas 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- Naciones Unidas 1998. Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 27. Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Naciones Unidas 2015. *Acuerdo de París*. Disponible en: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris> [Accedido 26 de febrero de 2023].
- Nakayama, K., Kawahara, Y., Kurimoto, Y., Tada, K., Lin, H., Hung, M., Hsueh, M., Tsai, J. 2022. Effects of oyster aquaculture on carbon capture and removal in a tropical mangrove lagoon in southwestern Taiwan. *Science of The Total Environment* 838: 156460.
- Parmesan, C., Morecroft, M., Trisurat, Y., Adrian, R., Anshari, G., Arneth, A., Gao, Q., et al. 2022. Terrestrial and freshwater ecosystems and their services. En: Pörtner, H., Roberts, D., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., et al, (eds.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, Estados Unidos, Cambridge University Press.
- Perú 2018. *Ley Marco sobre Cambio Climático-LEY-N° 30754*. Disponible en: <http://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/ley-marco-sobre-cambio-climatico-ley-n-30754-1638161-1/> [Accedido 27 de febrero de 2023].
- Pizarro, R. 2021. *Sistemas de instrumentos de fijación de precios del carbono en América Latina y jurisdicciones de las Américas relevantes*. ECLAC, Santiago, Chile.
- Raven, J., Caldeira, K., Elderfield, H., Hoegh-Guldberg, O., Liss, P., Riebesell, U., Shepherd, J., et al. 2005. *Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide*. Policy document 12/05. The Royal Society. Londres, Reino Unido.
- Ray, N., Maguire, T., Al-Haj, A., Henning, M., Fulweiler, R. 2019. Low greenhouse gas emissions from oyster aquaculture. *Environmental Science and Technology* 53: 9118-9127.
- Ren, W. 2021. Study on the removable carbon sink estimation and decomposition of influencing factors of mariculture shellfish and algae in China—a two-dimensional perspective based on scale and structure. *Environmental Science and Pollution Research* 28: 21528-21539.
- Rivera, C., Hernández, N. 2020. ¿Cómo se forma la concha de moluscos? *Recursos Naturales y Sociedad* 6: 43-54.
- Rodríguez-Sánchez, V., Calva-Vásquez, G. 2013. Estimación del carbono contenido en el bosque de Abies religiosa (H.B.K.) Schl. et Cham. en el Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo. En: Paz, F., Wong, J., Bazán, M., Saynes, V. (eds.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México*. Síntesis a 2018. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Instituto Tecnológico de Sonora. Texcoco, Estado de México, México
- Rollins, H., Sandweiss, D., Brand, U., Rollins, J. 1987. Growth increment and stable isotope analysis of marine bivalves: Implications for the geochronological record of El Niño. *Geoarchaeology* 2: 181-197.
- Roosevelt, A., Housley, R., Imazio da Silveira, M., Maranca, S., Johnson, R. 1991. Eighth millennium pottery from a prehistoric shell midden in the Brazilian Amazon. *Science* 254: 1621-1624.
- Saldarriaga, M., Regalado, F. 2017. Potencial acuícola en el Perú. *Revista Moneda* 34-39.
- Samayoa, S. 2011. *Guía de orientaciones. Mercado de carbono, oportunidades para proyectos de pequeña escala*. SNV. Tegucigalpa, Honduras.
- Scheffler, W. 1981. *Bioestadística*. Fondo Educativo Interamericano. México DF, México.
- Shafiee, R. 2021. *Blue Carbon*. Scottish Parliament. Disponible en: <https://digitalpublications.parliament.scot/ResearchBriefings/Report/2021/3/23/e8e93b3e-08b5-4209-8160-0b146bafec9d> [Accedido 27 de febrero de 2023].
- Sullivan, K., Diemert, A., Cordova, C., Hoekstra, J., Haug, C., La Hoz, S., Eden, A., et al. 2022. *Situación y tendencias de los mercados de carbono regulados y voluntarios en América Latina*. Green Finance LAC. Washington, DC., Estados Unidos.
- Tamburini, E., Turolla, E., Lanzoni, M., Moore, D., Castaldelli, G. 2022. Manila clam and Mediterranean mussel aquaculture is sustainable and a net carbon sink. *Science of The Total Environment* 848: 157508.
- Tang, Q., Zhang, J., Fang, J. 2011. Shellfish and seaweed mariculture increase atmospheric CO₂ absorption by coastal ecosystems. *Marine Ecology Progress Series* 424: 97-104.
- Trove Research 2021. *Future demand, supply and prices for Voluntary Carbon Credits – Keeping the Balance*. Trove Research and University College London. Londres, Reino Unido.
- UNEP 2020. *Emissions Gap Report 2020*. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenia. Disponible en: <https://wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/34426/EGR20.pdf>
- van der Schatte, A., Jones, L., Vay, L., Christie, M., Wilson, J., Malham, S. 2020. A global review of the ecosystem services provided by bivalve aquaculture. *Reviews in Aquaculture* 12: 3-25.
- Wilbur, K. 1964. Shell Formation and Regeneration. En: *Physiology of Mollusca*, pp. 243-282. Elsevier.
- World Bank 2021. *State and Trends of Carbon Pricing 2021*. World Bank. Washington, DC. Estados Unidos. Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35620> [Accedido 27 de febrero de 2023].
- World Bank 2022. *State and Trends of Carbon Pricing 2022. State and Trends of Carbon Pricing*. World Bank. Washington, DC. Estados Unidos. Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/37455> [Accedido 27 de febrero de 2023].
- Yan, N., Chen, X. 2015. Sustainability: Don't waste seafood waste. *Nature* 524: 155-157.