

Artículo original

Carbono en el Pacífico sudamericano: reservas en comunidades vegetales de un humedal costero en Perú

Carbon in the South American Pacific: discovering the reserves in vegetal communities of a coastal wetland in Perú

✉ Ronal Chavez¹, ✉ Héctor Aponte²

¹ Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

² Carrera de Biología Marina, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

Resumen

Los humedales costeros brindan diversos servicios ecosistémicos, entre ellos, el almacenamiento de carbono. En este estudio se cuantificó la reserva de carbono en las principales comunidades vegetales del humedal de Santa Rosa (Lima, Perú). Para ello, se hicieron 36 parcelas de 0,25 m² en las que se recolectó biomasa vegetal aérea y suelo en dos profundidades (0-10 cm; 10-20 cm). Posteriormente se cuantificó el porcentaje de carbono en las muestras y se escaló en función del área de cada formación vegetal. La cantidad de carbono almacenado en las comunidades de *Thypha domingensis* (totoral), *Schoenoplectus americanus* (juncal) y de vega mixta fueron 76,61 ± 26,87 TnC/ha, 75,29 ± 39,85 TnC/ha y 63,96 ± 25,81 TnC/ha, respectivamente, con un total entre estas tres comunidades de 2.703,02 TnC, que equivalen a 9,920,07 TnCO₂, valorizadas entre \$4960 y \$496.000 en el mercado voluntario mundial de carbono. Los resultados obtenidos, muestran la importancia ambiental y económica que este humedal tiene.

Palabras claves: Reserva de carbono; Servicios ecosistémicos; Comunidades vegetales; Valoración económica, mercado de carbono.

Abstract

Coastal wetlands provide several ecosystem services, among them carbon storage. In the present study, we quantified the carbon stock from the principal vegetal communities in the Santa Rosa wetland in Lima (Perú). We set 33 quadrats of 0.25 m² each, where we sampled aerial plant biomass and soil at two depths (0-10 cm; 10-20 cm). Then, we quantified the percentage of carbon based on the area of every plant community. The amount of carbon stored in the cattail, vega mix, and reed bed communities was 76.61 ± 26.87 TnC/ha, 75.29 ± 39.85 TnC/ha, and 63.96 ± 25.81 TnC/ha, respectively, for a total stock of 2,703.02 tons of carbon equaling 9,920.07 TnCO₂ whose value in the voluntary global market ranges from \$4,960 to \$496,000. These results show the environmental and economic importance of this wetland.

Keywords: Carbon stock; Ecosystem services; Plant communities; Economic value; Carbon market.

Introducción

Los humedales son ecosistemas intermedios entre el medio terrestre y el acuático (Paredes-García *et al.*, 2021) que brindan diversos servicios ecosistémicos como la provisión de hábitat, el control de la contaminación, la mitigación de inundaciones y tormentas, el mantenimiento de sedimentos y la regulación del clima por medio del almacenamiento y el secuestro de carbono (Sadat-Noori *et al.*, 2021). Este último servicio se logra principalmente por la acumulación de CO₂ atmosférico en la biomasa de la vegetación y en los suelos (Howard *et al.*, 2014). Las tasas de captura de carbono que presentan los ecosistemas de los humedales costeros (4,8 – 87,2 millones de TnC/año) son elevadas en comparación con los bosques tropicales (Howard *et al.*, 2017; Moritsch *et al.*, 2021). Debido a estas características,

Citación: Chavez R, Aponte H. Carbono en el Pacífico sudamericano: reservas en comunidades vegetales de un humedal costero en Perú. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 47(185):962-976, octubre-diciembre de 2023. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1925>

Editor: Sonia Moreno Guáqueta

***Correspondencia:**

Yan Ronal Chavez Soto;
ronalchavezso@gmail.com

Recibido: 8 de junio de 2023

Aceptado: 2 de octubre de 2023

Publicado en línea: 8 de noviembre de 2023



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

y gracias al Acuerdo de París, muchos países han incluido los humedales costeros en sus actividades de mitigación de gases de efecto invernadero (**Herr & Landis**, 2016). Más de la mitad (55 %) del carbono biológico captado en el mundo es capturado por los organismos vivos marinos (**Lovelock & Duarte**, 2019); este carbono se conoce como carbono azul y sus sitios de captura incluyen ecosistemas costeros como los manglares, los humedales costeros, las marismas, los pastos marinos y los arrecifes de coral (**Howard et al.**, 2017).

Estudios recientes indican que en el periodo entre 1970 y 2015 la superficie global cubierta por humedales naturales se redujo en un 35 %, a una tasa de -0,78 % (**Murray et al.**, 2019). Dicha pérdida se debe, principalmente, a actividades humanas como la agricultura, la acuicultura, la expansión urbana y el pastoreo, las cuales modifican los usos del suelo (**Adame et al.**, 2018). Todo ello desemboca en la pérdida de estos ecosistemas, con la consecuente alteración del carbono almacenado en sus suelos y el aumento de las emisiones de CO₂ a la atmósfera en tasas anuales que fluctúan entre el 3 y el 19 % (**Lovelock & Duarte**, 2019). El difícil acceso para los muestreos y la reducida área total de los humedales costeros (5-8 % de la superficie del planeta) (**Mitsch & Gosselink**, 2015) comparada con la de los ecosistemas de bosques, así como la falta de datos, explican que hayan sido excluidos durante tanto tiempo de las evaluaciones de almacenamiento de carbono en el paisaje (**Moritsch et al.**, 2021). En este contexto, es fundamental que se haga el inventario de los humedales existentes para cuantificar las reservas de CO₂ y adoptar estrategias de conservación, protección o restauración de estos ecosistemas naturales, con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (**Herr & Landis**, 2016).

El Perú cuenta con una variedad de humedales a lo largo de su territorio, los cuales comprenden lagos, lagunas y cochas, bofedales, humedales costeros, aguajales y pantanos amazónicos (**Ministerio del Ambiente**, 2015). Sólo los humedales costeros abarcan 12.173 ha según el mapa de la Autoridad Nacional del Agua del 2012; se conocen 95 humedales en el litoral peruano, que albergan una gran diversidad de flora y fauna (**Aponte & Cano**, 2013; **ProNaturaleza**, 2010). Tales ambientes coexisten con poblaciones humanas, las cuales usan los recursos de los humedales de forma sustentable solo en algunos casos (**Aponte & Ramírez**, 2011; **Aponte et al.**, 2014). Dicha coexistencia los expone a la degradación, pues la mayoría se encuentran en áreas urbanas con un crecimiento poblacional constante que no está sujeto al ordenamiento territorial (**Castillo & Huamantínco**, 2020), lo que pone en peligro su conservación y sus servicios (**Kandus et al.**, 2010).

La valoración económica del carbono en comunidades de plantas y sedimentos puede facilitar la rehabilitación de estos ecosistemas con potencial de mitigar el aumento de la concentración del CO₂ en la atmósfera que, como se sabe, acelera el cambio climático (**Ullman et al.**, 2013). El concepto de pagar por la conservación de las reservas de carbono en los ecosistemas costeros ha sido objeto de distintos informes de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, el Banco Mundial y diversas instituciones en distintas regiones del mundo (**Murray et al.**, 2019). Ello ha resultado en el interés creciente en torno a la formulación de mecanismos de retribución económica por su conservación y restauración (**Ullman et al.**, 2013).

En los últimos años, el humedal de Santa Rosa, ubicado al norte de Lima, ha suscitado considerable interés. En este ecosistema se han hecho estudios de caracterización de la vegetación en los que se han identificado 57 especies de plantas vasculares, lo que lo convierte en uno de los humedales más ricos en vegetación de la costa central peruana (**Gonzales et al.**, 2019; **Ramírez et al.**, 2010). Un estudio sobre sus comunidades vegetales evidenció cómo su estructura cambia por la incidencia de las actividades humanas, lo que ha desembocado en la formación de comunidades únicas como la vega mixta (**Aponte & Ramírez**, 2011). Este humedal se encuentra amenazado principalmente por el cambio en los usos del suelo para la agricultura y la ganadería (**Aponte & Cano**, 2013; **Castillo & Huamantínco**, 2020; **Ramírez et al.**, 2010); ello ha reducido el área de la vegetación que secuestra y almacena carbono, lo que luego se traduce en emisiones de toneladas de

CO₂ al ambiente (Hiraishi *et al.*, 2014). Para que este ecosistema siga contribuyendo a la captura y almacenamiento del CO₂ atmosférico y, en consecuencia, a evitar su emisión, es fundamental su conservación, protección y restauración (Howard *et al.*, 2017; Lovelock & Duarte, 2019). La evaluación de la vegetación y la valoración del servicio de captura de CO₂ permiten generar herramientas e información técnica para una gestión eficaz del área, que responda, además, a las necesidades de desarrollo económico de la región costera peruana (McKinley *et al.*, 2018).

En este sentido, el objetivo del presente trabajo fue estimar y valorar la reserva de carbono almacenada en las formaciones vegetales dominantes del ecosistema del humedal de Santa Rosa. Asimismo, los resultados obtenidos se compararon con otros ecosistemas del territorio nacional para así evaluar la importancia de este y otros humedales del desierto costero del Pacífico suramericano.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el humedal de Santa Rosa, ubicado en el distrito de Chancay, provincia de Huaral, zona norte de la región de Lima (11°36'01,4"S – 77°15'54,0"W). El área limita por el norte y el noroeste con el cerro El Cascajo, por el oeste y el sur con el océano Pacífico (playa El Cascajo), por el sureste con las zonas agrícolas de Peralvillo y Salinas Alta, y por el este con pequeñas elevaciones del Cerro Salinas (Ramírez *et al.*, 2010) (Figura 1). En la zona central del humedal se encuentra un cuerpo de agua donde abundan plantas acuáticas como *Pistia stratiotes* L. y *Eichhornia crassipes* (Mart.); el humedal se abastece de agua a través de varios canales y fuentes subterráneas formadas por el excedente del agua que llega directamente a los acuíferos por filtración debido al suelo arenoso (Ramírez *et al.*, 2010; Verones *et al.*, 2012). El humedal tiene 77,78 ha y se constituyó en área de conservación ambiental (ACA) desde el 25 de septiembre de 2020 mediante la Ordenanza Municipal N° 013-2020-MPH-CM.

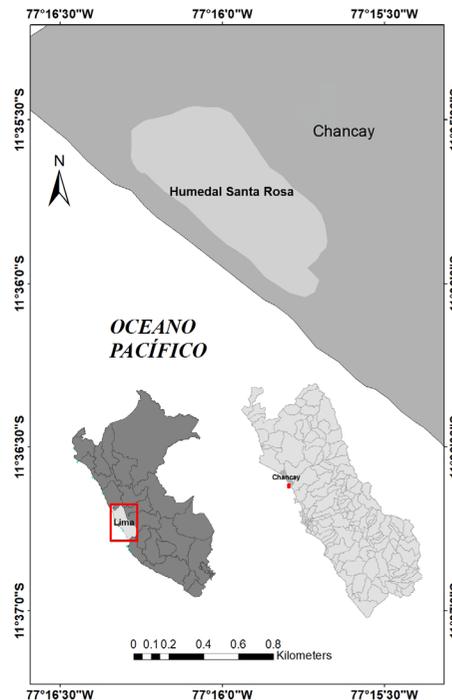


Figura 1. Ubicación del Humedal Santa Rosa (arriba), y los detalles de su ubicación en el Perú (inferior izquierda) y en el Distrito de Chancay (inferior derecha). La escala presentada corresponde al humedal. (Elaborado con el software Arcgis).

Delimitación de comunidades vegetales y ubicación de puntos de muestreo

Se evaluaron tres comunidades vegetales terrestres predominantes en el humedal según las descripciones de **González et al.** (2019) y **Ramírez et al.** (2010): a) totoral, donde predominan las especies *Thypha domingensis* Pers y *Enhydra sessilifolia* Cabrera; b) juncal, compuesto principalmente por *Schoenoplectus americanus* (Pers.) Volkart ex Schinz & R. Keller, y c) vega mixta, caracterizada por su porte bajo y compuesta por *Cyperus laevigatus* L, *Eleocharis geniculata* (L.) Roem. & Schult., *Bacopa monnieri* (L.) Edwall, *Hydrocotyle ranunculoides* L.F., *Paspalum vaginatum* Sw. y *Distichlis spicata* P.M. Peterson & Romasch.

Las comunidades vegetales en todo el humedal se delimitaron usando GPS (Garmin GPSMAP 64s). Posteriormente, los puntos se trasladaron a Google maps para establecer los polígonos (kml) y calcular el área de cada uno. Por último, a partir de los polígonos (shp) se elaboró el mapa de la distribución vegetativa del humedal con el programa ArcGis 10,3.

Una vez caracterizadas las comunidades vegetales, se procedió con la recolección de la biomasa siguiendo las técnicas empleadas en **Ampuero & Aponte** (2020), **Aponte et al.** (2021), **Howard et al.** (2014) y **Rügnitz et al.** (2009), con algunas modificaciones: se establecieron de manera dirigida tres transectos lineales (10 m) por comunidad vegetal; en cada transecto se ubicaron de manera aleatoria cuatro parcelas de 0,25 m² (0,5m x 0,5m) para un total de 36 parcelas en las que se hizo la recolección de la biomasa aérea (fresca y seca) y el suelo; para corroborar que el número de parcelas fuera representativo se utilizó una curva de rendimiento (**Elzinga et al.**, 2015). La recolección de las muestras se hizo en octubre del 2020.

Recolección de muestras

En cada parcela se evaluó la cantidad de carbono en dos compartimentos: a) la biomasa aérea, que comprende la biomasa vegetal fresca (BAF) y la seca (BAS) sobre el suelo, y b) el suelo a 0-10 cm y 10-20 cm de profundidad; las raíces se consideraron como parte del suelo.

Para la evaluación de la biomasa aérea se cortó a ras de suelo toda la vegetación que se encontraba en cada parcela; luego se registró por separado el peso de la fracción seca y de la fresca con una balanza digital previamente calibrada. En cada parcela se tomó una submuestra de 200 g de plantas secas y frescas para el posterior análisis de peso seco en el laboratorio y el cálculo de carbono (**Howard et al.**, 2014; **Rügnitz et al.**, 2009). En la vega mixta no se separó la vegetación seca de la fresca, ya que no fue posible hacerlo por su composición (pastos y ciperáceas principalmente), porte bajo y formación en macollos.

Para el estudio del carbono en el suelo se recolectaron cuatro muestras en cada parcela con ayuda de un barreno; luego se separaron en submuestras (en total 16 submuestras por comunidad) según la profundidad: 0-10 cm. y 10-20 cm. Estas submuestras se almacenaron y rotularon por profundidad para analizar la densidad aparente y calcular el carbono orgánico en el laboratorio.

Determinación del peso seco de las muestras

El peso seco de las muestras vegetales (BAS y BAF) se determinó mediante la técnica gravimétrica (**Howard et al.**, 2014); para ello, las muestras se pesaron antes y después del secado en estufa a 60 °C durante 96 horas (o hasta obtener un peso constante) en el laboratorio de ingeniería ambiental de la Universidad Científica del Sur.

Para calcular el porcentaje de humedad (H) de las muestras de BAF y BAS se utilizó la siguiente fórmula:

$$1. \dots\dots\dots \%H_x = (PS.100)/PH,$$

donde PS y PH son el peso seco y el húmedo de las muestras de vegetación.

El peso seco por parcela (PS_x) se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$2. \dots\dots\dots PS_x = (PF_x.\%H_x)/100,$$

donde PF_x es el peso de las BAF y las BAS en cada parcela y %H_x es su porcentaje de humedad en la respectiva parcela.

Densidad aparente del suelo

Para el cálculo del carbono en el suelo, fue necesario determinar la densidad aparente de este. Para ello, las muestras se secaron en una estufa a 105 °C durante 96 horas para obtener el peso seco y, posteriormente, se aplicó la siguiente fórmula:

$$3. \dots \dots \dots \rho_{\text{aps}} = m/V,$$

donde ρ_{aps} es la densidad aparente del suelo, expresada en kilogramos por metro cúbico; m es la masa de la muestra del peso seco expresada en kilogramos y V es el volumen de la muestra extraído en 10 cm del barreno (41,5 cm³).

Determinación del porcentaje de carbono orgánico (%C_x) de las muestras

Para determinar el %C_x en la vegetación y en el suelo, las muestras se enviaron al laboratorio de análisis de suelos, plantas de agua y fertilizantes de la Universidad Agraria la Molina, donde se analizaron mediante el método de Walkley y Black. Este método consiste en la oxidación húmeda de la materia orgánica utilizando dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) en presencia de ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado, proceso en el que se desprende calor por la reacción del H₂SO₄, lo que favorece la acción del K₂Cr₂O₇ para que oxide la materia orgánica. Por medio de la titulación se calcula el dicromato de potasio excedente y a partir de ello se estima el carbono orgánico fácilmente oxidable para, finalmente, obtener una medida del carbono orgánico total (**Palomino & Cabrera, 2008**).

Dicho método ha sido utilizado en estudios de captación de carbono en diferentes ecosistemas: comunidades de macroalgas, humedales andinos, bosques, manglares, turberas amazónicas y humedales costeros, entre otros (**Aponte et al., 2021; Chuquizuta et al., 2016; Crispin, 2015; Medrano et al., 2012**), lo que permitió comparar los valores de las existencias de carbono entre los distintos ecosistemas.

Reserva de carbono orgánico en cada formación vegetal

La reserva de carbono (Cx) de las comunidades vegetales se calculó con la siguiente fórmula:

$$4. \dots \dots \dots Cx \text{ (kg/m}^2\text{)} = PSx \text{ (kg)} \cdot \% Cx,$$

donde PSx es el peso seco de las muestras de BAF y BAS en cada parcela expresado en kilogramos por metro cuadrado y %Cx es el porcentaje de carbono de la vegetación correspondiente determinado en laboratorio.

La cantidad de carbono en el suelo se calculó a partir de la densidad aparente con la siguiente fórmula:

$$5. \dots \dots \dots DC_{\text{su}} \text{ (g/m}^3\text{)} = \rho_{\text{aps}} \text{ (g/m}^3\text{)} \cdot \%C,$$

donde DC_{su} es la densidad del carbono en el suelo expresada en gramos por metro cúbico; es la densidad aparente de la muestra seca del suelo expresada en gramos por metro cúbico y %C es el porcentaje del carbono hallado en la muestra del suelo en el laboratorio.

Luego se calculó el carbono almacenado en el suelo (C_{su}) con la siguiente fórmula:

$$6. \dots \dots \dots C_{\text{su}} \text{ (g/m}^2\text{)} = DC_{\text{su}} \text{ (g/m}^3\text{)} \times h \text{ (m)},$$

donde DC_{su} es la densidad del carbono en el suelo expresada en gramos por metro cuadrado y h es la profundidad de la muestra de suelo (0,1m).

Carbono total almacenado

Para obtener el carbono total almacenado se sumó el carbono de la biomasa aérea y el almacenado en el suelo; luego se multiplicó por el área que ocupa cada comunidad vegetal para obtener las toneladas totales. Para convertir las unidades de carbono en unidades de CO₂ acumulado, se multiplicaron los valores obtenidos por 3,67 (**Lohberger et al., 2018**), lo que equivale al peso de CO₂ que debe capturarse para obtener un gramo de carbono.

Análisis estadístico

Se realizaron análisis estadísticos descriptivos (promedios y coeficientes de variación). Posteriormente, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro Wilks y la prueba de Levene para verificar la homocedasticidad de varianzas; ambas pruebas se cumplieron (p>0,05) en

todos los casos. Posteriormente, se aplicó la prueba de ANOVA (si $p < 0,05$) y la prueba de Tukey para evaluar si había diferencia entre los compartimentos (BAF, BAS y suelo) de cada comunidad vegetal. Todas las pruebas se hicieron en el programa Past (Hammer *et al.*, 2001).

Cálculo del valor económico del CO₂ secuestrado por las comunidades vegetales evaluadas

El estudio buscó valorar económicamente el servicio de captura de carbono orgánico en el humedal de Santa Rosa con un método directo (Portela & Rivero, 2019), que consiste en la cuantificación del servicio ambiental para luego expresarlo en términos de su valor monetario según los mercados de carbono existentes (Zuluaga & Castro, 2018).

Para la estimación del valor económico del CO₂ secuestrado por las comunidades vegetales se multiplicó la cantidad de dióxido de carbono total calculada como reserva del área por el precio de mercado sugerido para la emisión de CO₂ equivalente para cada tonelada (Sapkota & White, 2020; Trinidad & Jakob, 2019).

Resultados

La **figura 2** muestra la distribución y la extensión de las comunidades vegetales evaluadas; se aprecia que la vega mixta abarcó 18,46 ha; el totoral, 12,62 ha, y el juncal, 5,41 ha; el área total de las tres comunidades vegetales estudiadas fue de 36,49 ha.

La representatividad de las mediciones de biomasa se verificó mediante las curvas de desempeño (**material suplementario 1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1925/3598>). En la **tabla 1** se registra la cantidad promedio de carbono almacenado en cada comunidad vegetal por unidad de área. El totoral registró la mayor cantidad de carbono almacenado, con $76,61 \pm 26,87$ TnC.ha⁻¹, seguido de la vega mixta, con $75,29 \pm 39,85$ TnC.ha⁻¹ y, por último, el juncal con $63,96 \pm 25,81$ TnC.ha⁻¹. El carbono almacenado en el total del área de cada comunidad vegetal fue de 1 390,21 TnC en la vega mixta; 966 TnC en el totoral y 346,31 TnC en el juncal. En las tres comunidades vegetales estudiadas el carbono almacenado fue de 2.703,02 TnC, las cuales equivalen a 9.920,07 TnCO₂.

La **figura 3** muestra la cantidad de carbono almacenado en las comunidades vegetales por compartimento (suelo y biomasa aérea); no se encontró diferencia significativa en el carbono total almacenado entre las tres comunidades ($p > 0,5$). Puede apreciarse que el suelo de 0-10 cm de profundidad almacenó la mayor cantidad de carbono en las tres comunidades vegetales comparado con los otros compartimentos estudiados (suelo de 10-

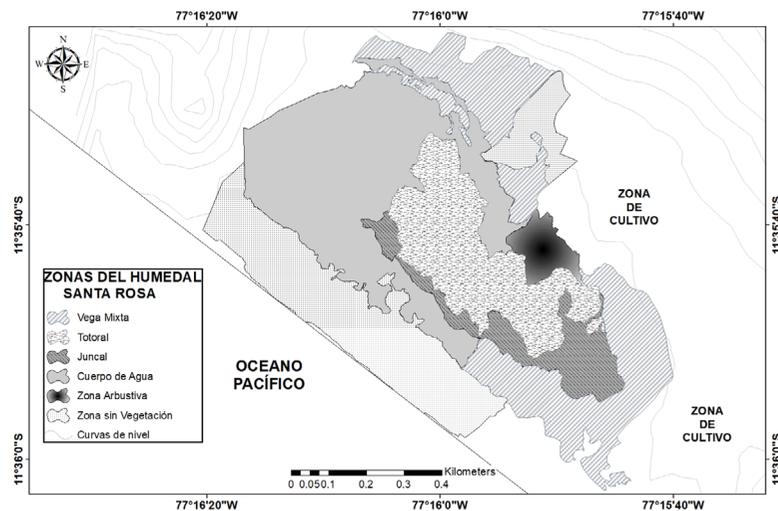


Figura 2. Mapa del humedal Santa Rosa y las comunidades vegetales (Totoral, juncal y vega mixta), junto con el cuerpo de agua. (Elaboración propia en ArcGis)

Tabla 1. Carbono almacenado en los compartimentos de las comunidades vegetales (totoral, juncal y vega mixta) y carbono total almacenado en el área de cada comunidad y su conversión a dióxido de carbono. Para cada estrato se muestra el promedio \pm coeficiente de variación.

Comunidad Vegetal	Compartimento	TnC/ha	Total de C por compartimento (TnC/ha)	Área (ha)	Carbono total almacenado (TnC)	Dióxido de carbono secuestrado (TnCO ₂)
Vega mixta	Biomasa vegetal	3,82 \pm 69,17				
	Suelo de 0-10 cm	42,94 \pm 69,46	75,29 \pm 39,85	18,46	1 390,21	5 102,07
	Suelo de 10-20 cm	28,53 \pm 28,07				
Totoral	Biomasa vegetal	27,90 \pm 26,23				
	Suelo de 0-10 cm	34,25 \pm 58,52	76,61 \pm 26,87	12,62	966,50	3 547,05
	Suelo de 10-20 cm	14,46 \pm 37,62				
Juncal	Biomasa vegetal	24,10 \pm 28,8				
	Suelo de 0-10 cm	25,70 \pm 28,14	63,96 \pm 25,81	5,41	346,31	1 270,95
	Suelo de 10-20 cm	14,16 \pm 63,57				

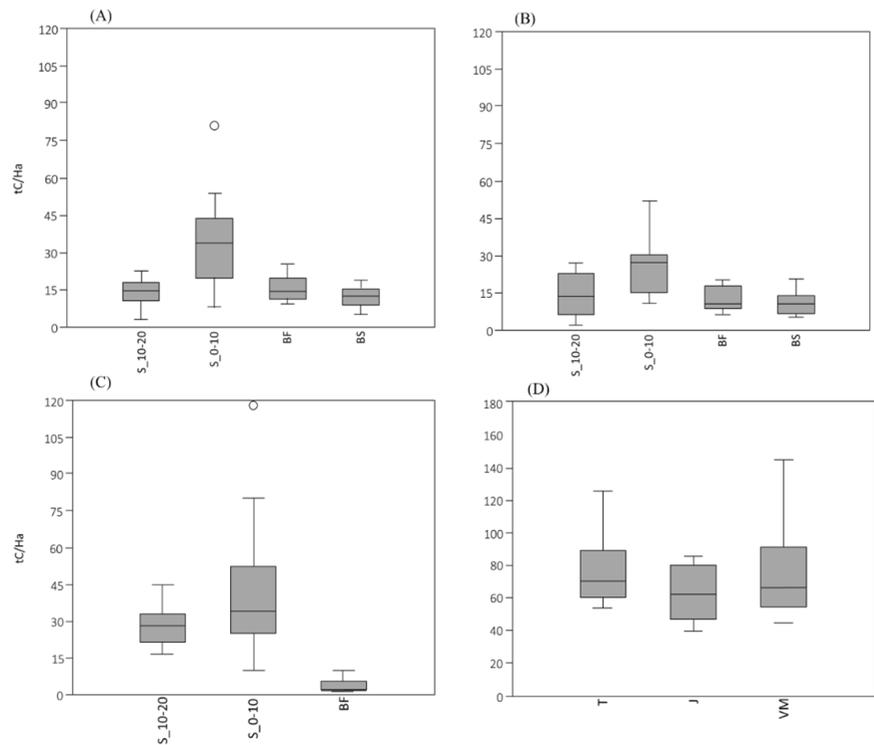


Figura 3. Reservas de Carbono en los diferentes compartimentos de las tres comunidades vegetales (tC/ha) y comparación de tC/ha totales en las comunidades vegetales. (A)= Totoral, (B)= Juncal, (C) Vega Mixta y (D) comparación de tC/ha de las 3 comunidades vegetales (T=Totoral, J=Juncal y VM= Vega mixta); S_10-20 = Suelo de 10cm – 20cm, S_0-10 = Suelo de 0cm – 10cm, BF= Biomasa fresca, BS= Biomasa seca.

20 cm, BAF y BAS; $p < 0,05$). En la vega mixta se observó que el 95 % del carbono se almacenaba en el suelo y sólo el 5 % se encontró en la biomasa aérea de dicha comunidad; en el juncal, el carbono almacenado en el suelo representó el 62 % con respecto al carbono almacenado en la biomasa aérea (38 %); por último, en el totoral el carbono almacenado en el suelo representó el 64 %, en tanto que el 36 % se encontró en la biomasa aérea.

Valor económico del CO₂ secuestrado

Considerando el precio en el mercado voluntario de carbono, que oscila entre 0,50 y 50 dólares por TnCO₂, con un promedio global de tres dólares por TnCO₂ (Sapkota & White, 2020), la reserva de carbono en el humedal de Santa Rosa tendría un valor entre los 4.879 y los 487.852 dólares. El Perú contempla un precio implícito del carbono de 6,39 dólares, el cual expresa su costo social (Trinidad & Jakob, 2019). Aplicándolo a las reservas de carbono equivalente en el humedal de Santa Rosa, el precio ascendería a 62.347 dólares.

Discusión

Comparación de las reservas de carbono de los humedales con otros ecosistemas

El humedal de Santa Rosa presenta variación en la cantidad de carbono almacenado por comunidad vegetal, lo cual depende de la estacionalidad, el gradiente de salinidad, la composición de especies, la fertilidad del suelo y las formas estructurales de la vegetación como lo anotan Owers *et al.* (2018) y Perera *et al.* (2022), ya que en campo se pudo observar que el totoral y el juncal presentaban una densidad vegetal mayor a la vega mixta, lo que explica que se capturara más carbono aéreo en estas comunidades (Elsely-Quirk *et al.*, 2011). El almacenamiento de carbono en el suelo en las tres comunidades fue mayor al almacenado en la parte aérea; llama la atención que la vega mixta almacenó más que las otras dos comunidades, lo que se explicaría por la diferencia de densidades de los suelos, ya que en aquellos con grano de arena grueso los procesos de aireación y drenaje mejoran y ello facilita la descomposición (Elsely-Quirk *et al.*, 2011). En campo se pudo observar que la estructura del suelo de la vega mixta era más arenosa, lo que posiblemente influyó en la variación en el secuestro de carbono.

Diversos autores han estimado las reservas de carbono orgánico en humedales costeros peruanos, resultados que se presentan resumidos en la **tabla 2**. El ACA del humedal de Santa Rosa presenta una menor reserva de carbono total almacenado que el Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa (RVSLPV) (Ampuero & Aponte, 2020; Aponte *et al.*, 2021). Esta diferencia podría deberse a que el LPV es un área natural protegida que cuenta con actividades de conservación que podrían favorecer el crecimiento vegetal de sus comunidades (Pulido-Capurro & Bermúdez-Díaz, 2018), lo que se suma a la poca intervención humana en comparación con el humedal de Santa Rosa (Aponte & Cano, 2013; Castillo & Huamantínco, 2020; Ramírez *et al.*, 2010). Comparado con otros humedales como Ventanilla (Cieza, 2014), Puerto Viejo (Palomino & Cabrera, 2008), Albuferas de Medio Mundo (Gutiérrez, 2017; Velásquez, 2017) y Villa María (Pérez *et al.*, 2015), el humedal de Santa Rosa almacena mayor cantidad de carbono por área. Las diferencias en las reservas y el almacenamiento de carbono pueden deberse al esfuerzo y condiciones de muestreo de los anteriores estudios; por ejemplo, Palomino & Cabrera (2008) sólo establecieron cinco puntos de muestreo, con un bajo esfuerzo de muestreo. En el estudio realizado de Gutiérrez (2017) en la Albufera de Medio Mundo se muestrearon comunidades vegetales de distintas edades, lo cual podría haber influenciado la cantidad

Tabla 2. Carbono almacenado en los compartimentos de la biomasa vegetal fresca (BAF) y la seca (BAS) de las comunidades vegetales

Comunidad vegetal	Compartimento	TnC/ha	Total de C por compartimento (TnC/ha)	Área (ha)	Carbono total almacenado (TnC)	Dióxido de carbono secuestrado (TnCO ₂)
Vega mixta	Biomasa aérea fresca	3,82 ± 69,17	3,82 ± 39,85	18,46	70,62	258,48
	Biomasa aérea seca	- -				
Totoral	Biomasa aérea fresca	15,51 ± 30,20	27,90 ± 26,87	12,62	351,96	1,288,18
	Biomasa aérea seca	12,39 ± 44,09				
Juncal	Biomasa aérea fresca	12,72 ± 42,54	24,10 ± 25,81	5,41	130,50	477,64
	Biomasa aérea seca	11,38 ± 44,75				

de biomasa y el consecuente cálculo de la reserva de carbono en dicho humedal; por ello, es importante acompañar las estimaciones con un indicador de representatividad, tal como se ha hecho en este estudio con las curvas de desempeño (**material suplementario 1**, <https://www.raccefn.co/index.php/raccefn/article/view/1925/3598>). Otros factores que influyen en el almacenamiento de carbono son la productividad primaria, la descomposición de la materia orgánica y la acumulación de sedimentos (**Hayes et al.**, 2017), lo que significa que cada humedal tiene una complejidad particular que se agudiza con las actividades antrópicas de las localidades circundantes (**Aponte & Ramírez**, 2011). Varios investigadores señalan que las diferencias entre las especies también son un factor importante que influye en el secuestro de carbono, porque las tasas de descomposición de la materia orgánica (**Dong et al.**, 2022; **Yao et al.**, 2019) y el porcentaje de carbono en sus tejidos (**Aldave & Aponte**, 2019) difieren entre especies. Como consecuencia de todo lo descrito, el carbono almacenado en las comunidades vegetales en Santa Rosa difiere de una a otra y de los otros humedales, lo que evidencia la gran variabilidad que puede existir en un mismo humedal y en ecosistemas similares.

Los datos sobre la reserva de carbono de otros ecosistemas del territorio peruano, como los bofedales, los lagos altoandinos, los bosques, aguajales y tillandsiales (**Tabla 2**), coinciden en que el almacenamiento de carbono se da en mayor porcentaje en el suelo. Los valores obtenidos en este estudio se asemejan a los del tillandsial Piedra Campana (Mala, Lima), donde el carbono almacenado en el suelo representó el 83,77 % (**Arévalo & Aponte**, 2020), así como en los bofedales del centro poblado Alto Perú en Tacna y los de la laguna de Conococha en Ancash, donde el carbono almacenado en el suelo representó el 73,6 y el 83 % del total, respectivamente (**Mita**, 2020; **Sequeiros & Cazorla**, 2020). Una situación similar se registró en un bosque montano de neblina del Perú en Cajamarca, donde el carbono almacenado en el suelo representó el 86,3 % del total calculado en los compartimentos (**Dilas-Jiménez & Huaman**, 2020).

Al comparar la reserva de carbono en la biomasa aérea del humedal de Santa Rosa (24,10 – 27,9 TnC/ha), puede constatar que superó la de los bofedales (20,48 TnC/ha), las lagunas altoandinas (5,72 – 30,65 TnC/ha) y los sotobosques (17,36 TnC/ha) (**Tabla 2, tabla 3**), lo que se debería a que la vegetación del humedal tiene mayor biomasa aérea, pues el tamaño de las totoras sobrepasa los tres metros de altura. Sucede lo contrario al comparar la cantidad de carbono almacenado en el suelo del humedal: los valores obtenidos fueron bajos en comparación con los otros ecosistemas, lo que se debería a las diferencias en la hidrodinámica, la composición y densidad de las especies vegetales, los parámetros fisicoquímicos, las tasas de descomposición, las condiciones climáticas, la textura del suelo (**Hayes et al.**, 2017) y la propia técnica utilizada (en nuestro caso se evaluó únicamente hasta los 20cm de profundidad).

Nuestros resultados muestran la importancia del almacenamiento de carbono de este humedal, incluso al compararlo con los valores más altos reportados en otros humedales y ecosistemas. Es necesario que en estudios futuros se evalúe a profundidad el flujo de carbono en el tiempo, con el fin de entender bien la dinámica del CO₂ y otros gases de efecto invernadero (como el metano) que también son liberados en el medio y contribuyen al cambio climático. El presente estudio sienta las bases para elaborar instrumentos de gestión del servicio de captura de carbono que ayudarán a elevar la categoría del humedal a ACA, lo que garantiza su mayor protección, y aporta valiosa información técnica para futuras investigaciones.

Valoración económica

Los estudios de valoración económica del servicio de captura de carbono orgánico en humedales costeros son muy escasos: en este se hace una aproximación a la valoración económica a partir del precio del carbono en el mercado voluntario de carbono establecido entre \$0,5 y \$50 por TnCO₂ (**Sapkota & White**, 2020). En otro estudio realizado en el humedal de la Laguna de Mejía se utilizó el método que calcula el costo del daño evitado a nivel global a partir de un costo social de 15\$/ha, lo cual asciende a \$4.425/ha por el

Tabla 3. Cuadro comparativo de carbono almacenado en el presente estudio y en otros humedales costeros y distintos ecosistemas

Lugar de estudio	Comunidad vegetal/Usos de suelo	Compartimento	TnC/ha	TnCO ₂ /ha	Referencia
<i>Humedales costeros</i>					
Humedal de Santa Rosa - Chancay	Juncal	Biomasa aérea	24,10	88,45	Presente estudio
		Suelo	39,86	146,29	
	Totoral	Biomasa aérea	27,90	102,39	
		Suelo	48,71	178,77	
	Vega mixta	Biomasa aérea	3,82	14,02	
		Suelo	71,47	262,29	
Pantanos de Villa	Juncal	Biomasa aérea	53,23	195,35	Ampuero & Aponte (2020)
		Suelo	252,14	925,35	
	Totoral	Biomasa aérea	63,05	231,39	Aponte <i>et al.</i> (2021)
		Suelo	61,66	226,29	
	Gramadal	Biomasa aérea	48,07	176,41	
		Suelo	37,39	137,22	
Puerto Viejo	Juncal	Biomasa aérea	11,10	40,74	Palomino & Cabrera (2008)
		Suelo	106,50	390,86	
	Totoral	Biomasa aérea	20,10	73,77	
		Suelo	18,37	67,41	
	Salicornial	Biomasa aérea	3,30	12,11	
		Suelo	8,41	30,86	
	Gramadal	Biomasa aérea	11,00	40,37	
		Suelo	17,55	64,41	
Albufera de Medio Mundo	Totoral	Biomasa aérea	15,25	55,96	Velásquez (2017)
		Suelo	13,87	50,90	
	Juncal	Biomasa aérea	11,50	42,21	Gutiérrez (2017)
		Suelo	49,46	181,52	
Humedal de Ventanilla	Totoral	Biomasa aérea	18,53	68,00	Cieza (2014)
		Raíz	13,00	47,71	
	Juncal	Biomasa aérea	13,77	50,54	
		Raíz	9,41	34,53	
	Gramadal	Biomasa aérea	14,89	54,65	
		Raíz	7,89	28,96	
	Salicornial	Biomasa aérea	13,49	49,51	
		Raíz	10,10	37,07	
Humedal de Villa María, Ancash	Totoral	Biomasa aérea	16,83	61,77	Pérez <i>et al.</i> , (2015)
		Raíz	6,09	22,35	

Lugar de estudio	Comunidad vegetal/Usos de suelo	Compartimento	TnC/ha	TnCO ₂ /ha	Referencia	
<i>Ecosistemas distintos a los humedales costeros</i>						
Lago Chinchaycocha	Totoral	Biomasa aérea	30,65	112,49	Medrano (2012)	
		Pajonal	Biomasa aérea	7,02		25,76
		Raíz	8,41	30,86		
Bofedales del centro poblado Alto Perú, Tacna	Cobertura vegetal	Biomasa aérea	41,53	152,42	Sequeiros & Cazorla (2020)	
		Suelo	272,83	1 001,29		
Bofedales de la laguna Conocha-Recuay - Ancash	Vegetación predominante bofedal 2	Biomasa aérea	63,14	231,72	Mita (2020)	
		Suelo	330,87	1 214,29		
	Vegetación predominante bofedal 2	Biomasa aérea	20,48	75,16		
		Suelo	367,00	1 346,89		
Bosque Montano de neblina - San Ignacio Cajamarca	Sotobosque y hojarasca	Biomasa aérea	17,36	63,71	Dilas-Jiménez & Jiménez (2020)	
		Suelo	108,97	399,92		
Piedra Campana - Lima	Tillandsial	Biomasa aérea	0,59	2,17	Arévalo & Aponte (2020)	
		Suelo	3,05	11,19		

servicio de captura de carbono de tres especies de flora (**Alencastre & Zafra, 2020**) y difiere de la valorización en Santa Rosa, la cual ascendería a \$1.708 por hectárea. En otro estudio realizado en un humedal altoandino de Chalhuanca (Arequipa) se utilizó el costo social establecido por el Ministerio de Economía y Finanzas (\$7,1 por TnC), y se obtuvo un valor de \$ 6.462,18 por hectárea (**Alvis-Ccoropuna et al., 2021**). La valoración se hace con base en el cálculo de la reserva de carbono orgánico cuantificada en el ecosistema y el precio por TnCO₂ según el método y el mercado que se elija. Dicha valoración puede revelar la importancia de las estructuras y procesos naturales para la salud de estos ecosistemas y aumentar la eficiencia en la toma de decisiones en las zonas costeras (**Zamboni et al., 2021**)

En los últimos años Perú ha implementado diversas políticas relacionadas con la energía y el clima, incluso contamos con la Ley Marco de Cambio Climático; sin embargo, ninguna de estas considera explícitamente el precio del carbono como una medida de mitigación (**Trinidad & Jakob, 2019**). La mayor parte de la financiación climática se da a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) que se formalizó a través del Protocolo de Kioto (**Yamin, 2012**), pero más del 80 % de su cartera se concentra en proyectos que buscan mejorar la eficiencia energética, en tanto que los proyectos de forestación y reforestación representan menos del 1 % de la financiación (**Vanderklift et al., 2019**). Es necesario que se fomente una economía basada en el carbono azul en los lugares cercanos a las costas, con el fin de generar fondos significativos para la protección y restauración de estos ecosistemas (**Wan et al., 2021**) utilizando metodologías estandarizadas de estimación de servicios ecosistémicos y con un inventario definido para que los inversionistas puedan estimar las compensaciones de carbono azul.

Nuestro estudio en el humedal de Santa Rosa evidenció que se trata de un ecosistema importante como sumidero de CO₂, con más de 9.000 toneladas de CO₂. El cambio en los usos del suelo en la zona y la degradación y pérdida que ello representa implica un riesgo de emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Nuestros análisis son de suma importancia, ya que evidencian el valor económico de uno de los servicios ecosistémicos

de suma importancia para la mitigación y adaptación frente al cambio climático. Asimismo, aportan herramientas de gestión para los responsables de las decisiones que permiten incorporarlo en los mercados voluntarios de carbono. En un estudio reciente (**Valles-Maravi et al.**, 2020) se identificaron 14 alternativas de financiamiento para la conservación del LPV entre las cuales se destacan los mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos y los mercados de carbono; los primeros cuentan con un marco legal (Ley 30215) directamente relacionado con el secuestro y almacenamiento de carbono azul y carbono neutral. El humedal Santa Rosa puede aprovechar estos mecanismos de financiación para su preservación y conservación; en este sentido, el presente estudio facilita el soporte para aplicarlos al resaltar la importancia de la diversidad que alberga (**Apeño**, 2022; **Gonzales et al.**, 2019; **Ochoa Balbacea et al.**, 2022; **Ramírez et al.**, 2010).

Conclusiones

El humedal de Santa Rosa constituye un ecosistema de gran valor por su capacidad de secuestro y almacenamiento de carbono (2.703,02 TnC, equivalentes a 9.920,07 TnCO₂). Nuestros resultados se suman al inventario de otros humedales costeros peruanos en estudios similares que han demostrado el gran potencial de estos ecosistemas como almacenes de carbono. Estos estudios sirven de base científica para generar herramientas que los responsables de las decisiones pueden emplear para lograr la conservación de los humedales costeros y evitar que se pierdan sus servicios ecosistémicos.

Información suplementaria

Ver la información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1925/3598>

Agradecimientos

A la Dirección General de Investigación, Desarrollo e Innovación - D.G.I.D.I. de la Universidad Científica de Sur por el financiamiento de la investigación; al Comité de Vigilancia del humedal de Santa Rosa por las facilidades brindadas en el lugar; a los laboratorios de ingeniería ambiental y biología marina por facilitarnos materiales para el muestreo y el uso de sus instalaciones, y a Leslie Carmen Alberca por el apoyo en el muestreo de campo.

Contribución de los autores

RCh realizó el muestreo en campo, los ensayos en laboratorio, el procesamiento de datos y la redacción del manuscrito. HA brindó apoyo en el procesamiento de datos, verificó el análisis estadístico, y participó en la redacción del manuscrito.

Referencias

- Adame, M. F., Zakaria, R. M., Fry, B., Chong, V. C., Then, Y. H. A., Brown, C. J., Lee, S. Y.** (2018). Loss and recovery of carbon and nitrogen after mangrove clearing. *Ocean and Coastal Management*, 161, 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.04.019>
- Aldave, T. & Aponte, H.** (2019). Estudio comparativo del porcentaje de carbono entre especies de flora vascular de los Pantanos de Villa (Lima-Perú). *Arnaldoa*, 26(2), 751-760. <https://doi.org/10.22497/ARNALDOA.262.26216>
- Alencastre, L. & Zafra, J.** (2020). *Evaluación económica del servicio ambiental de captura de carbono de tres especies de flora del Humedal de la Laguna de Mejía, Distrito de Mejía – Islay, 2019* [Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/58201>
- Alvis-Ccoropuna, T., Villasante-Benavides, J. F., Pauca-Tanco, G. A., Quispe-Turpo, J. del P., Luque-Fernández, C. R.** (2021). Cálculo y valoración del almacenamiento de carbono del humedal altoandino de Chalhuanca, Arequipa (Perú). *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 23(3), 139-148. <https://doi.org/10.18271/RIA.2021.314>
- Ampuero, W. & Aponte, H.** (2020). Estimación del carbono almacenado en un juncal de *Schoenoplectus americanus* en el humedal costero Los Pantanos de Villa (Lima-Perú). *Arnaldoa*, 27(1), 267-282. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.271.27117>

- Apeño, A. & Aponte, H.** (2022). Caracterización de la diversidad de aves en un humedal altamente intervenido del Pacífico suramericano. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(179), 380-392. <https://doi.org/10.18257/racefyn.1605>
- Aponte, H. & Cano, A.** (2013). Estudio florístico comparativo de seis humedales de la costa de Lima (Perú): Actualización y nuevos retos para su conservación. *Revista Latinoamericana de Conservación* 3(2), 15-27. http://aplicaciones.cientifica.edu.pe/repositorio/catalogo/_data/5.pdf
- Aponte, H., Corvacho, M. F., Lertora, G., Ramírez, D. W.** (2021). Reserva de carbono en un humedal del desierto costero de Sudamérica. *Gayana Botánica*, 78(2), 184-190. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432021000200184>
- Aponte, H. & Ramírez, D.** (2011). Humedales de la costa central del Perú: Estructura y amenazas de sus comunidades vegetales. *Ecología Aplicada*, 10 (1). <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v10n1/a04v10n1>
- Arévalo, J. & Aponte, H.** (2020). Almacenamiento de carbono y agua en *Tillandsia latifolia* Meyen en un sector del Tillandsial de Piedra Campana (Lima/Perú). *Ecología Aplicada*, 19(1), 9-15. <https://doi.org/10.21704/REA.V19I1.1441>
- Castillo, R. M. & Huamantínco, A. A.** (2020). Spatial variation of the aquatic macroinvertebrates community in the littoral zone of the Santa Rosa Coastal Wetland, Lima, Peru. *Revista de Biología Tropical*, 68(1), 50-68. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i1.35233>
- Chuquizuta, P. D., Ruiz, G. F., Salas, C. T., López, L. A.** (2016). Carbono almacenado en cinco sistemas de uso de tierra, en la región San Martín Perú. *RINDERESU*, 1(2), 57-67. <http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/22/06>
- Cieza, M.** (2014). Estimación de la captura de dióxido de carbono por la flora del Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla. [Universidad Federico Villareal]. In *Universidad Federico Villareal*. <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/716>
- Crispin, M.** (2015). Valoración económica ambiental de los bofedales del distrito de Pilpichaca Huancavelica Perú [Universidad Nacional Agraria La Molina]. *Universidad Nacional Agraria La Molina*. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1584>
- Dilas-Jiménes, J. O. & Huaman, A. O.** (2020). Captura de carbono por un bosque montano de neblina del Perú. *Alpha Centauri*, 1(3), 13-25. <https://doi.org/10.47422/ac.v1i3.16>
- Dong, L., Li, J., Liu, Y., Hai, X., Li, M., Wu, J., Wang, X., Shangguan, Z., Zhou, Z., Deng, L.** (2022). Forestation delivers significantly more effective results in soil C and N sequestrations than natural succession on badly degraded areas: Evidence from the Central Loess Plateau case. *CATENA*, 208, 105734. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2021.105734>
- Elsey-Quirk, T., Seliskar, D. M., Sommerfield, C. K., Gallagher, J. L.** (2011). Salt marsh carbon pool distribution in a mid-Atlantic Lagoon, USA: Sea level rise implications. *Wetlands*, 31(1), 87-99. <https://doi.org/10.1007/S13157-010-0139-2>
- Elzinga, C., Salzer, D., Willoughby, J.** (2015). *MEASURING & MONITORING Plant Populations*. Bureau of Land Management National Business Center. https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/490a.pdf
- González, S., Aponte, H., Cano, A.** (2019). Actualización de la flora vascular del humedal Santa Rosa - Chancay (Lima, Perú). *Arnaldoa*, 26(3), 867-882. <https://doi.org/10.22497/ARNALDOA.263.26303>
- Gutiérrez, C.** (2017). Estimación de la captura de CO₂ en el Juncal del área de conservación regional La Albufera de Medio Mundo (ACRAMM) - Huaura, Lima Perú. [Universidad Católica Sedes Sapientae]. *Universidad Católica Sedes Sapientae*. <https://repositorio.uccs.edu.pe/handle/20.500.14095/303>
- Hammer, Ø., Harper, D., Ryan, P.** (2001). Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4-(1), 178. http://palaeo-electronica.orghttp://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Hayes, M. A., Jesse, A., Hawke, B., Baldock, J., Tabet, B., Lockington, D., Lovelock, C. E.** (2017). Dynamics of sediment carbon stocks across intertidal wetland habitats of Moreton Bay, Australia. *Global Change Biology*, 23(10), 4222-4234. <https://doi.org/10.1111/gcb.13722>
- Herr, D. & Landis, E.** (2016). *Coastal blue carbon ecosystems Opportunities for Nationally Determined Contributions. Policy brief*. IUCN and TNC. www.bluecsolutions.org
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N.** (eds) (2014). *2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands*. IPCC.
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., Pidgeon, E.** (eds). (2014). *Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses*. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature; International Union for Conservation of Nature (IUCN). <https://www.cifor.org/knowledge/publication/5095/>

- Howard, J., Sutton-Grier, A., Herr, D., Kleypas, J., Landis, E., Mcleod, E., Pidgeon, E., Simpson, S.** (2017). Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15 (1), 42–50. <https://doi.org/10.1002/fee.1451>
- Kandus, P., Morandeira, N., Schivo, F.** (2010). Bienes y servicios ecosistémicos de los humedales del Delta del Paraná. *Wetlands International*, 1, 32. http://www.produccion-animal.com.ar/regiones_ganaderas/27-Ecosist_del_Delta-2010.pdf
- Lohberger, S., Stängel, M., Atwood, E. C., Siegert, F.** (2018). Spatial evaluation of Indonesia's 2015 fire-affected area and estimated carbon emissions using Sentinel-1. *Global Change Biology*, 24 (2), 644–654. <https://doi.org/10.1111/GCB.13841>
- Lovelock, C. E. & Duarte, C. M.** (2019). Dimensions of blue carbon and emerging perspectives. In *Biology Letters* (Vol. 15, Issue 3). Royal Society Publishing. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0781>
- McKinley, E., Aller-Rojas, O., Hattam, C., Germond-Duret, C., San Martín, I. V., Hopkins, C. R., Aponte, H., Potts, T.** (2018). Charting the course for a blue economy in Peru: a research agenda. *Environment, Development and Sustainability*, 21 (5), 2253–2275. <https://doi.org/10.1007/S10668-018-0133-Z/TABLES/1>
- Medrano, R., Chupan, L., Vila, M.** (2012). Almacenamiento de carbono en especies predominantes de flora en el lago Chinchaycocha. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 02 (02), 110–117. <https://doi.org/10.18259/acs.2012013>
- Ministerio del Ambiente.** (2015). *Estrategia Nacional de Humedales*. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/01/Anexo-Decreto-Supremo-Nº-004-2015-MINAM2.pdf>
- Mita, M.** (2020). Evaluación de la captura de carbono en los bofedales de la laguna de conococha en base a la especie de flora predominante del área de estudio - provincia de Recuay - departamento de Ancash – 2018 [Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. *Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo*. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4145>
- Mitsch, W. & Gosselink, J.** (2015). Wetlands Fifth Edition. *Wi Ley*, 91 (5), 721.
- Moritsch, M. M., Young, M., Carnell, P., Macreadie, P. I., Lovelock, C., Nicholson, E., Raimondi, P. T., Wedding, L. M., Lerodiacou, D.** (2021). Estimating blue carbon sequestration under coastal management scenarios. *Science of the Total Environment*, 777, 145962. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145962>
- Murray, N. J., Phinn, S. R., DeWitt, M., Ferrari, R., Johnston, R., Lyons, M. B., Clinton, N., Thau, D., Fuller, R. A.** (2019). The global distribution and trajectory of tidal flats. *Nature*, 565(7738), 222-225. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0805-8>
- Ochoa-Balbacea, D., Gonzáles, S., Apeño, A., Aponte, H.** (2022). Hábitats prioritarios en un humedal costero del Pacífico: Propuesta de un índice basado en servicios ecosistémicos. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(178), 182-191. <https://doi.org/10.18257/raccefy.1569>
- Owers, C. J., Rogers, K., Woodroffe, C. D.** (2018). Spatial variation of above-ground carbon storage in temperate coastal wetlands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 210, 55–67. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2018.06.002>
- Palomino, D. & Cabrera, C.** (2008). Estimación del servicio ambiental de captura del CO₂ en la flora de los humedales de Puerto Viejo. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 10(2007), 49-59. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bivirtualdata/publicaciones/geologia/vol10_n20/a07.pdf
- Paredes-García, S. S., Moreno-Casasola, P., de la Barrera, E., García-Oliva, F., Lindig-Cisneros, R.** (2021). Biomass and carbon storage in a continental wetland in Cuitzeo, Michoacán, Mexico. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 12 (2), 416–441. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2021-02-09>
- Pérez, P., Luccini, E., Herrera, L., Parodi, M., Matar, M., Barrera, L., Mechni, M., Masramón, E.** (2015). Cuantificación de la captura de CO₂ por la flora nativa de totora en un humedal costero en Perú. *Energeia*, 13 (13), 73–80. <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/revistas/cuantificacion-captura-co2-flora-nativa.pdf>
- Portela, L. & Rivero, A.** (2019). Valoración económica de bienes y servicios ecosistémicos en montañas de Guamuha, Cienfuegos, Cuba. *Universidad y Sociedad*, 11(2019), 47-57. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202019000300047
- ProNaturaleza.** (2010). *Documento base para la elaboración de una estrategia de conservación de los humedales de la costa peruana*. GyG Impresores SAC. <https://docplayer.es/69539307-Humedales-de-la-costa-peruana.html>

- Pulido-Capurro, V. M. & Bermúdez-Díaz, L.** (2018). Estado actual de la conservación de los hábitats de los Pantanos de Villa, Lima, Perú. *Arnaldoa*, 25 (2), Article 2. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.252.25219>
- Ramírez, D., Aponte, H., Cano, A.** (2010). Flora vascular y vegetación del humedal de Santa Rosa (Chancay, Lima). *Revista Peruana de Biología*, 17(1), 105-110. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1727-99332010000100012&script=sci_arttext
- Rügnitz, M., Chacón M., Porro, R.** (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA). http://www.katoombagroup.org/documents/tools/ICRAF_GuiaDeterminacionCarbono_esp.pdf
- Sadat-Noori, M., Rankin, C., Rayner, D., Heimhuber, V., Gaston, T., Drummond, C., Chalmers, A., Khojasteh, D., Glamore, W.** (2021). Coastal wetlands can be saved from sea level rise by recreating past tidal regimes. *Scientific Reports*, 11 (1), 1196. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-80977-3>
- Sapkota, Y. & White, J. R.** (2020). Carbon offset market methodologies applicable for coastal wetland restoration and conservation in the United States: A review. *Science of The Total Environment*, 701, 134497. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.134497>
- Sequeiros, D. & Cazorla, J.** (2020). Servicio ambiental de captura de carbono de los bofedales del Centro Poblado Alto Perú, Tacna. *Ingeniería Investiga*, 2 (2), 357–375. <https://doi.org/10.47796/ING.V2I2.411>
- Trinidad, C. & Jakob, M.** (2019). *Precio al carbono en América Latina tendencias y oportunidades* (Vol. 1). SPDA. https://spda.org.pe/wpfb-file/precio-al-carbono-en-al_digital_6nov_2-pdf/
- Ullman, R., Bilbao-Bastida, V., Grimsdi TnCh, G.** (2013). Including Blue Carbon in climate market mechanisms. *Ocean and Coastal Management*, 83, 15–18. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.02.009>
- Valles-Maravi, P. A., Cabrera-Dionicio, C., Quispe-Alvay, A. A.** (2020). Identificación de potenciales fuentes económicas para el humedal de los Pantanos de Villa. *South Sustainability*, 3 (1), e045–e045. <https://doi.org/10.21142/SS-0301-2022-E045>
- Vanderklift, M. A., Marcos-Martínez, R., Butler, J. R. A., Coleman, M., Lawrence, A., Prislán, H., Steven, A. D. L., Thomas, S.** (2019). Constraints and opportunities for market-based finance for the restoration and protection of blue carbon ecosystems. *Marine Policy*, 107, 103429. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2019.02.001>
- Velásquez, V.** (2017). *Captura y almacenamiento de carbono relacionado con la totora Schoenoplectus californicus del Área de Conservación Regional Albufera de Medio Mundo-Végueta 2017*. Universidad Nacional Jose Faustino Sanchez Carrión.
- Verones, F., Bartl, K., Pfister, S., Vilchez, R. J., Hellweg, S.** (2012). Modeling the Local Biodiversity Impacts of Agricultural Water Use: Case Study of a Wetland in the Coastal Arid Area of Peru. *Environmental Science and Technology*, 46 (9), 4966–4974. <https://doi.org/10.1021/ES204155G>
- Wan, X., Li, Q., Qiu, L., Du, Y.** (2021). How do carbon trading platform participation and government subsidy motivate blue carbon trading of marine ranching? A study based on evolutionary equilibrium strategy method. *Marine Policy*, 130, 104567. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2021.104567>
- Yamin, F.** (2012). *Climate Change and Carbon Markets: A Handbook of Emissions Reduction Mechanisms*. Routledge. https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=gWWsBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=I2mnANKqcu&sig=kNOV1qgc3906rVCvnMnkXH06mGQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Yao, Y., Ge, N., Yu, S., Wei, X., Wang, X., Jin, J., Liu, X., Shao, M., Wei, Y., Kang, L.** (2019). Response of aggregate associated organic carbon, nitrogen and phosphorous to re-vegetation in agro-pastoral ecotone of northern China. *Geoderma*, 341, 172–180. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2019.01.036>
- Zamboni, N. S., Noletto Filho, E. M., Carvalho, A. R.** (2021). Unfolding differences in the distribution of coastal marine ecosystem services values among developed and developing countries. *Ecological Economics*, 189, 107151. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2021.107151>
- Zuluaga, L. & Castro, E. S.** (2018). Valoración de servicios ambientales por captura de CO2 en un ecosistema de Bosque seco Tropical en el municipio de El Carmen de Bolívar, Colombia. *Luna Azul*, 47, 01–20. <https://doi.org/10.17151/luaz.2019.47.1>