

# Cálculo y valoración del almacenamiento de carbono del humedal altoandino de Chalhuanca, Arequipa (Perú)

Calculation and valuation of carbon storage in the high Andean wetland of Chalhuanca, Arequipa (Peru)

Tania Alvis-Ccoropuna<sup>1</sup>, José Francisco Villasante-Benavides<sup>2</sup>, Gregory Anthony Pauca-Tanco\*<sup>3</sup>, Johana del Pilar Quispe-Turpo<sup>4</sup> y César Raúl Luque-Fernández<sup>5</sup>

## Abstract

High Andean wetlands are important ecosystems due to their ecosystem services. Carbon storage is a result of the low decomposition rate due to flooded soils and low temperatures. Consequently, this study estimated the carbon content stored in the high Andean wetland of Chalhuanca and calculated the economic value of this service. For this purpose, 30 samples were taken at random, establishing three carbon pools: aboveground biomass (leaves and stems), belowground biomass (roots), and organic soil. The samples were obtained with an auger-type device; each sample was dried at 65°C for at least 24 hours and the carbon content was determined using the Walkley-Black method and calculations and statistical tests were performed. The total carbon stored in relation to the area of the wetland was approximately 795,415.65 tons of CO<sub>2</sub>. The fraction of carbon per sample is higher in aerial biomass (49%), followed by organic soil (43.1%) and below ground biomass. On the other hand, the amount of carbon stored differs significantly between reservoirs, since organic soil stores the highest amount with 218.3 TC/ha (90%), followed by below-ground biomass (roots) with 19.7 TC/ha (8%), and above-ground biomass (leaves and stems) with 4.8 TC/ha (2%). Finally, the ecosystem service of carbon storage amounts to a cost of 6462.18 USD/ha, 5703132.34 USD in sum.

**Keywords:** ecosystem service, bofedal, biomass, peatland, climate change.

## Resumen

Los humedales altoandinos son ecosistemas importantes debido a sus servicios ecosistémicos. El almacenamiento de carbono, es resultado de la baja tasa de descomposición debido a los suelos inundados y las bajas temperaturas. En consecuencia, en este estudio, se estimó el contenido de carbono almacenado en el humedal altoandino de Chalhuanca y se calculó el valor económico de este servicio. Para esto, se tomaron 30 muestras al azar, estableciéndose tres reservorios de carbono: biomasa aérea (hojas y tallos), biomasa bajo suelo (raíces) y suelo orgánico. Las muestras fueron obtenidas con un dispositivo tipo barreno; cada muestra se desecó a 65°C por al menos 24 horas y se determinó el contenido de carbono mediante el método Walkley-Black y, se realizaron los cálculos y pruebas estadísticas. Se obtuvo que el carbono total almacenado, con relación al área del bofedal es de aproximadamente 795 415,65 toneladas de CO<sub>2</sub>. La fracción de carbono por muestra es mayor en la biomasa aérea (49%), seguido del suelo orgánico (43,1%) y biomasa bajo suelo. Por otro lado, la cantidad de carbono almacenado difiere significativamente entre reservorios, debido a que el suelo orgánico almacena la mayor cantidad con 218,3 TC/ha (90%), seguido de la biomasa bajo suelo (raíces) con 19,7 TC/ha (8%), y la biomasa aérea (hojas y tallos) con 4,8 TC/ha (2%). Finalmente, el servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono, asciende a un costo de 6462,18 USD/ha, con un total de 5703132,34 USD.

**Palabras clave:** servicio ecosistémico, bofedales, biomasa, turbera, cambio climático.

**Recibido:** 10/06/2021

**Aceptado:** 31/07/2021

**Publicado:** 15/08/2021

**Sección:** Artículo original

\*Autor correspondiente: [gpauca@unsa.edu.pe](mailto:gpauca@unsa.edu.pe)

## Introducción

Los humedales son ecosistemas en los cuales se observa una relación estrecha entre el biotopo terrestre y acuático, de tal manera que sus comunidades biológicas son particulares (Oyague y Cooper, 2020), constituyendo menos del 1,5% de la superficie terrestre y brindan servicios ecosistémico esenciales (Costanza *et al.*, 2014). En términos de producción de biomasa, los humedales altoandinos se encuentran entre los más productivos de la tierra, almacenando mayor cantidad de carbono por unidad de área, que cualquier otro ecosistema (Lolu *et al.*, 2020). Los humedales presentan un alto potencial

de secuestro y reciclaje de CO<sub>2</sub>, porque las plantas lo capturan y transforman, incorporándose al ciclo de

<sup>1</sup>Instituto de Investigación de Ciencia y Gestión Ambiental (ICIGA), Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Calle San Agustín 108, Arequipa, Perú ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0876-2117>.

<sup>2</sup>Departamento Académico de Biología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Daniel Alcides Carrión S/N La Pampilla, Arequipa, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6577-3122>.

<sup>3</sup>Instituto de Investigación de Ciencia y Gestión Ambiental (ICIGA), Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Calle San Agustín 108, Arequipa, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6367-5345>.

<sup>4</sup>Instituto de Investigación de Ciencia y Gestión Ambiental (ICIGA), Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Calle San Agustín 108, Arequipa, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6428-7229>.

<sup>5</sup>Departamento Académico de Biología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad

carbono, creando una interacción entre diversos factores bióticos, abióticos y antrópico (Galicia *et al.*, 2016; Marín *et al.*, 2011).

Los humedales son reconocidos a nivel mundial como unidades importantes debido a que cuentan con cerca del 50% del carbono almacenado en el suelo (Mitsch y Gosselink, 2000), presentándose como sumideros de carbono (Galicia *et al.*, 2016) y por lo tanto partícipes en la mitigación de los efectos del cambio climático planetario actual (Lolu *et al.*, 2020). Además, su importancia de proveer otros servicios ecosistémicos, como el balance hídrico, el mantenimiento de la biodiversidad, la producción de alimentos, ciclo de nutrientes y otros (Hernández, 2010).

El Perú cuenta con una gran diversidad de ecosistemas, resaltando dentro estos a los humedales altoandinos como uno de los más importantes y frágiles. En el Perú, estas turberas, o también conocidos como bofedales u oconales, cubren un área de 48 mil hectáreas, representando sólo el 0,42% de la superficie del país (MINAM, 2019a). A pesar de su importancia, y que varios de estos humedales altoandinos han sido declarados como sitios Ramsar, una gran parte se encuentran desprotegidos y son explotados constantemente, siendo su degradación más rápida que la de cualquier otro ecosistema (Roa-García y Brown, 2016). Desde hace algunos años se vienen investigando estos sistemas altoandinos sobre su rol y capacidad de fijación de CO<sub>2</sub> como agentes mitigadores de cambio climático (Hribljan *et al.*, 2015; Roa-García y Brown, 2016).

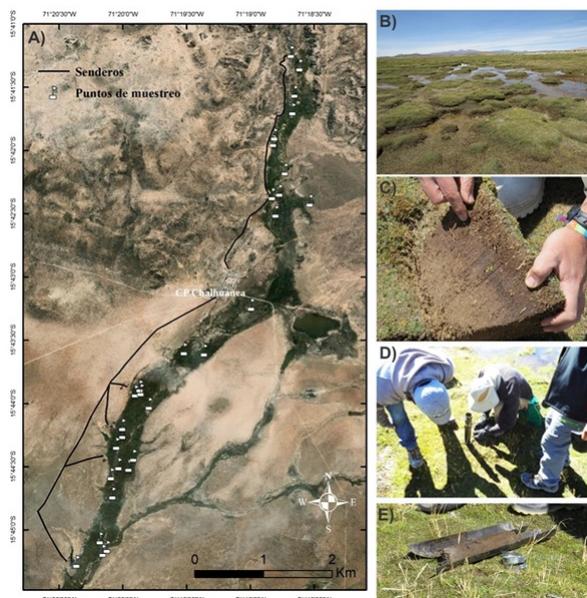
Los bofedales de puna son ecosistemas poco estudiados que enfrentan nuevos cambios en el contexto del manejo tradicional y moderno, como del cambio climático. El aumento de las actividades económicas impone nuevas demandas sobre el agua y los minerales que van en los cursos de agua nacientes donde se ubican las turberas para satisfacer las necesidades de los sectores privado y público peruano (Salvador *et al.*, 2010). Los humedales altoandinos, por lo tanto, enmarcan el desarrollo económico, social y cultural ya sea de manera directa o indirecta de la sociedad, integrándose al concepto de montología (Escobar-Mamani *et al.*, 2020; Haller y Branca, 2020). Así, este estudio pretende estimar la cantidad de carbono almacenado en el humedal altoandino de Chaluhanca y valorar económicamente este servicio ecosistémico.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El área de estudio se ubica en el centro poblado de Chaluhanca, en el extremo sureste de la provincia de Caylloma, distrito de Yanque en el sur de Perú. Se encuentra a una elevación de 4329-4436 msnm, en las coordenadas -15,73°-71,53°, dentro de la zona de amortiguamiento del área natural protegida de la Reserva Nacional de Salinas y Aguada Blanca (RNSAB) (Figura 1).

Las características climáticas son propias de la puna seca. Las temperaturas medias anuales fluctúan entre los 3 y 8°C, con mínimas absolutas que llegan hasta los -10°C; por otro lado, la precipitación anual fluctúa



**Figura 1.** A) Mapa del área de estudio mostrando las parcelas de muestreo seleccionadas aleatoriamente (banderas blancas) en el bofedal. B) Vista general del área. C) Corte transversal de una porción de vegetación. D) Proceso de extracción de muestras. E) Vista del equipo de extracción con la muestra obtenida.

entre los 200 mm (Pampa Arrieros) y 590 mm (Imata) (Coaguila *et al.*, 2010). Los bofedales de Chaluhanca son de carácter antropogénico, es decir, son creados mediante el manejo de los pobladores. Ocupan una superficie de 882,54 ha en época seca (Pauca-Tanco *et al.*, 2020), donde *Distichia muscoides* suele ser dominante con respecto a la vegetación característica de este tipo de ecosistemas. La hidrología y morfología del área de estudio está definida por la presencia del río Chaluhanca, el cual conforma parte de la cuenca hidrográfica del río Quilca (Mango, 2017).

### Obtención de datos

Este estudio se llevó a cabo durante los meses de agosto a diciembre de 2017, tomándose las muestras en campo a finales del mes de octubre (correspondiendo a la temporada seca). La delimitación del área de bofedal se realizó con una imagen satelital Landsat 8 (tomada para la fecha 16-07-2017) y el programa QGIS ver. 3.0. Al área delimitada, se superpuso una grilla con cuadrantes de 50x50 m, seleccionando aleatoriamente 30 de estos para la toma de muestras en campo (Figura 1). Una vez ubicados en el punto de muestreo (en campo), dentro del área establecida (50 m<sup>2</sup>, se ubicó la zona más elevada (Hribljan *et al.*, 2015) y se extrajo la muestra con un barreno tipo tubular (5,5 cm de diámetro, 30 cm de alto). Las muestras extraídas se caracterizaron visualmente y se separaron en tres

Nacional de San Agustín de Arequipa. Daniel Alcides Carrión S/N La Pampilla, Arequipa, Perú. ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-8050-461X>.

**Cómo citar:** Alvis-Ccoropuna, T., Villasante-Benavides, J. F., Pauca-Tanco, G. A., Quispe-Turpo, J. del P. y Luque-Fernández, C. R. (2021). Cálculo y valoración del almacenamiento de carbono del humedal altoandino de Chaluhanca, Arequipa (Perú). *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 23(3), 139–148. DOI: <https://doi.org/10.18271/ria.2021.314>.



Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) Share - Adapt

submuestras de acuerdo a los reservorios de carbono identificados, correspondiendo a biomasa aérea (hojas y tallos), biomasa bajo suelo (raíces) y suelo orgánico (materia orgánica en descomposición o turba). Por otro lado, en cuanto a la biomasa aérea, se identificaron las especies vegetales presentes. Finalmente, las muestras obtenidas y separadas fueron debidamente almacenadas, rotuladas y trasladadas al laboratorio. En gabinete, las muestras fueron secadas en una estufa a 65°C (por lo menos 24 horas), registrando el peso seco final en una balanza electrónica de precisión (hasta que está se haga continua), siendo posteriormente tratadas con el método de Walkley-Black para cuantificar el contenido de carbono en cada reservorio.

### Procesamiento de datos

Con los resultados obtenidos mediante el método aplicado, la estimación del contenido total de carbono orgánico y dióxido de carbono almacenado se realizó mediante las siguientes fórmulas:

1. Cálculo de las reservas de C almacenado (TC/ha) en biomasa seca aérea (ecuación 1) y bajo suelo (ecuación 2):

$$\begin{aligned} \text{CBA} &= (\text{PSM} \times \%C) / r^2 \times 100 \quad (1) \\ \text{CBS} &= (\text{PSM} \times \%C) / r^2 \times 100 \quad (2) \end{aligned}$$

Donde:

CBA: contenido de C en biomasa aérea (g/m<sup>2</sup>).

CBS: contenido de C en biomasa bajo suelo (g/m<sup>2</sup>).

PSM: peso seco de la muestra correspondiente (aérea y bajo suelo) (g).

%C: porcentaje de C correspondiente.

r: radio del muestreador tipo barreno (m). Para este estudio fue de 0.0275 m.

El CBA y CBS son calculados en g/m<sup>2</sup>, para la conversión a TC/ha se dividió el resultado total entre 100.

2. Cálculo de las reservas de carbono almacenado (TC/ha) en suelo orgánico (ecuación 3):

$$\text{CSO} = (\text{DA} \times \text{HBN} \times \%C) / 100 \quad (3)$$

Donde:

CSO: contenido de C en la muestra de suelo orgánico (g/m<sup>2</sup>).

DA: densidad aparente (g/m<sup>3</sup>) correspondiente.

HBN: altura de la muestra sólida (m).

% C: porcentaje de C correspondiente.

\* Los resultados se calculan en g/m<sup>2</sup>, para la conversión a TC/ha se dividió el resultado total entre 100.

3. Cálculo para cuantificar el C (TC/ha) en todo el sistema (ecuación 4):

$$\text{CBV} = \text{CBA} + \text{CBS} + \text{CSO} \quad (4)$$

Donde:

CBV: C en biomasa vegetal total.

CBA: C en biomasa aérea.

CBS: C en biomasa bajo suelo.

CSO: C en suelo orgánico.

4. Cálculo de las reservas de dióxido de carbono almacenado (T/CO<sub>2</sub>) (ecuación 5):

$$\text{CO}_2 = \text{C} \times \text{Kr} \quad (5)$$

Donde:

CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono atmosférico absorbido.

C: contenido de carbono total.

Kr: 44/12 (constante).

A partir de los promedios de CO<sub>2</sub> total calculado por hectárea (TC/ha), se realizó la estimación aproximada, extrapolando esta cantidad de CO<sub>2</sub> al área total cubierta por los bofedales de Chalhuanca (882,54 ha) (Pauca-Tanco *et al.*, 2020).

5. Valorización del almacenamiento de carbono como un servicio ecosistémico (ecuación 6):

$$\text{VC} = \text{CBB} \times \text{CSC} \quad (6)$$

Donde:

VC: costo total del C almacenado (en USD).

CBB: contenido total de C en los bofedales (toneladas de CO<sub>2</sub>/ha).

CSC: costo social del C (USD/tonelada de CO<sub>2</sub>/ha) \*.

\* El costo social para la tonelada de carbono en Perú es de 7,1 USD (Ministerio de Economía y Finanzas, 2019).

### Análisis de datos

Se calcularon los promedios y desviaciones estándar para las muestras y reservorios analizados. Se aplicó una prueba de análisis de varianza (ANOVA), previa normalización de los datos con la función  $\ln(x+1)$  y se aplicó la prueba de Levene. Posteriormente, al ANOVA se le realizó la prueba de Duncan para identificar las diferencias entre los reservorios.

## Resultados

### Frecuencia de los taxones en la biomasa aérea

En las muestras recolectadas se presentaron un total de 12 taxones vegetales repartidos en ocho géneros, seis familias y cuatro órdenes. La frecuencia de los taxones (Figura 2) presentó a *Phylloscirpus deserticola* como la más común en el bofedal (28%), seguida de *Werneria pygmaea* (15,7%) y *Distichia muscoides* (14,5%).

### Reservas de carbono almacenado por reservorio y sitio de muestreo

De manera muy clara se tiene que el reservorio de suelo orgánico presenta el mayor porcentaje (superior al 70%), seguido de la biomasa bajo suelo y biomasa aérea, mientras que el suelo mineral solo se presentó en algunas muestras (Figura 3). La cantidad de carbono en biomasa aérea fue calculada para un valor promedio de 1,13 g C/muestra, donde las muestras que presentaron un mayor

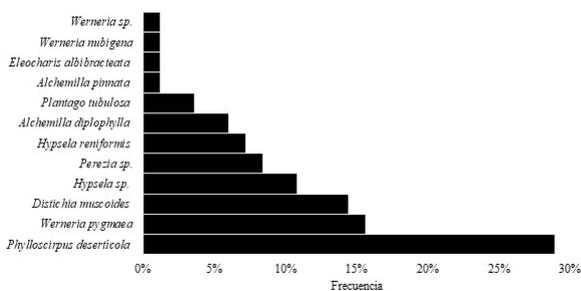


Figura 2. Frecuencia de especies vegetales en las parcelas de muestreo.

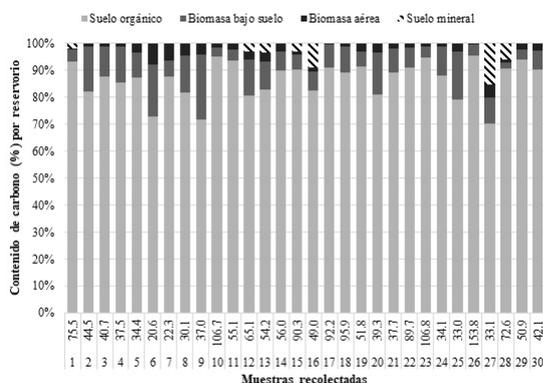


Figura 3. Porcentaje de carbono almacenado por muestra en cada reservorio en el bofedal de Chalhuanca, Arequipa, Perú. Se muestra el peso total de la muestra (gramos) en la base de la barra.

contenido de carbono corresponden a las que tuvieron presencia de *P. deserticola*, *E. albibracteata*, *A. pinnata*, *D. muscoides* y *Werneria sp.* Con respecto a la cantidad de carbono almacenado en biomasa bajo suelo (raíces), se calculó un valor promedio de 4,68 g C/muestra, por otro lado, el suelo orgánico presentó 51,86 g C/muestra en promedio.

*Fracción de carbono orgánico en biomasa seca y suelo (g C/g muestra)*

La fracción de carbono promedio para la biomasa aérea (hojas y tallos) fue de 49,1 %, la biomasa debajo del suelo (raíces) 42,5 % y suelo orgánico (material orgánico en descomposición) 43,1 % (Figura 4, Tabla 1). Por otro lado, en cuanto al suelo orgánico, se presentó con una profundidad promedio de 28 cm, y por debajo de este, aunque de manera poco constante, el suelo mineral de un color gris.

*Reservas de carbono almacenado por reservorio (TC/ha)*

La prueba de comparaciones múltiples de Duncan (Figura 5), entre los tres reservorios, muestra que hay diferencias significativas ( $F: 448,773; p < 0,05$ ). El suelo orgánico contiene la mayor cantidad carbono con 218,28 TC/ha (Figura 5, c), le sigue la biomasa bajo suelo con 19,72 TC/ha (figura 5, b) y biomasa aérea con 4,77 TC/ha (Figura 5, a), representando cada uno el 90 %, 8 % y 2 % del total, respectivamente (Tabla 2).

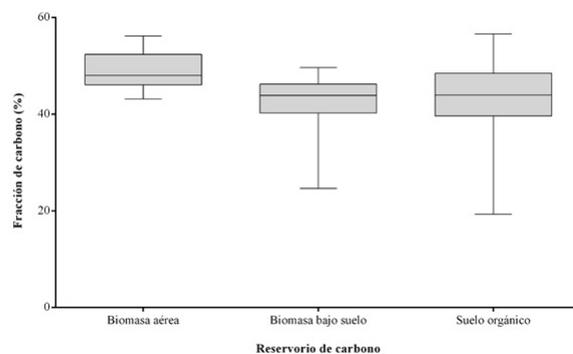


Figura 4. Fracción de carbono en biomasa seca (aérea y bajo suelo) y suelo (orgánico y mineral) expresado en porcentaje.

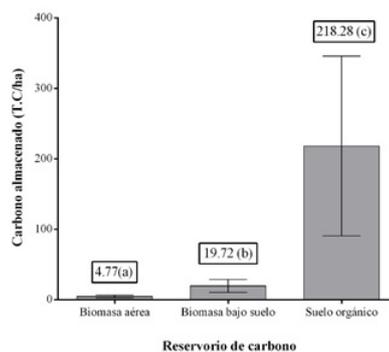


Figura 5. Carbono almacenado en cada reservorio (biomasa aérea, biomasa bajo suelo y suelo orgánico), expresado en toneladas por hectárea. Se observan los promedios y sus desviaciones estándar. La aplicación de la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene, no mostró diferencias significativas entre las mismas ( $p > 0,05$ ).

*Reservas de dióxido de carbono almacenado por hectárea en el sistema suelo vegetación (TCO<sub>2</sub>/ha)*

Las reservas totales de dióxido de carbono (TCO<sub>2</sub>/ha) se calcularon con base en las reservas de carbono orgánico total (TC/ha), obteniéndose aproximadamente un total de 795 415,65 TCO<sub>2</sub>. En ese sentido, para el área total de los bofedales de Chalhuanca se calculó un almacenamiento de 901,28 TCO<sub>2</sub>/ha. Adicionalmente se muestra valores de otros estudios (Tabla 3).

*Valoración del servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono*

Teniendo en cuenta el valor de TCO<sub>2</sub>/ha calculado para el área de estudio (901,28) y aplicando la fórmula correspondiente, se obtuvo un total de 6462,18 U\$D/ha. Finalmente, realizando el producto del costo obtenido por hectárea, con la extensión total del bofedal (882,54), se obtiene la cifra de 5703132,34 U\$D.

**Discusión**

*Carbono almacenado por reservorio y sitio de muestreo*

Las plantas registradas en este estudio son similares a las de Coaguila *et al.* (2010), quienes resaltan la frecuencia de *D. muscoides* (72,72 %) y *A. diplophylla* (54,54 %), mientras Salvador *et al.*, (2014) mencionan con la misma importancia a *D. muscoides*, *Plantago*

**Tabla 1.** Comparación de la fracción del porcentaje de carbono en biomasa aérea, bajo suelo y suelo orgánico en el presente estudio y otras investigaciones relacionadas.

BIOMASA AÉREA				
LUGAR	%C	Ecosistema	Ubicación	Autor
Chalhuanca	49,1	Bofedal	Arequipa-Perú	Este estudio
BIOMASA BAJO SUELO				
Chalhuanca	42,5	Bofedal	Arequipa-Perú	Este estudio
SUELO ORGÁNICO				
Microcuenca Bolillos	16,6-23,6	Humedal andino	Quíndio-Colombia	Roa-García y Brown, 2016
Parque Nacional Tuni Condoriri	47,8	Bofedal	La Paz-Bolivia	Hribljan <i>et al.</i> , 2015
Pueblo Manasaya	23,9	Bofedal	Oruro-Bolivia	Hribljan <i>et al.</i> , 2015
Lago Chinchaycocha	39,3	Bofedal	Junín-Perú	Medrano <i>et al.</i> , 2012
Cajamarca	18-36	Humedal andino	Cajamarca	Cooper <i>et al.</i> , 2010
Chalhuanca	43,1	Bofedal	Arequipa-Perú	Este estudio

**Tabla 2.** Reservas de carbono (TC/ha) en biomasa aérea, bajo suelo y suelo, en el presente estudio y en otros humedales.

BIOMASA AÉREA				
Lugar	Tipo	TC/ha	Ubicación	Autor
Lago Chinchaycocha	Bofedal	<5,0	Junín-Perú	Medrano <i>et al.</i> , 2012
Chalhuanca	Bofedal	4,8	Arequipa-Perú	Este estudio
BIOMASA BAJO SUELO				
SNLM	Humedal costero*	7,5	Arequipa-Perú	Morocco, 2014
Lago Chinchaycocha	Bofedal	<5,0	Junín-Perú	Medrano <i>et al.</i> , 2012
Chalhuanca	Bofedal	19,7	Arequipa-Perú	Este estudio
SUELO				
Rva. Ecológica Antisana	Humedal altoandino	42,6 – 70,7	Quito-Ecuador	Suárez <i>et al.</i> , 2016
Parque Nacional Cajas	Humedal altoandino	29,5 – 44,2	Azuay-Ecuador	Suárez <i>et al.</i> , 2016
Microcuenca Barro Blanco	Humedal andino	135,1	Quíndio-Colombia	Roa-García y Brown, 2016
Microcuenca Bolillos	Humedal andino	107,8-134,5	Quíndio-Colombia	Roa-García y Brown, 2016
Tocra	Bofedal	47,0 – 77,0	Arequipa-Perú	León, 2016
Lago Chinchaycocha	Bofedal	684,6	Junín-Perú	Medrano <i>et al.</i> , 2012
Pueblo de Manasaya	Bofedal	1040,0	Oruro-Bolivia	Hribljan <i>et al.</i> , 2015
Pque. Nac. Tuni Condoriri	Bofedal	572,0	La Paz-Bolivia	Hribljan <i>et al.</i> , 2015
Chalhuanca	Bofedal	218,3	Arequipa-Perú	Este estudio

**Tabla 3.** Reservas de carbono (TC/ha) almacenado en este estudio y en otros en bofedales

Lugar	Tipo	TCO <sub>2</sub> /ha	Ubicación	Autor
Pilpichaca	Bofedal	518,8	Huancavelica-Perú	Crispín y Jiménez, 2019
Chalhuanca	Bofedal	1176,35	Arequipa-Perú	Mango, 2017
Pueblo Manasaya	Bofedal	3813,3	La Paz-Bolivia	Hribljan <i>et al.</i> 2015
Parque Nacional Tuni Condoriri	Bofedal	2097,3	Oruro-Bolivia	Hribljan <i>et al.</i> 2015
RNSAB	Bofedal	639,39	Arequipa-Perú	Medina <i>et al.</i> 2020
Chalhuanca	Bofedal	901,28	Arequipa-Perú	Este estudio

*tubulosa* y *Oxychloe andina* en la RNSAB. *D. muscoides* es la especie formadora de almohadones dominantes en bofedales del Perú, distribuida por encima de los 4300 msnm (Salvador *et al.*, 2010; Cooper *et al.*, 2015; Salvador *et al.*, 2014).

*D. muscoides* es la especie dominante en la producción de materia orgánica en los Andes (Cooper *et al.*, 2015), ya que sus tasas de producción de materia y carbono orgánico son mucho más altas que en las turberas de otras montañas o regiones boreales (Benavides *et al.*, 2013). De la misma forma, la mayoría de los almohadones de comunidades de *P. tubulosa* - *Oreobolus obtusangulus* - *Werneria pygmaea* - *Distichia muscoides*, dominadas por cualquiera de estas especies, suelen presentar las acumulaciones más gruesas de turba que otras comunidades en cojín (Cooper *et al.*, 2010).

Existe una correlación lineal positiva la profundidad de la turba y el área del humedal, de tal modo que el área del bofedal contribuiría a la creación vertical de la turba y por tanto al almacenamiento de carbono (Wolf y Cooper 2015). Los sitios de muestreo que poseen los valores más altos de contenido de carbono en los bofedales de Chalhuanca, se encuentran en el centro del bofedal; mientras que los sitios que muestran valores por debajo del promedio de contenido de carbono orgánico, son los ubicados casi al borde del humedal, presentando menor fracción de suelo orgánico (Wolf y Cooper 2015).

#### Fracción de carbono orgánico en biomasa seca y suelo (g C/g muestra)

La alta fracción de carbono obtenida de la biomasa aérea (49%) se encuentra dentro de los valores dados por el IPCC (2007). Salisbury y Ross (1992) detallan ciertos aspectos que favorecen la fijación de carbono en las plantas, como la disposición casi vertical de las hojas, similar a la vegetación de los bofedales, que permite que casi ninguna hoja se encuentre por encima del nivel de saturación, y que pocas hojas sean sombreadas por debajo del sitio de compensación lumínica, aumentando la tasa de fotosíntesis en el ecosistema. Igualmente, el intenso viento presente en el área de estudio reemplaza el aire pobre en CO<sub>2</sub> de la capa límite que rodea la hoja y aumenta su exposición al mismo. Las bajas temperaturas disminuyen la proporción de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, amortiguando la competencia entre ambos (efecto Warburg), así aumenta la tasa fotosintética y disminuye la fotorrespiración, haciéndose más eficientes que las plantas C<sub>4</sub> (Salisbury y Ross, 1992). La acción térmica del agua permitiría la continua actividad y permanencia de la vegetación en bofedales, ya que, cuando la temperatura del aire disminuye, el agua que forma parte del sustrato de los humedales altoandinos mantiene su temperatura, perdiendo calor de forma más lenta y manteniendo una cierta franja de aire circundante ligeramente cálida.

El 43% de la fracción de carbono encontrado en la biomasa bajo suelo estaría de acuerdo a lo indicado por Mazliak (1976), ya que menciona que la mayor proporción de carbono fijado en las hojas adultas es exportada hacia hojas superiores y ápices para impulsar el crecimiento y desarrollo de la planta que hacia las partes inferiores o raíces, donde es metabolizado para mover los nutrientes hacia la zona aérea de la planta.

La alta fracción de carbono encontrada en el suelo

orgánico (43,1%) se explica por la baja tasa de descomposición que se produce. Si se comparase con suelos de tierra firme, el sustrato, en un plazo de alrededor de dos años, sólo entre 12% y 21% permanece sin descomponerse, en cambio, en el mismo periodo el material remanente en los humedales, se presenta con valores entre 25,5 y 47,8%. Lo anterior mencionado va a depender del tipo de material circundante (Roa-García y Brown, 2016) y las condiciones anaerobias locales, sin embargo, hay que tener en cuenta que, a mayor profundidad, el carbono orgánico decrece (Ussiri y Lal, 2017). Por otro lado, el bofedal aquí estudiado, dada la delgada capa de material orgánico en comparación a otros humedales (Cooper *et al.*, 2010; Hribljan *et al.* 2015), puede considerarse como un bofedal creado hace unas décadas atrás y manejado por la población. Esto de alguna manera puede explicar la alta tasa de C en el suelo, ya que otros estudios como el de León *et al.* (2018), explica cómo es que un humedal “antrópico-joven” puede tener mayores tasas de fijación de C a diferencia de un humedal “natural-longevo”.

Los resultados obtenidos coinciden con Roa-García y Brown (2016), que encuentra un mayor contenido orgánico alrededor de los 50 cm superiores del suelo, donde los horizontes debajo de éstos, corresponderían a un suelo con menor contenido de carbono orgánico o constituye un suelo con características minerales. Nuestros resultados se asemejan a los bofedales del Parque Nacional de Tuní Condoriri-La Paz (Bolivia) y los bofedales de los alrededores del lago Chinchaycocha-Junín (Perú), y difieren de los demás.

Sobre la relación del contenido de carbono de las muestras en los distintos reservorios y la vegetación presente en ellos, se encontró que las muestras donde había *D. muscoides*, *P. desertícola*, *A. diplophylla* e *Hypsella sp.* presentaron una mayor concentración de carbono con respecto a otras especies y combinación de estas, donde el carbono almacenado fue inferior, sobre todo con las siguientes especies: *W. nubigena*, *P. tubulosa*, *W. pygmaea*, *Perezia sp* y *A. diplophylla*, sin embargo, el análisis estadístico no mostró diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) en la relación de las vegetación con una mayor o menor acumulación de carbono.

#### Reservas de carbono almacenado por unidad de superficie por reservorio (TC/ha)

La cantidad de carbono acumulado va a estar directamente relacionado con la cantidad de materia vegetal producida, por ello el bajo valor en los bofedales (4,77 TCO<sub>2</sub> en este trabajo y <5 TCO<sub>2</sub> en Junín-Perú) se puede deber a que los bofedales presentan una altura promedio de vegetación menor a 5 cm, con productividad primaria cercana a 8,99 T/ha/año (Squeo *et al.*, 2006). También se debe considerar que la actividad ganadera (sobrepastoreo) podría disminuir las entradas de carbono al suelo, ya que se estaría reduciendo el área foliar de las plantas.

En cuanto a la biomasa bajo suelo, se conoce que las plantas de tipo perenne tienden a presentar una relación raíz vs brote, superior a uno (>1,0), lo cual explica la gran extensión radicular de esta vegetación de bofedal en las muestras, e indicaría que se renuevan más lentamente y por tanto tienen una permanencia más larga que la

biomasa aérea. Tanto la biomasa aérea, como la que se encuentra bajo suelo, son los reservorios que mejor expresan las condiciones regulares de clima en este tipo de ecosistemas altoandinos como el de Chalhuanca, que estarían condicionando el crecimiento y desarrollo, peso fresco y tasa fotosintética, tal como lo señalan Adikhari *et al.* (2009), pues escasas precipitaciones y bajas temperaturas reducen el vigor de las plantas y por lo tanto su posibilidad de hacer fotosíntesis.

Sobre la cantidad de carbono obtenido en el suelo (218,8 TCO<sub>2</sub>), en comparación con otros estudios (Hribljan *et al.* 2015, Medrano *et al.* 2012), se observa una gran diferencia, probablemente atribuido a la edad de los bofedales, ya que aquellos con mayor antigüedad presentan mayor almacenamiento de carbono (Marín *et al.*, 2011). En el caso de Chalhuanca, que es un bofedal con menos de 60 años, según los pobladores de la zona, es de esperar una menor cantidad de carbono almacenada, que además viene siendo manejado desde hace varios años, desconociéndose cómo afecta al proceso natural de acumulación de carbono. Chimmer *et al.* (2002) señalan que las tasas de acumulación de turba son aproximadamente de 2 m por cada 1000 años, siendo de 2 a 10 veces más rápidas que los humedales boreales o de montaña del hemisferio norte y en humedales australes aún no se ha definido esto; sin embargo, Cooper *et al.* (2010), mencionan que la rápida acumulación de turba, no necesariamente respondería a la antigüedad del humedal, ya que muchos factores como el clima, manejo y pastoreo podrían intervenir.

La formación de los suelos orgánicos es producto del balance entre la producción de la planta que excede la descomposición en los bofedales, favoreciendo la formación de turba (Hribljan *et al.*, 2015; Chimmer y Cooper, 2002), dando como resultado la creación vertical o lateral de depósitos de material orgánico bajo condiciones anóxicas permanentes (Hribljan *et al.*, 2015). Esta turba representa el sumidero de carbono en estos ecosistemas (Hernández, 2010). Entonces, debe entenderse que el almacenamiento de carbono en el suelo depende de la interacción entre diversos factores bióticos, abióticos y antrópicos (Galicia *et al.*, 2016).

#### *Reservas de dióxido de carbono almacenado por hectárea en todo el sistema (suelo-vegetación) (TCO<sub>2</sub>/ha)*

Nuestros resultados son superiores con respecto otros estudios (Medina *et al.*, 2020), pero están por debajo de Mango (2017), quien realizó su estudio también en los bofedales de Chalhuanca (cabe mencionar que no menciona mediante qué método calculó el CO<sub>2</sub>, y sólo presenta el valor calculado). Los bofedales en general son ecosistemas altamente productivos y son utilizados para pastoreo de camélidos sudamericanos y últimamente están sufriendo también diferentes tipos de manejos con la finalidad de aumentar su área, como la derivación de cursos de agua o abonamientos en diferentes sectores, lo cual podría estar alterando los valores normales de captura y almacenamiento natural de carbono.

Las altas reservas de carbono, y por consiguiente los altos volúmenes de secuestro de CO<sub>2</sub> en los bofedales de Chalhuanca, podrían deberse a las altas tasas de insolación, el permanente ingreso de agua que

constituye una fuente importante para el crecimiento de la vegetación, sus suelos fríos y anóxicos, que limitarían la descomposición, la alta concentración iónica en el agua que discurre de las cuencas compuestas por rocas volcánicas y sedimentarias (Cooper *et al.*, 2015), y a la propiedad calorífica del agua. Conjuntamente, el ingreso del recurso hídrico a un humedal es un proceso complejo, controlado por diversos factores como la cantidad y el tiempo de precipitación, la conductividad hidráulica de los acuíferos y la turba, y el tamaño y topografía de la cuenca de la que discurre el agua (Chimmer *et al.*, 2002).

La composición florística depende principalmente de la geoquímica del agua, que influye más en la variación que en la composición de especies (Cooper *et al.*, 2010). Se debe tener en cuenta que las estimaciones de almacenamiento, captura y emisión de carbono desde humedales son aún más variables, ya que dependen de una serie de factores como la topografía, la posición fisiográfica del humedal, el microclima, la salinidad y otros mencionados anteriormente, que condicionan la productividad y la composición química de la materia orgánica que entra al sistema (Marín *et al.*, 2011; Harena *et al.*, 2018).

La trascendencia del agua en humedales reside en que las emisiones de CO<sub>2</sub> dependen de su nivel con respecto al suelo, ya que cuando su nivel cae, la temperatura del suelo se incrementa y se producen altas tasas de emisión de este gas, debido a que incrementa la difusión del oxígeno en la turba insaturada (Chimmer y Cooper, 2003), haciendo más eficiente la respiración aeróbica que la respiración anaeróbica e incrementando el transporte de CO<sub>2</sub> a través de la turba (Moore y Dalva, 1993). De esta manera, períodos prolongados de sequía pueden hacer pasar las turberas, de sumideros a fuentes de C, estimulando la oxidación del C almacenado en ellos con liberación de CO<sub>2</sub>; de igual manera, el pastoreo intensivo impide el crecimiento continuo de la vegetación disminuyendo la cantidad de CO<sub>2</sub> fijado y aumentando la descomposición de la materia orgánica (Roa-García y Brown, 2016).

#### *Valoración del servicio ecosistémico: almacenamiento de carbono*

Estudios que abarquen la valoración de servicios ecosistémicos en nuestro medio es aún escaso. De hecho, para el departamento de Arequipa, el cual presenta una amplia gama de ecosistemas (MINAM, 2019b), no existen muchos estudios sobre la importancia de los servicios brindados por los ecosistemas existentes (Mango, 2017; Crispín y Jiménez, 2019; Medina *et al.*, 2020). Por otro lado, cabe denotar que la valoración de los servicios ecosistémicos, más allá de dar a conocer un valor monetario, pretende resaltar la importancia del mismo dentro de un contexto social y biológico (Tamayo, 2014). Los bofedales, como son conocidos, ofrecen una variedad de servicios ecosistémicos, algunos de ellos de manera directa o indirectamente a las poblaciones humanas (Maldonado-Fonkén, 2014). Se destaca que los bofedales son reguladores climáticos, pues su alta productividad se traduce en secuestro de CO<sub>2</sub> del ambiente y fijación del mismo en sus estructuras. Dada la importancia de estos ecosistemas, desde el punto de vista del cambio climático y su importancia

relacionado al desarrollo de la economía social directa o indirecta, el alto valor económico que posee el servicio de almacenamiento de carbono debe ser traducido en planes para su conservación. La investigación para conocer y valorar los servicios que ofrecen estos ecosistemas pondrá en relieve su importancia como herramienta para los tomadores de decisiones con la misión de prever la preservación de los mismos.

## Conclusiones

En las zonas de muestreo se pudo catalogar 12 taxones, de los cuales *Philloscirpus deserticola*, *Werneria pygmaea* y *Distichia muscoides* fueron los más comunes. En cuanto a la fracción de carbono, el reservorio con mayor valor (g C/g muestra) fue la biomasa aérea (49,1 % C), seguido del suelo (43,1 % C) y la biomasa bajo suelo (42,5 % C). Las reservas de carbono fueron mayores en el suelo (218,28 TC/ha), representado así el principal reservorio de carbono, proseguido de la biomasa bajo suelo (19,72 TC/ha) y la biomasa aérea (4,77 TC/ha). Las reservas totales de CO<sub>2</sub> almacenados fueron de 795 415,65 TCO<sub>2</sub> en el sistema suelo-vegetación, estimándose un valor de 901,28 TCO<sub>2</sub>/ha, para un área total de 882,54 ha. Finalmente, la valorización económica del servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono asciende a una cifra de 6462,18 \$/ha, lo que traduciendo en área de bofedal asciende a 5703132,34 \$. Los resultados de este trabajo ponen de manifiesto la importancia de los humedales altoandinos, pues al ser valorados sus servicios, más allá de adquirir un valor monetario, se pone en relieve su importancia y contribución hacia el ambiente, mitigación del cambio climático y la sociedad.

## Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA) por contrato N° 047-2016-UNSA, dentro del proyecto: “Servicios ecosistémicos de los humedales altoandinos y su contribución en la mitigación de los efectos del cambio climático: estudio de caso”, según contrato de subvención. Se agradece a Eloy Condori y Kevin Quispe por su apoyo en campo, además al Tambo Chalhuanca (Programa Nacional PAIS-Midis), a los pobladores de la localidad de Chalhuanca y a la jefatura de la Reserva Nacional de Salinas y Aguada Blanca (Res. Jef. RNSYAB 002-2018-SERNANP-DGANP-JEF).

## Referencias

- Benavides, J., Vitt, D. y Wieder, R. (2013). The influence of climate change on recent peat accumulation patterns of *Distichia muscoides* cushion bogs in the high-elevation tropical Andes of Colombia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(4), 1627–1635. <https://doi.org/10.1002/2013JG002419>.
- Chimmer, R. y Cooper, D. (2003). Carbon dynamics of pristine and hydrologically modified fens in the southern Rocky Mountains. *Canadian Journal of Botany*, 81, 477–491. <https://doi.org/10.1139/b03-043>.
- Chimmer, R. y Cooper, D. (2002). Influence of water levels on CO<sub>2</sub> emissions in a Colorado subalpine fen: an in-situ microcosm study. *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 345–351. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00284-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00284-5).
- Chimmer, R., Cooper, D., Parton, W. (2002). Modeling carbon accumulation in Rocky Mountain fens. *Wetlands*, 22(1), 100–110. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2002\)022\[0100:MCAIRM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2002)022[0100:MCAIRM]2.0.CO;2).
- Coaguila, L., Machaca, J., Lizárraga, J., Ocsa, E., Quispe, F. y Zeballos, H. (2010). Bofedales en la Reserva Nacional de Salinas y Aguada Blanca. En H. Zeballos, J. A. Ochoa y E. López (Eds.), *Diversidad biológica de la Reserva Nacional de Salinas y Aguada Blanca* (pp. 115–127). Desco/Profonape/Sernanp. <http://www.descosur.org.pe/wp-content/uploads/2014/12/DiversidadRNSAB1.pdf>.
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., der Ploeg, S., Anderson, S. J. y Kubiszewski, I. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>.
- Cooper, D. J., Wolf, E. C., Colson, C., Vering, W., Granda, A. y Meyer, M. (2010). Alpine peatlands of the Andes, Cajamarca, Peru. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 42, 19–33. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-42.1.19>.
- Cooper, D., Kaczynski, K., Slayback, D. y Yager, K. (2015). Growth and organic carbon production in peatlands dominated by *Distichia muscoides*, Bolivia, South America. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 47, 505–510. <https://doi.org/10.1657/AAAR0014-060>.
- Cooper, D., Wolf, E., Colson, C., Vering, W., Granda, A. y Meyer, M. (2010). Alpine peatlands of the Andes, Cajamarca, Perú. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 41, 19–33. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-42.1.19>.
- Crispín, M. y Jiménez, L. (2019). Valoración económica ambiental de los bofedales del distrito de Pilpichaca, Huancavelica, Perú. *Natura@economía*, 4(1), 1–13. <http://dx.doi.org/10.21704/ne.v4i1.1299>.
- Escobar-Mamani, F., Branca, D. y Haller, A. (2020). Investigación de montaña sobre y para la región andina. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(4), 311–312. <https://doi.org/10.18271/ria.2020.191>.
- Galicia, L., Gamboa, A., Cram, S., Chavez, B., Peña, V., Saynes, V. y Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34, 1–29. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n1/2395-8030-tl-34-01-00001.pdf>.
- Haller, A. y Branca, D. (2020). Montología: una perspectiva de montaña hacia la investigación transdisciplinaria y el desarrollo sustentable. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(4), 313–322. <https://doi.org/10.18271/ria.2020.193>.
- Harendra, K., Lamentowicz, M., Samson, M., Chojnicki, B. H. (2018). The Role of Peatlands and Their Carbon Storage Function in the Context of Climate Change. En T. Zielinski, I. Sagan y W. Surosz (Eds.), *Interdisciplinary Approaches for Sustainable Development Goals. Economic Growth, Social Inclusion and Environmental Protection* (pp. 169–187). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71788-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71788-3_12).
- Hernández, M. (2010). Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano. *Terra Latinoamericana*, 28(2), 139–147. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v28n2/v28n2a5.pdf>.

- Hribljan, J., Cooper, D., Sueltenfuss, J., Wolf, E., Heckman, K., Lilleskov, E. y Chimmer, R. (2015). Carbon storage and long-term rate of accumulation in high-altitude Andean peatlands of Bolivia. *Mires and Peat*, 15, 12–14. [http://mires-and-peat.net/media/map15/map\\_15\\_12.pdf](http://mires-and-peat.net/media/map15/map_15_12.pdf).
- 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*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/02/ar4-wg2-sum-vol-sp.pdf>.
- León, A. (2016). *Reserva de carbono en bofedales y su relación con la florística y condición del pastizal* [tesis para optar el grado de Magister Scientiae. Universidad Nacional Agraria La Molina]. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2749>.
- León, A. C., Benitez-Mora, A. y Oliván, G. (2018). Update of recent rates of carbon accumulation in bogs of Northern Patagonia-Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 18(4), 977–988. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005002802>.
- Lolu, A. J., Ahluwalia, A. S., Sidhu, M. C., Reshi, Z. A. y Mandotra, S. K. (2020). Carbon Sequestration and Storage by Wetlands: Implications in the Climate Change Scenario. En A. Upadhyay, R. Singh y D. Singh (Eds.), *Restoration of Wetland Ecosystem: A Trajectory Towards a Sustainable Environment* (pp. 45–48). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-7665-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-13-7665-8_4).
- Maldonado-Fonkén, M. (2014). An introduction to the bofedales of the Peruvian high Andes. *Mires and Peat*, 15(4), 1–13. [http://mires-and-peat.net/media/map15/map\\_15\\_05.pdf](http://mires-and-peat.net/media/map15/map_15_05.pdf).
- Mango, C. (2017). *Valoración económica de los servicios ecosistémicos de regulación, de los bofedales del centro poblado de Chalhuanca, distrito de Yanque, provincia de Caylloma, región Arequipa* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/4697>.
- Marín, J., Hernández, M. y Moreno-Casasola, P. (2011). Secuestro de carbono en suelos de humedales costeros de Agua Dulce en Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13, 365–372. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93920942013>.
- Mazliak, P. (1976). *Fisiología vegetal. Nutrición y metabolismo*. Ediciones Omega.
- Medina, C. E., Medina, Y. y Bocardo, E. (2020). Valoración económica del secuestro y almacenamiento de carbono en la puna seca del suroeste del Perú. *Bosques*, 41(2), 165–172. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002020000200165>.
- Medrano, R., Chupan, L. y Vila, M. (2012). Almacenamiento de carbono en especies predominantes de flora en el lago Chinchaycocha. *Apuntes de Ciencia y Sociedad*, 2, 110–117. <https://doi.org/10.18259/acs.2012013>.
- MINAM. (2019a). *Sexto informe nacional sobre Diversidad Biológica. La biodiversidad en cifras. Viceministerio de Desarrollo Estratégico de los Recursos Naturales*. Ministerio del Ambiente. <https://bit.ly/3f7ptW8>.
- MINAM. (2019b). *Mapa nacional de ecosistemas del Perú*. Ministerio del Ambiente. <https://bit.ly/3wbFRtT>.
- Ministerio de Economía y Finanzas (2019, 23 de enero). *Resolución Directoral N° 001-2019-EF/63.01. Directiva General del Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones*. *Diario Oficial "El Peruano"*. <https://www.mef.gob.pe/es/normatividad-inv-publica/instrumento/directivas/19114-resolucion-directoral-n-001-2019-ef-63-01-2/file>.
- Mitsch, W. J. y Gosselink, J. G. (2000). The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. *Ecological Economic*, 35(1), 25–33. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00165-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00165-8).
- Moore, T. y Dalva, M. (1993). The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soil. *Journal of Soil Science*, 44, 651–664. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb02330.x>.
- Oyague, E. y Cooper, D. (2020). Peatlands of the central Andes puna, South America. *Wetland Science & Practice*, 37(4), 255–260. <https://bit.ly/3BwTyAP>.
- Pauca-Tanco, A., Ramos-Mamani, C., Luque-Fernández, C. R., Talavera-Delgado, C., Villasante-Benavides, J. F., Quispe-Turpo, J. P. y Villegas-Paredes, L. (2020). Spatio temporal and climatic analysis of the high Andean wetland of Chalhuanca (Peru) during the period 1986-2016. *Revista de Teledetección*, 55, 105–118. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13325>.
- Roa-García, M. y Brown, S. (2016). Caracterización de la acumulación de carbono en pequeños humedales andinos en la cuenca alta del río Barbas (Quindío, Colombia). *Caldasia*, 38(1), 117–135. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v38n1.57833>.
- Salisbury, F. B. y Ross, C. (1992). *Fisiología vegetal*. Grupo Editorial Iberoamérica.
- Salvador, F., Monerri, J. y Rochefort, L. (2010). Peruvian peatlands (bofedales): from Andean traditional management to modern environmental impacts. *Peatlands International*, 2, 42–48. <https://bit.ly/3hxiS7q>.
- Salvador, F., Monerri, J. y Rochefort, L. (2014). Peatlands of the Peruvian Puna ecoregion: types, characteristics and disturbance. *Mires and Peat*, 15, 1–17. <https://bit.ly/3vcp5LF>.
- Squeo, F., Ibacache, E., Warner, B., Espinoza, D., Aravena, R. y Gutierrez, J. (2006). Productividad y diversidad florística de la Vega Tambo, Cordillera de Doña Ana. En J. Cepeda Pizarro (Ed.), *Geoecología de los Andes desérticos. La alta montaña del Valle del Elqui* (pp. 325–351). Universidad de La Serena. <https://bit.ly/3vgKBYy>.
- Suárez, D., Acurio, C., Chimbolema S. y Aguirre, X. (2016). Análisis del carbono secuestrado en Humedales Altoandinos de dos Áreas Protegidas del Ecuador. *Ecología Aplicada*, 15(2), 171–177. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i2.756>.
- Tamayo, E. (2014). Importancia de la valoración de servicios ecosistémicos y biodiversidad para la toma de decisiones. *Revista Ciencias Ambientales y Sostenibilidad*, 1(1), 16–28. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/CAA/article/view/19559/16754>.
- Ussiri, D. A. y Lal, R. (2017) Introduction to Global Carbon Cycling: An Overview of the Global Carbon Cycle. En *Carbon Sequestration for Climate Change Mitigation and Adaptation* (pp. 61–76). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-53845-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-53845-7_3).

Wolf, E. y Cooper, D. (2015). Fens of the Sierra Nevada, California, USA: patterns of distribution and vegetation. *Mires and Peat*, 15(8), 1–22. <https://bit.ly/3uee8rw>.