

DOI: 10.35319/acta-nova.202316

ACTA NOVA

Revista de Ciencias y Tecnología

Universidad Católica Boliviana, Sede Académica de Cochabamba, Bolivia, Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Centro de Investigación en Ciencias Exactas e Ingenierías (CICEI)

Correspondencia:

A. Arias Maldonado

andrea.arias.maldonado@gmail.com

Estimación de fijación de carbono en las coberturas vegetales de la Serranía San Pedro (Cochabamba - Bolivia)

Estimation of carbon fixation in the vegetation covers of the San Pedro mountain range, Cochabamba - Bolivia

A. Arias Maldonado, W. J. Ferreira, N. De la Barra Ricaldes

Resumen: Debido al aumento de las concentraciones de gases efecto invernadero y el deterioro de áreas verdes en la región metropolitana de Cochabamba, la Serranía San Pedro llega a representar un área verde importante dentro del paisaje urbano. Considerando que la serranía, todavía posee una cobertura vegetal nativa e casi toda su superficie, el presente estudio tuvo como objetivo estimar la fijación de carbono en los diferentes tipos de cobertura vegetal de la Serranía San Pedro, mediante métodos de estimación de biomasa no destructivos para contribuir a la gestión de esta función ambiental. La metodología utilizada fue la aplicación de ecuaciones alométricas en las coberturas de bosques y arbustales, para herbazales se calculó en base a la biomasa seca obtenida por la diferencia de peso seco y peso húmedo en laboratorio. La cobertura con mayor fijación de carbono por hectárea fue el bosque abierto (35,34 tC ha⁻¹) y el de menor fijación de carbono por hectárea fue el herbazal (0,89 tC ha⁻¹). Se observó que el área ocupada por las coberturas vegetales es importante y determinante para el valor de fijación de carbono total. Debido a la relación positiva entre conservación y fijación de carbono, se propusieron estrategias para el mantenimiento y fortalecimiento de la capacidad de fijación de carbono enfocadas en la restauración de la vegetación y control de presiones antrópicas.

Palabras clave: fijación de carbono, cobertura vegetal, biomasa aérea, ecuaciones alométricas, cambio climático.

1 Introducción, planteamiento del problema y objetivo

La presente investigación surge frente a uno de los problemas ambientales más significativos de la ciudad de Cochabamba y de varios países a nivel global: la emisión de CO₂ en el área urbana. Es de conocimiento que las ciudades contribuyen significativamente al aumento de CO₂ (Velasco y Roth, 2010). Si bien estas son importantes fuentes emisoras, las áreas verdes tienen la capacidad de capturar este gas de efecto invernadero (Strohbach *et al.*, 2012).

Cochabamba, además de ser la cuarta ciudad más contaminada de Latinoamérica y la más contaminada de toda Bolivia (Opinión, 2017), presenta un déficit de áreas

Abstract: Due to the increase in greenhouse gas concentrations and the deterioration of green areas in the metropolitan region of Cochabamba, the San Pedro Mountain range represents an important green area within the urban landscape. Considering the deterioration of the mountain range (loss of vegetation cover), the objective of this study was to estimate the carbon fixation in the different vegetation covers of the San Pedro Mountain range, using biomass estimation methods to contribute to the management of this environmental function. The methodology used was the application of allometric equations in forest and shrub cover. The grasslands were extracted, dried and weighted in the laboratory. The cover with the highest carbon fixation per hectare was the open forest (35.34 tC ha⁻¹) and the one with the lowest carbon fixation per hectare was the grassland (0.89 tC ha⁻¹). It was observed that the area occupied by vegetation cover is important and decisive for the total carbon fixation value. Due to the positive relationship between conservation and carbon fixation, were proposed strategies for the maintenance and strengthening of carbon fixation capacity focused on vegetation restoration and control of anthropogenic pressures.

Keywords: carbon fixation, vegetation cover, aboveground biomass, allometric equations, climate change

verdes consolidadas en relación a la extensión urbana (Condori, 2018). Entre las manchas de áreas verdes del centro de la ciudad, resalta la Serranía San Pedro como un área extensa de vegetación natural, pero constantemente amenazada por quemadas y asentamientos ilegales.

Poder sustentar la importancia de la Serranía San Pedro en las funciones y servicios ecosistémicos brindados es de gran valor para la adopción de políticas y acciones públicas que garanticen su conservación y manejo (Landaeta, 2013). Por este motivo, el presente trabajo tiene como propósito estimar la fijación de carbono en las diferentes coberturas vegetales de la Serranía San Pedro.

La finalidad de generar datos sobre la fijación de carbono en la Serranía San Pedro ayudará a valorar y aumentar su potencial de mitigación en la emisión de CO₂ y, sobre todo,

a poder continuar con un monitoreo de esta función ambiental. Así mismo, puede ayudar a generar y fundamentar programas y/o proyectos de manejo, conservación y adaptación de la ciudad frente a la calidad del aire y el cambio climático.

2 Sustento teórico

La fijación de carbono en la vegetación es una medida cuantitativa que permite predecir el comportamiento del carbono. Esta medida depende de la densidad de la madera, el tipo y el estado de desarrollo de la vegetación, ya que este queda atrapado en la biomasa (FAO, 2009; Muñoz y Vásquez, 2020).

La cuantificación de biomasa es el primer paso para poder estimar el carbono fijado. Para cuantificar la biomasa se puede utilizar el método directo destructivo que consiste en obtener la biomasa a partir de la acción de derribar los árboles, arbustos y/o hierbas del área de estudio (Rügnitz *et al.*, 2009). O se puede utilizar el método indirecto no destructivo que consiste en recabar mediciones de la vegetación a estudiar y posteriormente usar ecuaciones para obtener la biomasa (Fonseca 2017).

La cobertura vegetal es la capa de vegetación que cubre la superficie terrestre. Usualmente, su clasificación es acuerdo a su fisionomía, de manera que, se obtienen grupos homogéneos de vegetación. Realizar esta clasificación suministra información importante para conflictos de uso de territorio, ordenamiento territorial, levantamiento y seguimiento de indicadores ambientales (Laguna, 2012).

Un método empleado para realizar inventarios de las coberturas de la tierra es la metodología *Corine Land Cover* (CLC). Esta se basa en la interpretación visual de imágenes satelitales e información de campo (IDEAM, 2010). La interpretación visual consiste en identificar y clasificar la imagen de acuerdo con la textura, color, patrones espectrales, forma y tamaño. Para una buena interpretación, el intérprete se debe apoyar en el conocimiento e información adicional del área de estudio. Así se podrán comparar, complementar, validar o encontrar posibles cambios en la información de la imagen (Ruiz y Tabares, 2019).

3 Metodología

La metodología a seguir constó de 4 etapas principales. Dichas etapas son descritas a continuación.

3.1 Clasificación de coberturas vegetales

La clasificación de las coberturas vegetales se realizó mediante la metodología *Corine Land Cover* (CLC). Para

ello, primeramente, se obtuvo la imagen satelital de SAS *Planet Nightly* a una escala de presentación de 1:25.000 con resolución espacial de 0,5 m. La fecha de la imagen satelital es del 19 de enero del 2020 coincidiendo con la época de lluvia. Antes de pasar a la interpretación de imagen satelital, fue necesario apoyarse en información complementaria. Esta información permitió comparar y validar la información de la imagen.

Posteriormente, se realizó el procesamiento e interpretación de la imagen satelital a una escala de trabajo de 1:5.000 y unidad mínima cartografiada de 0,3 ha utilizando la leyenda nacional de coberturas de la tierra CLC adaptada para Colombia (Tabla 1). La verificación se realizó en aquellas áreas donde se presentó mayor complejidad para la identificación y delimitación de las coberturas.

Tabla 1. Descripción de las clases de coberturas de la Serranía San Pedro

Clase	% de cobertura
Bosque muy abierto	10 – 30 %
Bosque abierto	30 – 70 %
Arbustal abierto	30 – 70 %
Arbustal denso	> 70 %
Herbazal	30 – > 70 %

Fuente: Elaboración propia basada en información de IDEAM, 2010

3.2 Determinación de biomasa aérea y fijación de carbono

Para el diseño de parcelas se tomó en cuenta tres tamaños puesto que, el tamaño de parcela debe estar acorde al tamaño de la vegetación que se desea muestrear (Vallejo *et al.*, 2005). En este sentido, los árboles fueron medidos en parcelas cuadradas de 20 x 20 m. Los arbustos fueron medidos en sub-parcelas de 5 x 5 m y la vegetación herbácea en sub-parcelas de 1 x 1 m. El número de parcelas en los bosques abiertos y muy abiertos fueron 23, en los arbustales densos y abiertos fueron 25 y en los herbazales 26. Siendo así un total de 122 parcelas para toda el área de estudio, distribuidos de manera aleatoria y estratificada.

En árboles y arbustos se usó el método indirecto no destructivo con ecuaciones alométricas y en vegetación herbácea se usó el método destructivo directo. En los árboles, se midió el diámetro de altura al pecho (DAP) y la altura. En árboles bifurcados o con más divisiones donde

se obtuvo más de una medida de DAP se calculó el diámetro cuadrático medio (DCM) con la ecuación 1.

$$DCM = \sqrt{\sum_{i=1}^n dapi^2} \quad (1)$$

Donde:

DCM = Diámetro cuadrático medio (m)

dapi = DAP de cada uno de los troncos medidos (m)

Para calcular la biomasa arbórea se utilizó la ecuación 2 (Chave *et al.*, 2014):

$$AGB = 0,0673 (\rho \times DAP^2 \times H)^{0,976} \quad (2)$$

Dónde:

AGB = Biomasa aérea (kg)

ρ = Densidad de la madera ($g\ cm^{-3}$)

DAP = Diámetro a 130 cm de altura del tallo (cm)

H = Altura (m)

En arbustos, se midió el diámetro basal (DB), el diámetro de copa (DC) y la altura (H). Esto dependió del tipo de arbusto. Para calcular la biomasa arbustiva, se utilizaron dos ecuaciones. Los arbustos con dosel muy abierto y tallos torcidos, pero con tronco visible, se usó la ecuación 3. En cambio, los arbustos sin tronco visible a la superficie del suelo, se usó la ecuación 4 (Conti *et al.*, 2019).

$$AGB = e^{(2,474 \ln DB) - 2,757} \times 1,0787 \quad (3)$$

Dónde:

AGB = Biomasa aérea (kg)

DB = Diámetro basal del tallo (cm)

$$AGB = e^{-0,370 + 1,903 \ln DC + 0,652 \ln H} \times 1,403 \quad (4)$$

Dónde:

AGB = Biomasa aérea (kg)

DC = Diámetro medio de la copa (m)

H = Altura (m)

Dentro de la parcela de vegetación herbácea, se cortó y se extrajo todo el material por encima del suelo. Posteriormente, la muestra fue pesada, embolsada y etiquetada para ser trasladada a laboratorio. En laboratorio se tomaron submuestras de 100 g y fueron llevados al horno a 70 °C hasta alcanzar un peso seco constante (Rügnitz *et al.*, 2009; Yepes *et al.*, 2011).

La biomasa herbácea fue obtenida a partir del peso húmedo total y peso seco. Para su cálculo se usó la ecuación 5 y la ecuación 6 (Herbas *et al.*, 2018):

$$CH = \frac{(P_{hs} - P_{ss})}{P_{ss}} \times 100 \quad (5)$$

Dónde:

CH = Contenido de humedad (%)

Phs = Peso húmedo submuestra (g)

Pss = Peso seco submuestra (g)

$$B = \frac{(P_h B_t)}{1 + \left(\frac{CH}{100}\right)} \quad (6)$$

Dónde:

B = Biomasa seca (g)

PhBt = Peso húmedo total de biomasa (g)

CH = Contenido de humedad (%)

Una vez obtenidos los valores de biomasa en los distintos depósitos aéreos, se sumaron para obtener la biomasa total aérea ecuación 7. Con el resultado de este, se procedió a calcular el contenido de carbono fijado. Para ello se empleó la ecuación 8 (Rügnitz *et al.*, 2009).

$$CB = C_{Ab} + C_{AvHB} \quad (7)$$

Dónde:

CB = Carbono, biomasa

CAb= Carbono arbóreo

CAvHB = Carbono arbustivo y herbáceo

$$CC = CB (t\ de\ C) \times 0,5 \quad (8)$$

Dónde:

CC = Contenido de Carbono almacenado por área (t de C)

CB = Carbono, biomasa

Para el análisis estadístico los resultados fueron comparados mediante gráficos de barras.

3.3 Identificación de áreas con mayor fijación de carbono

A partir de los resultados obtenidos, se identificaron los valores altos, medios y bajos de fijación de carbono en las coberturas vegetales. Posteriormente, se realizó 3 categorizaciones de las coberturas vegetales.

La primera categorización se realizó con base a los resultados de fijación de carbono por hectárea de cada una de las coberturas vegetales. La segunda categorización se realizó a partir de los resultados de fijación de carbono por área ocupada de la cobertura. Ambas categorizaciones se presentaron en una tabla. Así mismo, se usaron colores semaforizados como herramienta para identificar fácilmente la categoría.

Finalmente, la tercera categorización se realizó con base a la interpolación de datos de carbono fijado por superficie de parcela. La interpolación de datos fue realizada en ArcGis 10.1 con el método geoestadístico *Kriging*, usando la variable de tC por punto de muestreo o parcela. De esta manera, se obtuvo un mapa con las categorías de valores

altos y bajos de fijación de carbono en cada cobertura vegetal.

3.4 Elaboración de propuesta de estrategias para el mantenimiento y fortalecimiento de la capacidad de fijación de carbono en la Serranía San Pedro

La propuesta fue realizada con un enfoque de restauración ecológica. Se determinó el ecosistema de referencia, el cual, permitió observar la distancia relativa de las coberturas vegetales respecto al ecosistema potencial. Esto fue el punto de partida para elaborar la propuesta, ya que, no todas las coberturas llegarán a un mismo estado de conservación (Navarro 2018; SER 2004).

Las metas se definieron con base a la sucesión ecológica a la que se pretende llegar en cada cobertura vegetal. Se tomó en cuenta, principalmente, la funcionalidad ecosistémica de fijación de carbono. Posteriormente, para

el cumplimiento de las metas, se plantearon objetivos y, de acuerdo a estos, se propusieron estrategias globales y específicas (Duarte *et al.*, 2018; McDonald *et al.*, 2016; SER, 2004).

4 Resultados y discusión

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cada una de las etapas establecidas.

4.1 Clasificación de coberturas vegetales

El presente estudio consideró toda el área protegida de la Serranía San Pedro debido a que existe la delimitación geográfica reconocida por autoridades públicas. Dicha delimitación fue obtenida del Gobierno Autónomo Departamental de Cochabamba en formato *shape*.

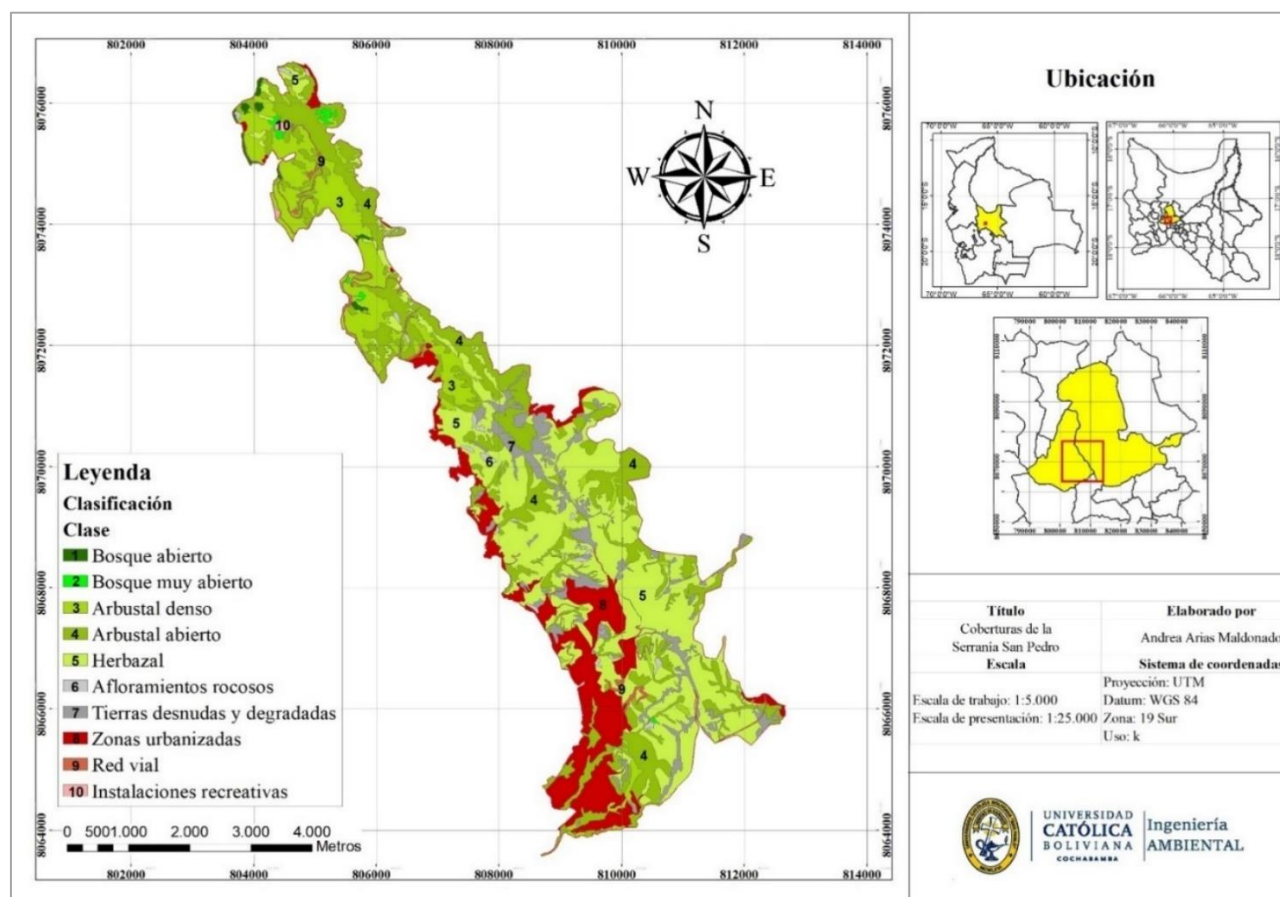


Figura 1: Mapa de coberturas de la Serranía San Pedro

Tabla 2. Área ocupada y porcentaje ocupado por clase de cobertura de la Serranía San Pedro

Clase de cobertura	Área ocupada (ha)	%
Bosque abierto	12,79	0,50
Bosque muy abierto	10,38	0,40
Arbustal denso	316,07	12,28
Arbustal abierto	701,72	27,26
Herbazal	917,90	35,66
Afloramientos rocosos	23,58	0,92
Tierras desnudas y degradadas	180,24	7,00
Zonas urbanizadas	371,03	14,41
Red vial	36,51	1,42
Instalaciones recreativas	4,11	0,16
Total	2.574,33	100

Se obtuvo el mapa de coberturas de la Serranía San Pedro a una escala de presentación de 1:25.000 y a escala de trabajo de 1:5.000 con verificación de campo, donde se distinguieron 10 clases de coberturas (Figura 1). En la Tabla 2, se puede observar el área total que ocupa cada clase de cobertura en hectáreas. Así mismo, se puede observar el % de área que representa en relación con toda el área de estudio.

El herbazal, el arbustal abierto y las zonas urbanizadas son las 3 coberturas que ocupan el mayor % del área de estudio con 35,66 %, 27,26 % y 14,41 % respectivamente. Dichas coberturas se encuentran principalmente concentradas en la zona sur de la serranía. Se puede observar que cuando hay mayor intervención antrópica (zonas urbanizadas) predomina la vegetación secundaria con coberturas abiertas (arbustales y herbazales) indicando degradación (Navarro *et al.*, 2015).

Las coberturas vegetales que ocupan menor % del área de estudio son los bosques abiertos (0,50 %) y los bosques muy abiertos (0,40 %). Al igual que en la zona sur, las actividades antrópicas perturbaron la vegetación potencial del Serranía San Pedro. Si bien se pueden encontrar estos remanentes de bosques, su baja densidad y la predominancia de etapas sucesionales nos indican degradación

4.2 Determinación de biomasa aérea y fijación de carbono

A partir de las fórmulas mencionadas en la metodología se determinó la biomasa y fijación de carbono. En la Figura

2a se puede observar los resultados de la biomasa acumulada en las cinco diferentes clases de coberturas vegetales por hectárea. De acuerdo con los resultados, las dos coberturas de bosque contienen mayor cantidad de biomasa por hectárea. Esto se debe a que la biomasa es la materia viva que compone a la vegetación. Por tanto, si la vegetación tiene un mayor porte (altura, diámetro, densidad) y abundancia, tendrá mayor biomasa (Jadán *et al.*, 2017; Luque, 2011).

Dado que el valor del carbono fijado es el 50 % de la biomasa para todas las especies en general (Brown y Lugo, 1984; IPCC, 1996), los resultados obtenidos de fijación de carbono son proporcionales a los resultados recabados en los cálculos de biomasa (Figura 2b).

El contenido de carbono fijado en el bosque abierto (35,34 tC ha⁻¹) es similar a los bosques secos de la provincia Loja, Ecuador reportado por Aguirre y Erazo (2017) (32,90 tC ha⁻¹) y por Ruiz y Tinoco (2013) (36,15 tC ha⁻¹). En cambio, si se compara el resultado del contenido de carbono fijado en el bosque muy abierto (15,17 tC ha⁻¹) con el bosque abierto y los estudios de Ecuador, se observa una diferencia significativa. De acuerdo a Woomer *et al.* (1998), esto se puede deber a que un bosque mejor conservado, contiene mayor cantidad de carbono.

Si comparamos el resultado del bosque muy abierto con el contenido de carbono fijado en un bosque seco en regeneración ubicado en Nicaragua (22,27 tC ha⁻¹) (Connolly y Corea, 2007), los valores presentan mayor similitud. Lo mismo ocurre al compararlo con otro estudio realizado en los bosques secos de Perú, donde la

vegetación arbórea era rala. En ellos, se reportaron 17,9 tC ha⁻¹ (Malaga *et al.*, 2014).

El arbustal denso contiene 8,88 tC ha⁻¹ y el arbustal abierto contiene 5,74 tC ha⁻¹. Los valores mencionados son altos en comparación a otros estudios realizados en zonas secas. Padilla (2019) reportó 2,26 tC ha⁻¹ y Aguirre *et al.* (2018) reportó 2,7 tC ha⁻¹ en el estrato arbustivo. La diferencia se puede deber a que en altitudes mayores a 2.000 m s.n.m. se encuentra mayor riqueza y, generalmente, mayor abundancia de especies leñosas arbustivas en comparación con especies arbóreas (Jadán y Aguirre, 2013; Jadán-Maza *et al.*, 2016). En este sentido, la altitud del presente estudio podría estar repercutiendo positivamente en las cantidades de carbono fijado en comparación a los estudios mencionados.

Si se compara el contenido de carbono en el arbustal denso con el arbustal abierto, se puede observar que el arbustal denso fija mayor cantidad de carbono que el arbustal abierto. Esto ocurre porque el arbustal denso tiene mayor porte y mejor estado de conservación que el arbustal abierto.

El herbazal contiene 0,89 tC ha⁻¹. Un estudio realizado en parcelas agroforestales ubicados en Cochabamba, Bolivia, determino que el carbono fijado en el estrato herbáceo de la Mayca se encontraba entre 0,5 y 1,1 tC ha⁻¹ (Herbas *et al.*, 2018). Los resultados del estudio mencionado y del presente estudio son similares debido a que tienen las mismas características bioclimáticas, ambas presentan intervención antrópica y ambas pertenecen a la misma serie de vegetación.

Si bien tener los datos de fijación de carbono por una hectárea nos ayuda a hacer la comparación con otros estudios, es importante considerar las hectáreas que ocupa cada cobertura en la Serranía San Pedro. En la Figura 3, se puede observar el contenido de carbono fijado con relación al área ocupada por las coberturas vegetales.

Debido a que las coberturas de bosque ocupan menor área en comparación a las demás coberturas, se puede observar que son las coberturas con menor cantidad de carbono fijado en la serranía. En cambio, las dos coberturas de arbustal tienen fijada la mayor cantidad de carbono en relación con las demás coberturas porque ocupan gran parte de la superficie de la serranía.

El herbazal es la cobertura con mayor área ocupada en toda el área de estudio. Debido a que el herbazal ocupa un área 90 veces mayor a el bosque muy abierto, el contenido de carbono fijado también es mayor. Sin embargo, pese a su gran extensión, fija menor cantidad de carbono que el

arbustal abierto. Esto se debe a que apenas logra fijar 0,89 tC por hectárea, es decir, 6 veces menos que el arbustal abierto.

En total, actualmente, la Serranía San Pedro fijó 8.265,20 tC. Si todas las coberturas vegetales (1.958,86 ha) fueran restauradas a la etapa clímax, la serranía fijaría 69.226,11 tC en total. Es decir, la fijación de carbono incrementaría más de 8 veces.

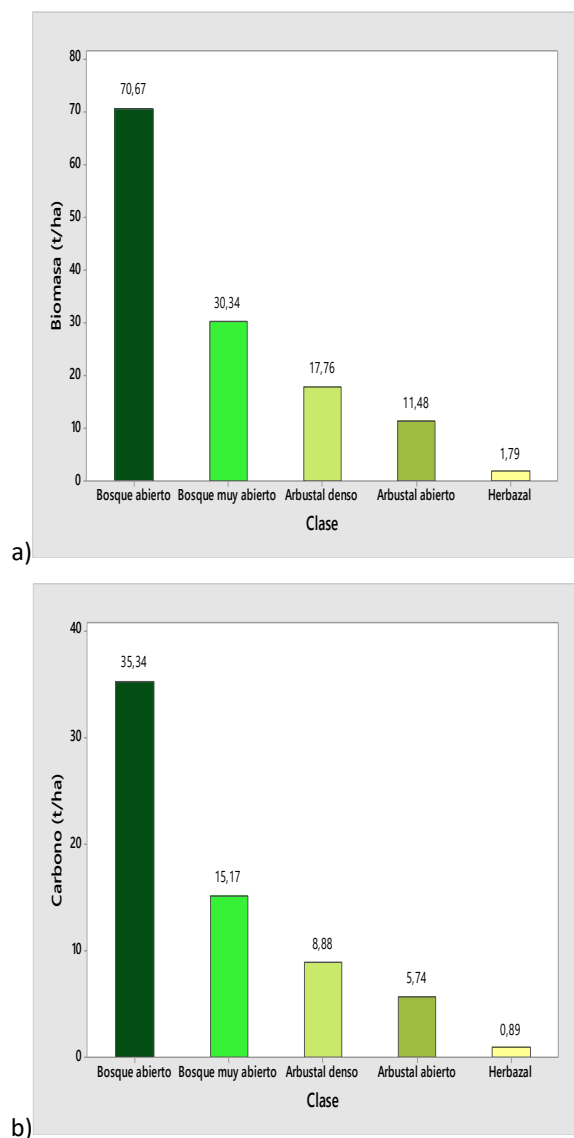


Figura 2: Biomasa acumulada y fijación de carbono por hectárea por clase de cobertura vegetal de la Serranía San Pedro, a) Biomasa acumulada (t ha⁻¹), b) Fijación de carbono (tC ha⁻¹)

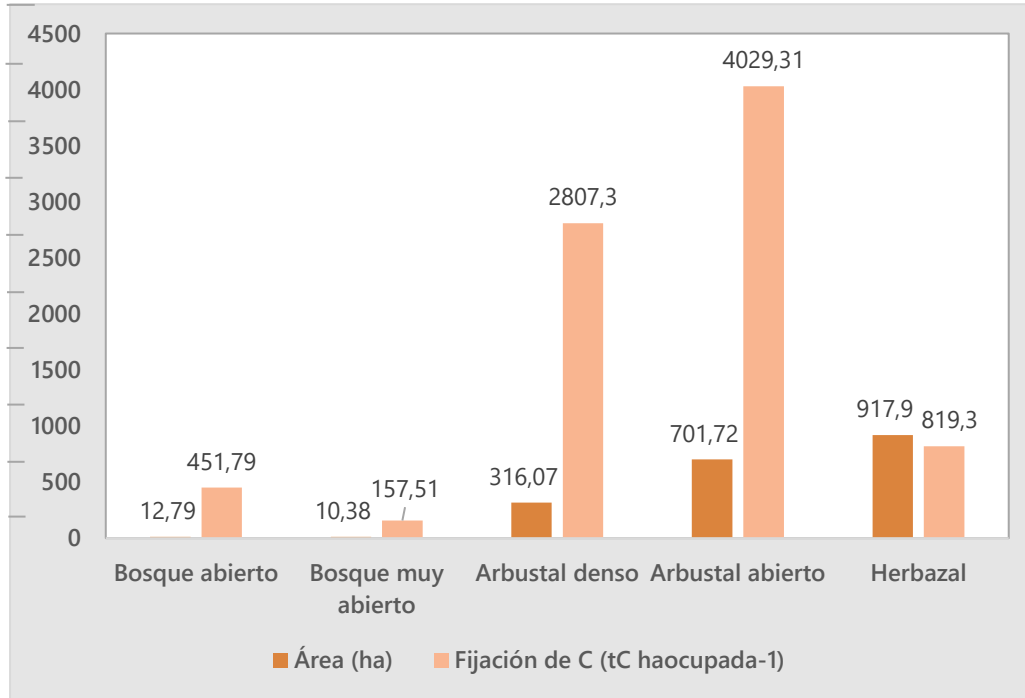


Figura 3: Fijación de carbono (tC haocupada por cobertura⁻¹) con relación al área ocupada por las coberturas vegetales de la Serranía San Pedro

De acuerdo todo lo descrito anteriormente, podemos inferir que el área ocupada por las coberturas es importante y determinante para el valor de fijación de carbono de toda el área de estudio. Si se incrementan áreas de coberturas con mayor porte, como los bosques, también incrementaría la cantidad de carbono fijado.

4.3 Identificación de áreas con mayor fijación de carbono

A partir de los resultados obtenidos de fijación de carbono, se realizaron dos categorizaciones de coberturas. La primera, a partir del carbono fijado por hectárea. La segunda, a partir del carbono fijado por área de cobertura ocupada (Tabla 3). De acuerdo con los resultados, en la

primera categorización, el bosque abierto tiene una categoría alta y el herbazal una categoría baja de fijación de carbono por hectárea. Esto quiere decir que, por una hectárea, el bosque abierto es capaz de fijar mayor cantidad de carbono que el herbazal.

En la segunda categorización, el arbustal abierto tiene una categoría alta y el bosque muy abierto tiene una categoría baja de fijación de carbono por área ocupada de cobertura. Esto nos muestra que, actualmente, la Serranía San Pedro tiene mayor cantidad de carbono fijado en el arbustal abierto y menor cantidad en el bosque muy abierto. Sin embargo, esta categorización puede cambiar dependiendo del cuidado y protección de la serranía.

Tabla 3. Categorización de coberturas vegetales de la Serranía San Pedro de acuerdo con el carbono fijado por hectárea y al carbono fijado por área ocupada de cobertura

Clase de cobertura vegetal	C (t ha ⁻¹)	1° Categoría	C (t haocupada por cobertura ⁻¹)	2° Categoría
Bosque abierto	35,34	Alta	451,79	Media baja
Bosque muy abierto	15,17	Media alta	157,51	Baja
Arbustal denso	8,88	Media	2.807,30	Media alta

Arbustal abierto	5,74	Media baja	4.029,31	Alta
Herbazal	0,89	Baja	819,30	Media

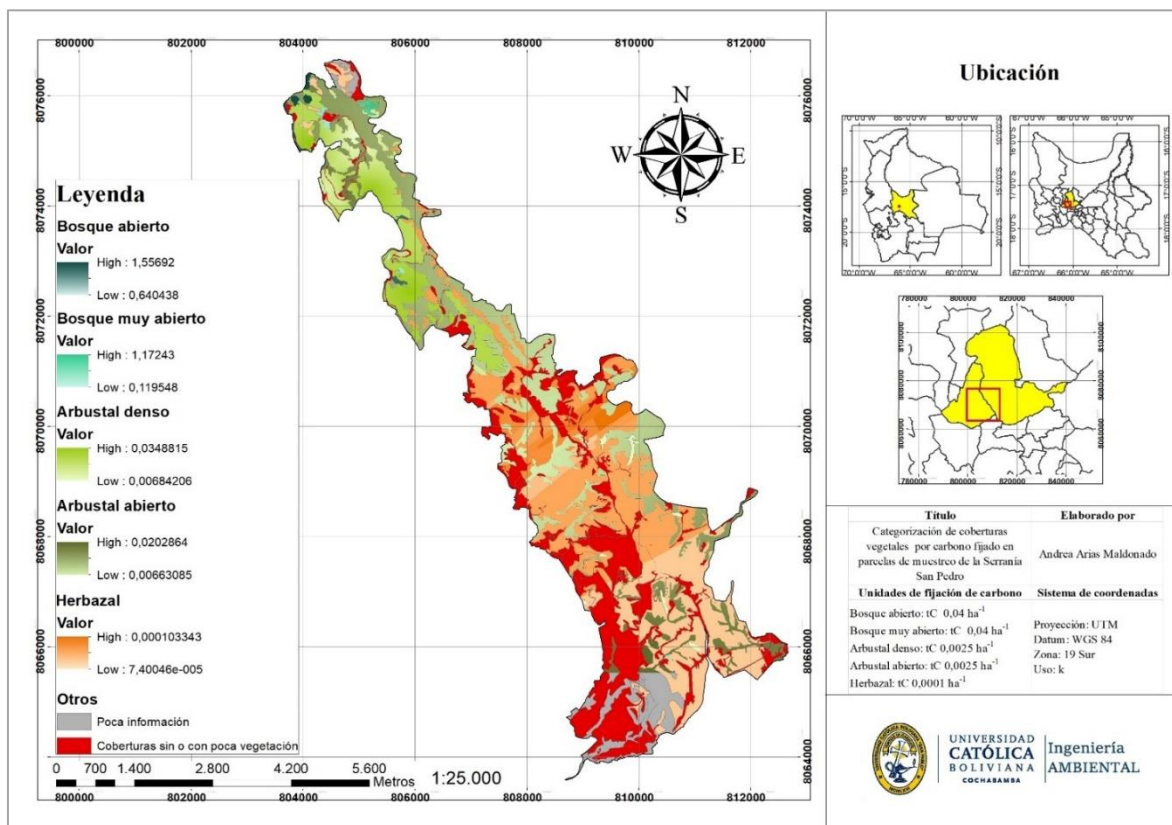


Figura 4: Mapa de categorización de coberturas vegetales por carbono fijado (tC) en las parcelas de muestreo de la Serranía San Pedro

Para tener una categorización de mayor detalle, se interpolaron los datos de fijación de carbono por parcela de cada cobertura vegetal. Para ello, se implementó el método geoestadístico Kriging. En la Figura 4 se puede observar el mapa de categorización realizada de las coberturas vegetales. Dicho mapa, muestra los valores altos y bajos de fijación de carbono. Los valores altos se distinguen por tonalidades oscuras y los valores bajos se distinguen por tonalidades claras. Cabe mencionar que los valores de fijación de carbono en el mapa se encuentran en toneladas por superficie de parcela. En este sentido, son tC 0,04 ha⁻¹ para bosques, tC 0,0025 ha⁻¹ para arbustales y tC 0,0001 ha⁻¹ para herbazales.

En general, todas las coberturas presentaron valores de carbono fijado altos al norte y bajos al sur de la Serranía San Pedro. Se pudo observar, en el mapa de categorización, que parece haber una relación negativa entre el valor de carbono fijado y las intervenciones

antrópicas. Por otro lado, se sabe que la pendiente tiene un impacto negativo en el desarrollo de la vegetación y los suelos (erosión), especialmente en zonas secas y en proceso de regeneración (Landaeta, 2013). Sin embargo, en las coberturas desarrolladas (bosques y arbustal denso) tuvo un impacto positivo debido a que limitó el acceso de presiones antrópicas

4.4 Elaboración de propuesta de estrategias para el mantenimiento y fortalecimiento de la capacidad de fijación de carbono en la Serranía San Pedro

El crecimiento de las zonas urbanas, la presencia de ganado, las quemas y la disposición de residuos sólidos afectan al crecimiento y desarrollo de la vegetación (Landaeta, 2013). Debido a que la fijación de carbono depende del crecimiento y estado de conservación de la vegetación, los problemas ambientales mencionados también afectan a la fijación de carbono (Siu y Ordeñana,

2001). En este sentido, para mantener y fortalecer la capacidad de fijación de carbono, se debe aumentar y conservar la vegetación de la Serranía San Pedro.

Las coberturas vegetales son un reflejo de las etapas sucesionales de esta serie de vegetación. Por esta razón, la propuesta de estrategias tiene un enfoque de restauración ecológica. Donde, se busca acercarse a la vegetación potencial original (ecosistema de referencia). El ecosistema de referencia de la Serranía San Pedro es el bosque interandino de Soto (*Schinopsis (haenkeana) marginata*) y Orkho-Kharalawa (*Vasconcellea quercifolia*).

Las estrategias globales de restauración dependen de la clase de cobertura actual y su capacidad de recuperarse. En este sentido, las coberturas con alto nivel de regeneración corresponden estrategias de restauración natural (RN), como el bosque abierto y bosque muy abierto. En coberturas con nivel medio de regeneración y degradación corresponde la restauración asistida (RA), como el arbustal denso y arbustal abierto. Las que presentan niveles altos de degradación tendrán que ser

reconstruidas (RT), como el herbazal. Y, por último, las que presentan degradación avanzada tendrán que ser rehabilitadas (RH) (Duarte et al., 2018).

La Tabla 4 muestra la matriz de propuesta de estrategias elaborada de acuerdo con la metodología propuesta por el SER (2004). Dicha matriz, contiene metas, objetivos y estrategias específicas para cada cobertura vegetal

Las plantas nativas recomendadas propias de la vegetación potencial natural también fueron asignadas de acuerdo con cada cobertura, sus metas y objetivos. Para las coberturas de bosque abierto, bosque muy abierto y arbustal denso se recomienda *Schinopsis haenkeana*, *Vasconcellea quercifolia*, y *Aspidosperma horkoquebracho*. En la cobertura de arbustal abierto se recomienda las mencionadas anteriormente adicionando la *Acacia macracantha*, *Neltuma (Prosopis) andicola* y *Harrisia tetracantha*. Por último, para la cobertura herbazal se recomienda la *Acacia macracantha*, *Neltuma (Prosopis) andicola*, *Harrisia tetracantha*, *Rhysolepis mollis*, *Lantana spp.* y *Lippia boliviana*.

Tabla 4. Matriz de estrategias para el mantenimiento y fortalecimiento de la capacidad de fijación de carbono en la Serranía San Pedro

Clase de cobertura vegetal	Metas de mediano – largo plazo (10-20 años)	Objetivos	Estrategias específicas
Bosque abierto	Bosque de Soto y Orkho-Kharalawa recuperado en un 80% – 90%	Conservar el bosque potencial actual	- Protección estricta (cercado) de zonas con vegetación potencial - Recuperación de bancos de semillas naturales
Bosque muy abierto	Bosque de Soto y Orkho-Kharalawa recuperado en un 70% – 80%	Conservar el bosque potencial actual	- Protección estricta (cercado) de zonas con vegetación potencial - Recuperación de bancos de semillas naturales
Arbustal denso	Bosque de Soto y Orkho-Kharalawa recuperado en un 40% – 50%	- Incrementar el número de árboles deciduos potenciales - Disminuir daños y perturbaciones provocados por vertido de residuos sólidos	- Plantación directa de especies arbóreas nativas - Abandono total del área con restricción de usos humanos - Regulación y control estricto sobre el vertido de residuos sólidos
Arbustal abierto	Arbustal sucesional denso de <i>Acacia macracantha</i> (>70%) con manchas de bosque de Soto y Orkho-Kharalawa recuperado en un 10% – 20%	- Aumentar el número de árboles y arbustos deciduos - Disminuir daños y perturbaciones provocados por ganado ovino y caprino	- Plantación directa de especies arbóreas y arbustivas espinosas para ser aprovechados como cercos vivos. - Aumentar la dispersión de semillas - Abandono total del área con restricción de usos humanos

Herbazal	Arbustal sucesional abierto de <i>Acacia macracantha</i> (<70%) recuperado en un 30% – 40%	<ul style="list-style-type: none"> - Aumentar el número de arbustos deciduos - Disminuir daños y perturbaciones provocados por ganado ovino y caprino - Minimizar las perturbaciones provocadas por asentamientos ilegales 	<ul style="list-style-type: none"> - Enmiendas para mejorar las condiciones del suelo. - Plantación directa de especies arbustivas deciduas y espinosas para ser aprovechados como cercos vivos. - Eliminación de disturbios. - Mejorar la regulación y control de asentamientos ilegales a través de leyes normas. - Destinar fondos a guarda parques con equipamiento.
----------	--	---	---

5 Conclusiones

Se clasificó el área de estudio por coberturas mediante la metodología *Corine Land Cover*. La Serranía San Pedro se encuentra representada por las etapas sucesionales dadas por las clases de cobertura de herbazal (35,66%), arbustal abierto (27,26%) y arbustal denso (12,28%) con mayor área ocupada. En cambio, las coberturas de bosque abierto (0,50%) y bosque muy abierto (0,40%) ocupan menor área en toda el área de estudio. Los afloramientos rocosos ocupan 0,92%, las tierras desnudas y degradadas el 7,0%, la red vial 1,42%, las instalaciones recreativas 0,16% y las zonas urbanizadas 14,41%. Siendo esta última una presión antrópica significativa por ser la tercera cobertura con mayor área ocupada.

Las coberturas vegetales con mayor contenido de biomasa fijaron mayor carbono por hectárea. La cobertura con mayor fijación de carbono por hectárea fue el bosque abierto (35,34 tC ha⁻¹), seguido por el bosque muy abierto (15,17 tC ha⁻¹), el arbustal denso (8,88 tC ha⁻¹), el arbustal abierto (5,74 tC ha⁻¹) y, por último, el de menor fijación de carbono por hectárea fue el herbazal (0,89 tC ha⁻¹). Se observó que el área ocupada por las coberturas vegetales es importante y determinante para el valor de fijación de carbono total.

Se categorizó las coberturas vegetales de 3 maneras. En la categorización realizada a partir del carbono fijado por área ocupada de la cobertura, los arbustales abiertos tienen una categoría alta de fijación de carbono debido al área que ocupa con relación a las demás coberturas. En la categorización realizada a partir del carbono fijado por hectárea y en la categorización realizada a partir de la interpolación de datos de carbono fijado por superficie de parcela se observó que la categoría es mayor cuando la cobertura vegetal presenta un mejor estado de conservación. Por tanto, las actividades antrópicas afectan la función ecosistémica de fijación de carbono.

Bajo estas consideraciones, se propusieron estrategias para el mantenimiento y fortalecimiento de la capacidad de fijación de carbono por cobertura vegetal. Las estrategias propuestas están enfocadas en la restauración de la vegetación para llegar a la etapa sucesional clímax. Las coberturas vegetales en etapas sucesionales de menor degradación (bosque abierto y bosque muy abierto) tienen estrategias globales de regeneración natural y estrategias específicas de protección y recuperación de semillas. Las coberturas vegetales en etapas sucesionales con mayor degradación (arbustal denso, arbustal abierto y herbazal) tienen estrategias globales de regeneración asistida o reconstrucción y, entre las estrategias específicas de mayor frecuencia, se encuentra la plantación directa y la regulación y control de presiones antrópicas.

Referencias bibliográficas

- AGUIRRE, N. y ERAZO, A., 2017. Valoración económica ambiental del compartimiento leñoso como una alternativa para conservar la biodiversidad del bosque seco de la provincia de Loja, Ecuador., vol. 7, no. 1, pp. 19. DOI 2528-7818.
- AGUIRRE, Z., QUIZHPE, W. y PINZA, D., 2018. Estimación del carbono acumulado en una parcela permanente de bosque andino en el parque universitario Francisco Vivar Castro, Loja, Ecuador. *Arnaldoa*, vol. 25, no. 3, pp. 939-952. ISSN 2413-3299. DOI 10.22497/arnaldoa.253.25307.
- BROWN, S. y LUGO, A., 1984. Biomass of Tropical Forests: A New Estimate Based on Forest Volumes. *Science (New York, N.Y.)*, vol. 223, pp. 1290-3. DOI 10.1126/science.223.4642.1290.
- CHAVE, J., RÉJOU-MÉCHAIN, M., BURQUEZ, A. y CHIDUMAYO, E., 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *ResearchGate* [en línea]. [Consulta: 2 octubre 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/262197290_Improved_allometric_models_to_estimate_the_aboveground_biomass_of_tropical_trees.

- CONDORI, J.P., 2018. Disminución del Arbolado Viario en Areas Urbanas del Municipio de Cochabamba. En: Accepted: 2018-04-09T15:20:41Z [en línea]. [Consulta: 16 septiembre 2020]. Disponible en: <http://ddigital.umss.edu.bo:8080/jspui/handle/123456789/10546>.
- CONNOLLY, R. y COREA, C., 2007. *Cuantificación de la captura y almacenamiento de carbono en sistema agroforestal y forestal en seis sitios de cuatro municipios de Nicaragua*. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria.
- CONTI, G., GORNÉ, L.D., ZEBALLOS, S.R., LIPOMA, M.L., GATICA, G., KOWALJOW, E., WHITWORTH-HULSE, J.I., CUCHIETTI, A., POCA, M., PESTONI, S. y FERNANDES, P.M., 2019. Developing allometric models to predict the individual aboveground biomass of shrubs worldwide. *Global Ecology and Biogeography*, vol. 28, no. 7, pp. 961-975. ISSN 1466-8238. DOI 10.1111/geb.12907.
- DUARTE, N., CUESTA, F. y ARCOS, I., 2018. Módulo 2. Selección y establecimiento de estrategias y prácticas de restauración. *Proaño, R.; Duarte, N.; Cuesta, F. (Eds.). 2018. Guía para la restauración de los bosques montanos tropicales*. Quito, Ecuador: CONDESAN, ISBN 978-9942-8662-5-7.
- FAO, 2009. Glosario de agricultura orgánica. En: Roma [en línea]. [Consulta: 30 septiembre 2020]. Disponible en: <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/012/k4987t/k4987t.pdf>.
- FONSECA, W., 2017. Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *ResearchGate* [en línea]. [Consulta: 4 octubre 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/318480759_Revisión_de_metodos_para_el_monitoreo_de_biomasa_y_carbono_vegetal_en_ecosistemas_forestales_tropicales.
- HERBAS, C., DE LA BARRA, N. y AZERO, M., 2018. Fijación de carbono en 10 sistemas agroforestales dinámicos (SAFD) de la zona seca de Cochabamba. *ResearchGate* [en línea]. [Consulta: 14 septiembre 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/333433957_Fijación_de_carbono_en_10_sistemas_agroforestales_dinámicos_SAFD_de_la_zona_seca_de_Cochabamba.
- IDEAM, 2010. *Leyenda Nacional de Coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000* [en línea]. Bogotá, Colombia: Scripto Ltda. [Consulta: 3 octubre 2020]. ISBN 978-958-8067-29-2. Disponible en: http://siatac.co/c/document_library/get_file?uuid=a64629ad-2dbe-4e1e-a561-fc16b8037522&groupId=762.
- IPCC, 1996. Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero - versión revisada en 1996. [en línea]. [Consulta: 16 abril 2021]. Disponible en: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/spanish.html>.
- JADÁN, O. y AGUIRRE, Z., 2013. Flora de los Tepuyes de la Cuenca Alta del Río Nangaritzá, Cordillera del Cóndor. *Evaluación Ecológica Rápida de la Biodiversidad de los Tepuyes de la Cuenca Alta del Río Nangaritzá, Cordillera del Cóndor, Ecuador* [en línea]. Quito, Ecuador: s.n., pp. 41-48. [Consulta: 18 abril 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/261100474_Flora_de_los_Tepuyes_de_la_Cuenca_Alta_del_Rio_Nangaritzá_Cordillera_del_Cóndor.
- JADÁN, O., QUIZHPE, W., PACHECO, E., GONZÁLES, M., PONCE, E., AGUIRRE, Z. y PEÑA, D., 2017. Riqueza florística y carbono almacenado en tres pisos altitudinales de bosques amazónicos, Zamora Chinchipe, Ecuador. , vol. 7, no. 1. ISSN 2528-7818.
- JADÁN-MAZA, O., CEDILLO, H., PERALTA, Á., ZEA, P., TOLEDO, C., TEPÁN, B. y VACA, C., 2016. Evaluación preliminar de la composición florística y usos de la vegetación en bosques secundarios, provincia de Azuay. *Bosques Latitud Cero*, vol. 6, pp. 1-13. ISSN 2528-7818.
- LAGUNA, D.A., 2012. Propuesta de clasificación de cobertura vegetal y uso del suelo 2012. . Informe final de consultoría. Panamá: Programa conjunto de las Naciones Unidas para la reducción de emisiones provenientes de deforestación y de degradación de los bosques en Panamá.
- LANDAETA, K., 2013. Estado Ambiental del Cerro San Pedro y lineamientos para una propuesta de gestión ambiental. *Issuu* [en línea]. [Consulta: 17 septiembre 2020]. Disponible en: https://issuu.com/katalina74/docs/san_pedro___k_landa_eta___imprensa.
- LUQUE, J.J., 2011. *Determinación de la captura de dióxido de carbono acumulado en la biomasa de los bosques húmedos en la Comunidad de Macahua, Municipio de Ixiamas, Departamento de La Paz* [en línea]. Tesis de grado. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés. [Consulta: 14 septiembre 2020]. Disponible en: <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/7709/T-1608.pdf?sequence=1>.
- MALAGA, N., GIUDICE, R., QUISPE, B. y ROJAS, E., 2014. *Estimación de los contenidos de carbono de la Biomasa aérea de Perú* [en línea]. 1. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente. [Consulta: 17 abril 2021]. ISBN 978-612-4174-14-8. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/271827693_Estimación_de_los_contenidos_de_carbono_de_la_Biomasa_aerea_de_Peru.
- MCDONALD, T., GANN, G.D., JONSON, J. y DIXON, K.W., 2016. *International standards for the practice of ecological restoration – including principles and key concepts*. 1. Washington DC, USA: Society for Ecological Restoration.
- MUÑOZ, M.E. y VÁSQUEZ, E.G., 2020. *Estimaciones del potencial de captura de carbono en los parques urbanos y emisiones de CO2 vehicular en Cuenca, Ecuador* [en línea]. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. [Consulta: 29 septiembre 2020]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18390/1/UPS-CT008694.pdf>.
- NAVARRO, G., 2018. *Guía para la inclusión de factores ecológicos, biodiversidad y unidades de análisis en los procedimientos de evaluación ambiental en Bolivia*. 1a. Cochabamba, Bolivia: Center for Development Research (ZEF), University of Bonn, Germany – Universidad Católica Boliviana “San Pablo” (UCB). ISBN 978-99974-0-418-3.

- NAVARRO, G., AGUIRRE, L. y MALDONADO, M., 2015. *Biodiversidad, Ecología y Conservación del Valle Central de Cochabamba* [en línea]. Cochabamba, Bolivia: Centro de Biodiversidad y Genética (CBG), Universidad Mayor de San Simón. [Consulta: 20 noviembre 2020]. ISBN 978-99974-53-83-9. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Luis_Aguirre3/publication/284186900_Biodiversidad_Ecologia_y_Conservacion_del_Valle_Central_de_Cochabamba/links/5b97cd1345851531057a7cd4/Biodiversidad-Ecologia-y-Conservacion-del-Valle-Central-de-Cochabamba.pdf?origin=publication_detail.
- OPINIÓN, 2017. Cochabamba sigue siendo la más contaminada del país. *Opinión Bolivia* [en línea]. [Consulta: 17 septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.opinion.com.bo/articulo/cochabamba/cochabamba-sigue-siendo-m-aacute-s-contaminada-pa-iacute-s/20170623010800582227.amp.html>.
- PADILLA, M., 2019. *Captura de dióxido de carbono del fuste de Acacia macracantha «Faique» y Capparis scabrida «Sapote de perro» en el bosque seco distrito de Jaén - Cajamarca*. Jaén, Perú: Universidad Nacional de Jaén.
- RÜGNITZ, M.T., CHACÓN, M.L. y PORRO, R., 2009. *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales* [en línea]. 1a. Lima, Perú: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF). [Consulta: 30 septiembre 2020]. ISBN 978-92-9059-254-9. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/259176045_Guia_para_la_determinacion_de_carbono_en_pequenas_propiedades_rurales.
- RUIZ, I. y TINOCO, H., 2013. *Cuantificación de las reservas de carbono en bosque seco dentro tres áreas de conservación del programa socio bosque en el cantón Zapotillo, provincia de Loja* [en línea]. Loja, Ecuador: Universidad Nacional de Loja. [Consulta: 17 abril 2021]. Disponible en: https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/11390/1/TESIS%20RUIZ%20%26%20TINOCO_2013.pdf.
- RUIZ, J.E. y TABARES, S.A., 2019. *Aplicación de la metodología Corine Land Cover para la identificación de áreas sensibles y zonificación en el municipio de Bojacá - Cundinamarca*. Fusagasugá, Colombia: Universidad de Cundinamarca.
- SER, 2004. *Principios de SER Internacional para la restauración ecológica*. 2. S.l.: Society for Ecological Restoration International, Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas.
- SIU, M. y ORDEÑANA, W., 2001. *Estimación del contenido y almacenamiento de carbono en el bosque seco secundario del refugio de vida silvestre Chococente* [en línea]. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria. [Consulta: 16 abril 2021]. Disponible en: <https://repositorio.una.edu.ni/991/1/tnp01s623.pdf>.
- STROHBACH, M.W., ARNOLD, E. y HAASE, D., 2012. The carbon footprint of urban green space—A life cycle approach. *Landscape and Urban Planning*, vol. 104, no. 2, pp. 220-229. ISSN 0169-2046.
- VALLEJO, M.I., LONDOÑO, A.C., LÓPEZ, R., GALEANO, G., ÁLVAREZ, E. y DEVIA, W., 2005. *Establecimiento de parcelas permanentes en bosques de Colombia* [en línea]. 1a. Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. [Consulta: 3 octubre 2020]. Métodos para estudios ecológicos. ISBN 958-8151-59-7. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Rene_Lopez_Camacho2/publication/326882544_ESTABLECIMIENTO_DE_PARCELAS_PERMANENTES_EN_BOSQUES_DE_COLOMBIA/links/5b6a29a745851546c9f6b5dc/ESTABLECIMIENTO-DE-PARCELAS-PERMANENTES-EN-BOSQUES-DE-COLOMBIA.pdf.
- VELASCO, E. y ROTH, M., 2010. Cities as Net Sources of CO₂: Review of Atmospheric CO₂ Exchange in Urban Environments Measured by Eddy Covariance Technique. *ResearchGate* [en línea]. [Consulta: 11 septiembre 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/229890288_Cities_as_Net_Sources_of_CO2_Review_of_Atmospheric_CO2_Exchange_in_Urban_Environments_Measured_by_Eddy_Covariance_Technique.
- WOOMER, P., PLAM, C., KARANJA, N.K., QUERESHI, J.N. y KOTTO-SAME, J., 1998. *Carbon Sequestration and Organic Resource Management in African Smallholder Agriculture. / ASB Partnership for the Tropical Forest Margins* [en línea]. Boca Raton, Florida, Estados Unidos: CRC Press. [Consulta: 18 abril 2021]. Disponible en: <http://www.asb.cgiar.org/publication/carbon-sequestration-and-organic-resource-management-african-smallholder-agriculture>.
- YEPES, A.P., NAVARRETE, D.A., DUQUE, Á.J., PHILLIPS, J.F., CABRERA, K.R., ÁLVAREZ, E., GARCÍA, M.C. y ORDOÑEZ, M.F., 2011. *Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono en Colombia*. Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. ISBN 978-958-8067-34-6.