

Carbono almacenado en la biomasa aérea y su valoración económica en los sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo, Madre de Dios - Perú

Carbon stored in aerial biomass and its economic valuation in the agroforestry systems of the EEA San Bernardo, Madre de Dios - Peru

Edith R. Clemente-Arenas^{1,*}

Recibido: 17 marzo 2021 | **Aceptado:** 01 junio 2022 | **Publicado en línea:** 27 julio 2022
Citación: Clemente-Arenas, ER. 2022. Carbono almacenado en la biomasa aérea y su valoración económica en los sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo, Madre de Dios - Perú. Revista Forestal del Perú 37(1): 54-68. DOI: <https://doi.org/10.21704/rfp.v37i1.1593>

Resumen

Los sistemas agroforestales son una alternativa de manejo sostenible para las tierras degradadas por la agricultura convencional en la Amazonía peruana, esto podría evitar más deforestación de los bosques y la pérdida de más ecosistemas. El componente arbóreo en los sistemas agroforestales los hace más parecidos a los bosques naturales que muchos otros sistemas de uso de tierra como las pasturas, monocultivos, entre otros. Esta característica también repercute en el potencial de captura de carbono de los sistemas agroforestales ya que representan un considerable sumidero de carbono tanto sobre como debajo del suelo. En consecuencia, puede representar un considerable ingreso económico por parte de los bonos de carbono, el cual es un mecanismo internacional de descontaminación para reducir las emisiones contaminantes al medio ambiente, con un mercado relativamente nuevo y con mucha relevancia en la mitigación del cambio climático. En ese sentido, se cuantificó y valorizó económicamente el carbono almacenado en la biomasa aérea de siete sistemas agroforestales establecidos hace más de 16 años en la Estación Experimental Agraria (EEA) San Bernardo. El diámetro de las especies frutales y forestales fue usado como insumo para las ecuaciones alométricas que nos permitió estimar la biomasa y el carbono almacenado en el componente arbóreo de los sistemas agroforestales. Los siete sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo tienen un total de 483.81 Mg de carbono almacenado en su biomasa aérea. Esta cantidad de carbono representa US\$ 13,353.16 en bonos de carbono para el precio del 2020. La castaña (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) fue la especie con mayor cantidad de carbono almacenado entre los siete sistemas agroforestales, mientras que el pashaco (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) mostró una considerable cantidad de carbono almacenado a pesar de tener solo cinco años de haber sido plantado. Nuestros resultados demuestran que algunas combinaciones de especies forestales y frutales generan una competencia interespecífica que favorece al SAF haciéndolo más productivo en términos de crecimiento y de almacenamiento de carbono.

Palabras clave: Amazonía peruana, Sistemas agroforestales, Biomasa aérea, Stock de carbono

¹ Estación Experimental Agraria San Bernardo – Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Madre de Dios, Perú.

* Autor de Correspondencia: edith-clemente-a@outlook.com

Abstract

Agroforestry systems are a sustainable management alternative for land degraded by conventional agriculture in the Peruvian Amazon, this could prevent further deforestation of forests and the loss of more ecosystems. The tree component in agroforestry systems makes them more similar to natural forests than many other land use systems such as pastures, monocultures, among others. This characteristic also affects the carbon sequestration potential of agroforestry systems, since they represent a considerable carbon sink both above and below ground. Consequently, it can represent a considerable economic income from carbon credits, which is an international decontamination mechanism to reduce polluting emissions to the environment, with a relatively new market and with great relevance in mitigating climate change. In this sense, the carbon stored in the aerial biomass of seven agroforestry systems established more than 16 years ago at the San Bernardo Agricultural Experimental Station (EEA) was quantified and economically valued. The diameter of fruit and forest species was used as input for the allometric equations that allowed us to estimate biomass and carbon stored in the tree component of agroforestry systems. The seven agroforestry systems of the EEA San Bernardo have a total of 483.81 Mg of carbon stored in their aerial biomass. This amount of carbon represents USD \$13,353.16 in carbon credits for the 2020 price. Brazil nut (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) was the species with the highest amount of carbon stored among the seven agroforestry systems, while pashaco (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) showed considerable carbon storage despite being only five years old. Our results show that some combinations of forest and fruit species generate interspecific competition that favors SAF, making it more productive in terms of growth and carbon storage.

Key words: Peruvian Amazon, Agroforestry systems, Aerial biomass, Carbon stock

Introducción

La región de Madre de Dios, así como las demás regiones amazónicas del Perú tienen como realidad una tierra sobreexplotada y subutilizada debido a la agricultura migratoria, como causa principal de su deforestación (Perz *et al.* 2005). Esto ocasiona pérdida de la diversidad biológica, erosión de suelos, desregulación de flujos hídricos y, a través de las quemadas, evacúa enormes cantidades de dióxido de carbono (Lavelle *et al.* 2014). Este problema se debe a agricultores pequeños o de gran escala con carencia de asistencia técnica y financiera. Por tal motivo, no tienen alternativas para hacer un uso intensivo y sostenible de estas tierras deforestadas y se tiene como un gran desafío investigar, desarrollar y promover tecnologías más sostenibles a nivel económico y ecológico.

Los sistemas agroforestales (SAFs) promueven el manejo del paisaje, con árboles o arbustos interactuando con los cultivos y/o ganado en un diagrama integral en fases temporales o secuenciales y todo esto ofrece una amplia

variedad de beneficios y servicios (Nair 2011). En el SAF las especies leñosas (árboles y arbustos) tienen como función principal, mantener o mejorar la productividad del sistema mediante la protección de los cultivos del intenso calor y la acción hídrica, disminuir la evapotranspiración y aumentar el ciclaje de nutrientes (Tscharntke *et al.* 2011). Además, el SAF produce otros productos y servicios tales como frutas, madera, leña, plantas aromáticas y medicinales, almacenamiento de carbono, liberación de oxígeno, conservación del suelo, diversificación del paisaje, alimento y refugio de fauna silvestre.

Sin embargo, es importante tomar en cuenta la elección de las especies que integrarán los sistemas agroforestales y tener los conocimientos necesarios para un adecuado manejo, sobre todo en la fase inicial, con el establecimiento de plantas juveniles que pueden ser muy vulnerables a las condiciones de campo con muchas limitantes como: la dinámica de la precipitación, altas temperaturas, la textura y fertilidad

del suelo, los ataques de los insectos (Plath *et al.* 2011), el área foliar y la fenología (Pallardy 2010) que pueden afectar negativamente la supervivencia de las plantas y su crecimiento óptimo.

Entre los ecosistemas terrestres, los bosques son los que almacenan la mayor cantidad de carbono, mediante la fotosíntesis que toma el dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera y lo transforma en el carbono orgánico de las estructuras vegetales, que luego se convierte en detritos y suelo, formando así un almacén de carbono sobre y debajo del suelo (Jaramillo 2004). La vegetación arbórea o arbustiva incluida en los SAFs amplía la capacidad de captura de carbono considerablemente, debido principalmente al mayor volumen de biomasa vegetal (Nair 1993). Por otro lado, es importante también notar que, se pueden almacenar gran cantidad de carbono debajo del suelo tanto en la biomasa de las raíces, como en el carbono orgánico e inorgánico almacenado en el suelo (Nair *et al.* 2009). Mientras que, las cantidades de carbono almacenado en la biomasa principalmente van a depender de la proporción y tamaño de los árboles y arbustos (Montagnini y Nair 2004). La producción de biomasa aérea en diferentes tipos de SAFs y regiones ecológicas varía de $2.3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a $48 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, dependiendo del número de componentes, estratos y arreglos espaciales y temporales (Young 1997). De acuerdo con Oelbermann *et al.* (2004), el potencial biológico de captura anual de carbono en biomasa aérea en SAFs de zonas tropicales es de $2.1 \times 10^9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, mientras en zonas templadas es de $1.9 \times 10^9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, resaltando que existe una mayor captura de carbono en las zonas tropicales.

Los bonos de carbono surgieron por la necesidad de cumplir con los objetivos del protocolo de Kyoto de lograr la estabilizar la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera a niveles que podrían prevenir la peligrosa interferencia antropogénica con el sistema climático (UNFCCC 1997: Artículo 2). Un bono de carbono se define como la captura o reducción de una tonelada de dióxido de Carbono equivalente debido a la implementa-

ción de un proyecto de mitigación, con un escenario base (Schulze *et al.* 2000). Existen distintos tipos de proyectos con posibilidad de ser certificados, desde los de energías renovables y eficiencia energética, pasando por los tratamientos de residuos y efluentes, hasta proyectos forestales. Estos últimos a su vez pueden ser de diferentes tipos desde las plantaciones forestales hasta la conservación de bosques nativos. En el caso específico de la emisión de bonos de carbono de proyectos de mitigación forestal depende de una certificación bajo un estándar determinado que utiliza una metodología aprobada que incluye el tipo de proyecto a validar, la demostración de adicionalidad frente a un escenario sin el proyecto y la permanencia, entre otros. Este proceso de certificación garantiza que el bono sea único, mediante un registro de reducción de emisiones. Los precios que se reciben por un certificado equivalente a una tonelada de CO_2 varían mucho y dependen del mercado, del tipo de proyecto de compensación de carbono y de la economía global (Seeberg, 2010). En el Perú, el Fondo Nacional del Ambiente - Perú es la institución encargada de promover el mercado de carbono, esta es la encargada de evaluar y calificar los proyectos para que puedan ser considerados en el mercado de carbono como respaldos para la emisión de Certificados de Emisiones Reducidas (Mayorca Morales *et al.* 2018).

Los sistemas agroforestales son una alternativa de desarrollo y de conservación en la región Madre de Dios. La evaluación del carbono almacenado brindará información relevante sobre la importancia del servicio ambiental de captura de carbono en los diferentes sistemas agroforestales. Asimismo, permitirá estimar el ingreso por créditos o bonos de carbono, que pueden ser una fuente de ingresos complementarios para los agricultores que tendrán a los SAFs como una opción aún más rentable que la agricultura tradicional. Por lo tanto, esta investigación busca evaluar el carbono almacenado en la biomasa aérea, así como, estimar el valor económico potencial de ese carbono almacenado en los siete sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo.

Materiales y Métodos

Área de estudio - La investigación se realizó en la Estación Experimental Agraria (EEA) San Bernardo del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), localizada en el sector Fitzcarrald del distrito de Tambopata, provincia de Tambopata de la región de Madre de Dios, ubicada en las coordenadas 12°41'03.76"S latitud y 69°22'50.48"O longitud, con una altitud de 220 m. Con un clima cálido y húmedo, con una temperatura promedio de 25.4 °C y 2280 mm de precipitación media anual y humedad relativa media de 81.1% (SE-NAMHI y ANA 2010).

Diseño experimental - Se utilizaron siete sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo, que fueron instalados en diferentes fechas desde el 2003 y se vienen desarrollando exitosamente. Estos sistemas agroforestales difieren en su combinación de especies tanto forestales como frutales (Cuadro 1).

Metodología - La circunferencia del fuste o tallo de todos los individuos presentes en cada sistema agroforestal (árboles o arbustos) fue medida con una cinta métrica a la altura de pecho (1.30 m sobre el suelo) para las especies forestales y a una altura de 30 cm por encima del suelo para las especies frutales como cacao, copoazú y limón (Fig. 1). La circunferencia fue transformada a diámetro mediante la siguiente fórmula:

$$\text{diámetro} = \frac{\text{circunferencia}}{\pi}$$

El diámetro fue utilizado como insumo para estimar la biomasa acumulada en la parte aérea de las plantas (biomasa aérea) mediante ecuaciones alométricas. Para las especies frutales se utilizó las ecuaciones descritas en el Cuadro 2, mientras que para las especies forestales se utilizó la ecuación de Arevalo *et al.* (2002). Se sumó la biomasa obtenida por cada árbol (kg) en cada sistema agroforestal, el resultado se convirtió de kg a megagramos (Mg) y se rela-



Figura 1. Mediciones del diámetro de los árboles en los sistemas agroforestales; (izquierda) medición de una especie forestal a 1.30 m del suelo; (derecha) medición de copoazú a una altura de 30 cm del suelo.

SAFs	ESPECIES FORESTALES		ESPECIES FRUTALES		TIEMPO DE INSTALACION	AREA (ha)
	NOMBRES COMUNES	NOMBRES CIENTIFICOS	NOMBRES COMUNES	NOMBRES CIENTIFICOS		
SAF01	Castaña	<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.	Pijuayo	<i>Bactris gasipaes</i> Kunth	17 años	0.84
	Caoba	<i>Swietenia macrophylla</i> King	Copoazú	<i>Theobroma grandiflorum</i> (Wild. Ex Spreng.) K. Schum.		
	Cedro	<i>Cedrela odorata</i> L.	Pijuayo	<i>Bactris gasipaes</i> Kunth		
SAF02	Castaña	<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.	Copoazú	<i>Theobroma grandiflorum</i> (Wild. Ex Spreng.) K. Schum.	17 años	0.77
SAF03	Cedro	<i>Cedrela odorata</i> L.	Pijuayo	<i>Bactris gasipaes</i> Kunth	6 años	1
	Tahuari amarillo	<i>Tabebuia serratifolia</i> (Vahl) G. Nicholson.	Limón	<i>Citrus x latifolia</i> Tanaka ex Q. Jimenez		
SAF04	Pumaquiro	<i>Aspidosperma macrocarpon</i> Mart.	Pijuayo	<i>Bactris gasipaes</i> Kunth	1 año	1
	Bolaina blanca	<i>Guazuma crinita</i> Mart.				
	Cedro	<i>Cedrela odorata</i> L.	Copoazú	<i>Theobroma grandiflorum</i> (Wild. Ex Spreng.) K. Schum.		
SAF05	Cedro	<i>Cedrela odorata</i> L.	Plátano	<i>Musa x paradisiaca</i> L.	6 años	1
	Castaña	<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl.	Copoazú	<i>Theobroma grandiflorum</i> (Wild. Ex Spreng.) K. Schum.		
SAF06	Shihuahuaco	<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Forsyth f.	Plátano	<i>Musa x paradisiaca</i> L.	7 años	0.6
	Pashaco blanco	<i>Schizolobium amazonicum</i> Huber ex Duce	Cacao	<i>Theobroma cacao</i> L.		
	Shiringa	<i>Hevea brasiliensis</i> (Willd. ex A. Juss.) Mill. Arg.	Plátano	<i>Musa x paradisiaca</i> L.		
SAF07					5 años	1

Cuadro 1. Sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo.

cionó a la superficie o área cubierta por el SAF (ha) para obtener el valor en Mg ha^{-1} . Se estima que el carbono representa el 49% de la biomasa, por lo que se multiplicó la biomasa por 0.49 para obtener la cantidad de carbono almacenado en cada SAF (Mg ha^{-1}). En los sistemas agroforestales con un área menor de 1 ha, se extrapoló a una hectárea, para tener valores comparables entre todos los SAFs.

Análisis de datos - Se comparó los gráficos de cajas generados con el programa R (versión R.4.0.2) y estadísticamente el promedio de carbono almacenado en los individuos de cada especie de cada SAF (Mg, "a nivel de individuo"). Para la comparación estadística se usó un análisis de varianza para datos no paramétricos (prueba de Kruskal-Wallis) debido a que los datos no tuvieron una distribución normal. Mientras que "a nivel de sistema agroforestal" se calculó la sumatoria del total de carbono almacenado en la biomasa aérea de cada especie dentro de cada uno de los sistemas agroforestales y la sumatoria del total de carbono almacenado dentro de cada SAF (Mg ha^{-1}).

Resultados

A nivel de individuo

En el SAF01, los individuos de la especie castaña, en promedio, almacenaron más carbono en la biomasa aérea que el resto de las especies, tanto forestales como frutales. Entre las especies frutales, los individuos de copoazú tuvieron una mayor cantidad de carbono que el pijuayo (Fig. 2).

En el SAF02 (Fig. 3), la castaña igualmente representó una gran cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea de este SAF en comparación con las especies frutales como copoazú, pijuayo y plátano; estas especies claramente resultan inferiores en comparación a la castaña. Sin embargo, existe diferencias entre las especies frutales: copoazú y plátano no difieren significativamente al igual que pijuayo y plátano, mientras que copoazú y pijuayo si difieren significativamente. Este SAF fue instalado hace 17 años.

En el SAF03 (Fig. 4), el cedro fue significativamente diferente de las especies frutales limón y pijuayo. Sin embargo, las dos especies frutales no se diferencian significativamente una de la otra. En este SAF, instalado hace 6 años, no es tan evidente la diferencia entre las especies forestales y frutales.

Entre las especies forestales del SAF04 (Fig. 5) bolaina fue superior al tahuari y pumaquiro; se observó que existe diferencia significativa entre las tres especies. Así mismo, se pudo observar que pijuayo fue después de bolaina la segunda especie que más contribuyó con el carbono almacenado en la biomasa aérea de este SAF, que fue instalado hace solo un año.

En el SAF05 (Fig. 6), la especie cedro fue la especie con mayor carbono almacenado en la biomasa aérea. Las tres especies difieren significativamente una de otra, comparando las medias se puede notar que la castaña es superior al copoazú y el copoazú es superior al plátano. Este sistema agroforestal fue instalado hace 4 años.

ESPECIE	ECUACIÓN	AUTOR
Especies forestales	$BA=0.1184*DAP^{2.53}$	Arevalo <i>et al.</i> 2002
Copoazú	$BA=4.1194*DAP-5.7818$	Brancher 2010
Cacao	$BA=3.3973*DAP-4.8961$	Brancher 2010
Plátano	$BA=0.3381 * \exp(0.1928*DAP)$	Brancher 2010
Pijuayo	$BA=0.97+0.078AB-0.00094AB^2+0.0000065AB^3$	Schroth <i>et al.</i> 2002
Limón	$BA=-6.64+0.279BA+0.00051AB^2$	Schroth <i>et al.</i> 2002

Cuadro 2. Fórmulas para la estimación de biomasa aérea según especie. DAP= diámetro a la altura del pecho, AB= área basal.

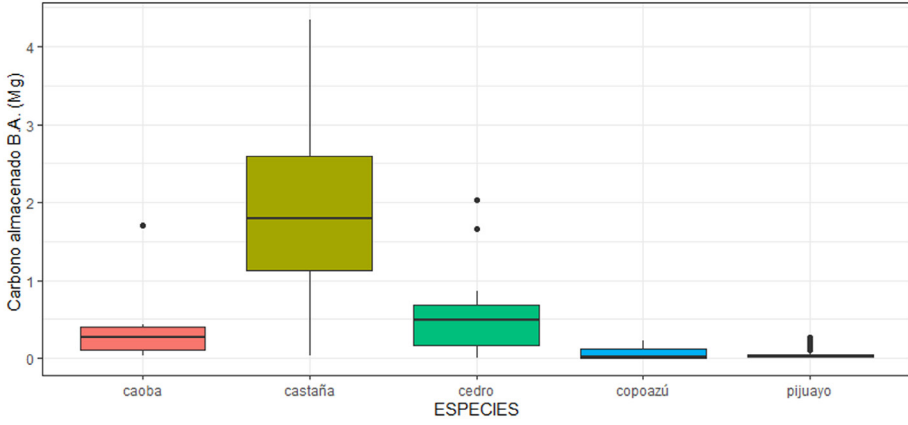


Figura 2. Promedio de carbono almacenado en la biomasa aérea de los individuos de cada especie del SAF01.

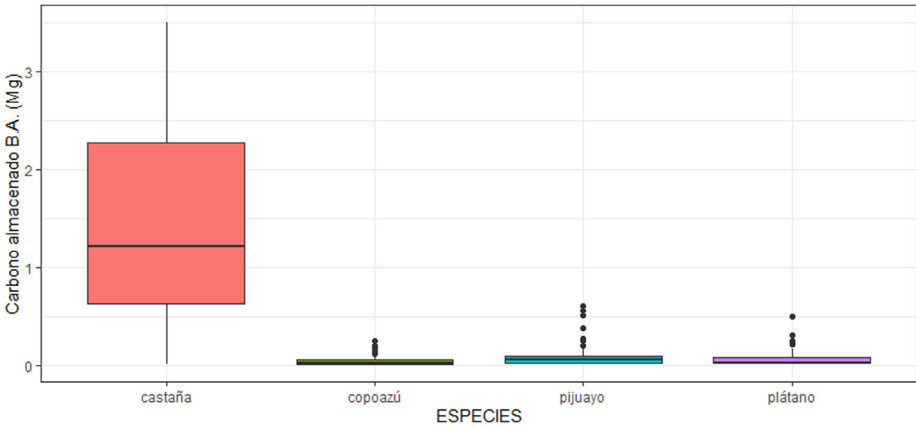


Figura 3. Carbono almacenado en la biomasa aérea de los árboles del SAF02.

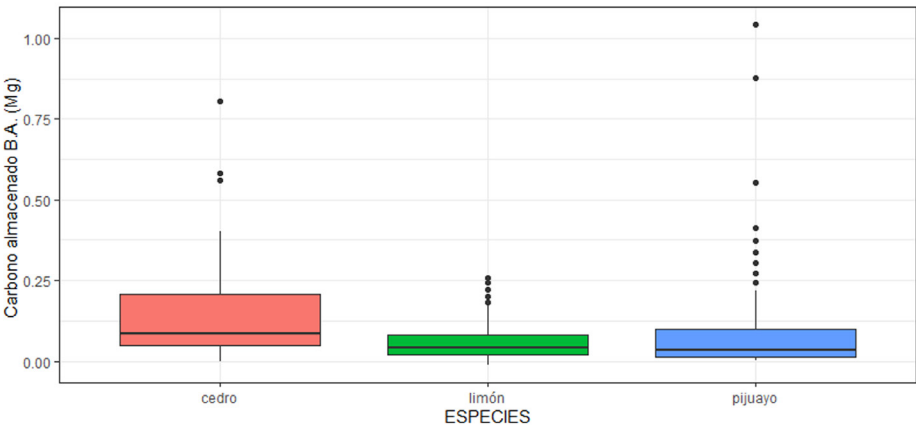


Figura 4. Carbono almacenado en la biomasa aérea de los árboles del SAF03.

En el SAF06 (Fig. 7), la especie castaña fue superior en carbono almacenado en la biomasa aérea que las especies frutales. Mientras copoazú fue superior al plátano y diferente significativamente, este SAF fue instalado hace 7 años.

En el SAF07 (Fig. 8), la especie pashaco representó enormemente el carbono almacenado en la biomasa aérea de este sistema agroforestal, muy por encima de las otras especies forestales, seguido del shihuahuaco quien superó a la shiringa. Mientras que las especies frutales cacao y plátano difirieron significativamente y fueron menores en comparación a las especies forestales. El cacao fue mayor en comparación del plátano en el carbono almacenado en la biomasa aérea; este sistema agroforestal fue instalado hace 5 años.

A nivel del sistema agroforestal

Los sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo tuvieron diferentes cantidades de carbono almacenado en la biomasa aérea (Cuadro 3). Proyectando todos los SAFs a un área estándar de 1 ha, los SAFs que tuvieron la mayor cantidad de carbono almacenado tienen edades distintas: el SAF02 con 154.5 Mg ha⁻¹ y 17 años de edad, seguido del SAF07 con 116.11 Mg ha⁻¹ y 5 años de edad. El SAF01 y el SAF05 mostraron valores similares en términos de carbono almacenado (94.5 y 78.71 Mg ha⁻¹) y divergentes en términos de edad (17 y 7 años). Por último, el SAF04 fue el sistema agroforestal con menos carbono almacenado en la biomasa aérea de los árboles de bolaina, pumaquiro y tahuari, este SAF tiene un año de edad.

Valoración económica

El carbono almacenado total en los siete sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo alcanzó los 483.81 Mg. El precio por Mg de carbono en la página web de SENDECO CO2 (<https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>) se ha incrementado desde 2016 (Fig. 9) y en setiembre de 2020 alcanzó los 27.6 dólares americanos (US\$). Los siete SAFs de la EEA San Bernardo alcanzaron un valor total de US\$ 13,353.16 dólares americanos por el carbono almacenado en su biomasa aérea.

Discusión

A nivel de individuo

Existieron diferencias entre las especies que componen cada uno de los sistemas agroforestales. Al comparar el SAF01 y el SAF02 encontramos que la castaña fue la especie con mayor carbono almacenado en ambos SAFs y que ambos SAFs tienen la misma edad. La castaña tuvo un aporte alto de carbono porque es una especie que muestra buen crecimiento cuando tiene competencia interespecífica (Dinkelmeier *et al.* 2002), ya que toma una gran parte de los nutrientes del suelo en los cultivos con árboles asociados. Además, Schroth *et al.* (2015) indicaron que la castaña en condiciones agroforestales sin sombra y con la ayuda de fertilizantes, muestra un crecimiento más rápido en altura y diámetro hasta lograr dominar a especies asociadas de crecimiento más lento, como la caoba y el cedro presentes en SAF01.

En cuanto a la especie cedro, que está presente en el SAF03 y SAF05, en estos sistemas existen diferencias a pesar de que ambos SAFs tienen la misma edad y el cedro es la única especie forestal. En el SAF03, el cedro está acompañado con pijuayo y limón, mientras que para el SAF05 con copoazú y plátano. Analizando estas especies frutales podemos notar que el pijuayo es una palmera que se caracteriza por tener solo crecimiento primario, que se caracteriza por un rápido crecimiento en altura. Esto podría limitar la cantidad de luz que recibe el cedro, que solo necesita de sombra en sus primeros estadios para evitar el ataque de insectos, como lo observado por Jaimez *et al.* (2013), quienes utilizaron al cacao como especie barrera, que es muy parecida al copoazú que se encuentra en el SAF05; entonces el copoazú podría ser una mejor combinación para los cultivos de cedro que el pijuayo. Esta barrera de sombra produce una competencia lateral por la luz en los SAFs que puede mejorar el crecimiento y la calidad del cedro (Navarro *et al.* 2004, Paul y Weber 2013).

En el caso del SAF04 (Fig. 5) que está compuesto por especies como tahuari, pumaquiro y bolaina, tiene a la especie bolaina como el ma-

SAFs	ESPECIES	CARBONO (Mg)	ÁREA	CARBONO (Mg/ha)	TOTAL (Mg/ha)
SAF01	Castaña	53.09	0.84	63.204022	94.54
	Caoba	3.84		4.567814	
	Cedro	6.62		7.886431	
	Pijuayo	6.7		7.976203	
	Copozú	9.16		10.906379	
SAF02	Castaña	103.22	0.77	134.047877	154.49
	Pijuayo	6.65		8.631569	
	Plátano	4.26		5.537704	
	Copazú	4.83		6.276747	
SAF03	Cedro	14.33	1	14.33	53.82
	Pijuayo	28.45		28.45	
	Limón	11.03		11.03	
SAF04	Tahuari amarillo	0.3	1	0.3	6.69
	Pumaquiro	0.13		0.13	
	Bolaina blanca	2.86		2.86	
	Pijuayo	3.4		3.4	
SAF05	Cedro	65.32	1	65.32	78.71
	Copazú	11.18		11.18	
	Plátano	2.2		2.2	
SAF06	Castaña	14.65	0.6	24.4264	50.16
	Copazú	8.89		14.81022	
	Plátano	6.57		10.92812	
SAF07	Shihuanhuaco	20.4	1	20.4	116.11
	Pashaco	73.5		73.5	
	Shiringa	4.89		4.89	
	Cacao	9.29		9.29	
	Plátano	4.89		4.89	

Cuadro 3. Carbono almacenado en la biomasa aérea de los sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo.

yor almacén de carbono de la biomasa aérea en un año de instalado, esto debido a que la bolaina es una especie pionera de rápido crecimiento que suele colonizar las llanuras inundables y bosques secundarios disturbados (Weber y Montes 2008). Así también, los agricultores en la Amazonia peruana consideran a la bolaina como una especie de prioridad debido a que

esta especie puede ser plantada con otros cultivos, proveyendo productos maderables desde una edad temprana y produciendo cosechas sucesivas (Sotelo Montes y Weber 1997) y contribuir en los ingresos (Labarta y Weber 1998).

En cuanto, al SAF06 (Fig. 7) tiene a la castaña como única especie forestal que almacena la mayor cantidad de carbono de la biomasa

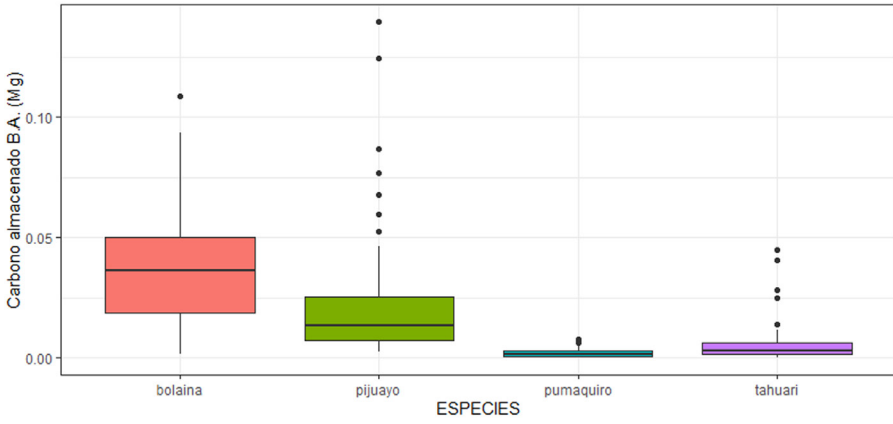


Figura 5. Carbono almacenado en la biomasa aérea de los árboles del SAF04.

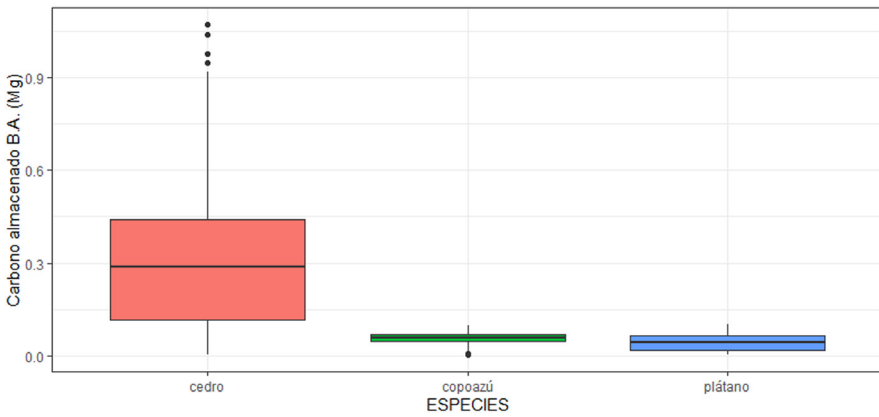


Figura 6. Carbono almacenado en la biomasa aérea de los árboles de SAF05.

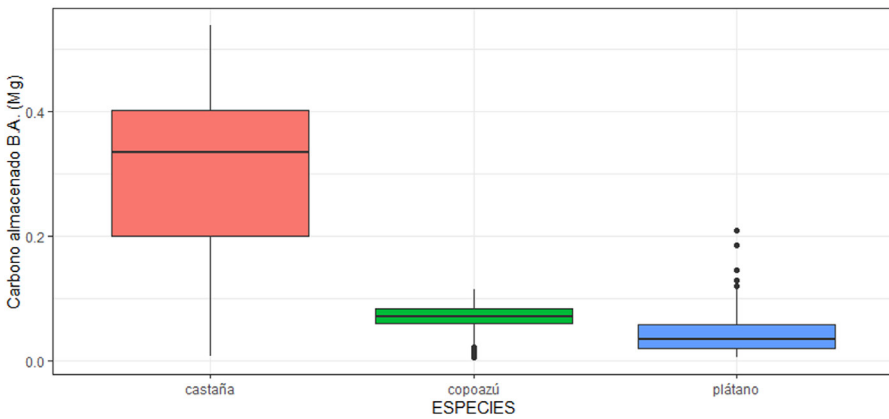


Figura 7. Carbono almacenado en la biomasa aérea de los árboles de SAF06.

aérea y fue instalada en el 2013. Por otro lado, el SAF07 (Fig. 8) posee tres especies forestales como shihuahuaco, pashaco y shiringa que almacenan una gran cantidad de carbono en su biomasa aérea a pesar de haberse instalado hace 5 años. Al analizar los dos SAFs podemos notar que el pashaco supera enormemente a las demás especies debido a que tiene un crecimiento rápido y homogéneo debido a que es una especie demandante de luz como lo describió Tonini *et al.* (2008).

A nivel de sistema agroforestal

Comparando el carbono almacenado en todos los sistemas agroforestales y proyectados a 1 ha (Fig. 9), se observa que SAF02 y SAF07 son los que mayores valores de carbono almacenan a lo largo de estos años a pesar de que tienen una diferencia de 12 años de instalación, donde el SAF07 parece una buena opción en producción forestal debido a su rápido crecimiento y mayor cantidad de especies forestales y frutales y que en conjunto almacenan una considerable cantidad de carbono de la biomasa aérea en pocos años. Esto debido a que el pashaco y shihuahuaco son especies de rápido crecimiento, siendo estas especies demandantes de luz y al parecer las más adecuadas a los suelos de Madre de Dios (Uchida y Campos 2000, Tonini *et al.* 2008).

Por otro lado, la castaña y cedro están presentes en tres sistemas agroforestales y repre-

sentan las especies con mayor cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea, con la castaña siendo superior al cedro, debido a que esta se desarrolla en claros del bosque como fue descrito por Schöngart *et al.* (2015), y depende de estos para su regeneración natural. Así también parece que existe un mayor crecimiento de esta especie cuando está acompañado de otras especies forestales al asemejarse a sus condiciones naturales a diferencia de las plantaciones como lo describieron Dinkelmeyer *et al.* (2002).

Valoración económica

En total los siete sistemas agroforestales representan 483.81 Mg de C capturado en la biomasa aérea, representando económicamente US\$ 13,353.16. Esto representa una suma nada despreciable para solo 6.21 ha utilizadas en estos siete sistemas agroforestales que fueron instaladas desde el 2003 hasta el 2019. Esto podría representar un ingreso adicional para los agricultores de frutales y productos forestales, donde este mercado de créditos o bonos de carbono está en crecimiento debido a que su precio está incrementándose desde el 2016 (Fig. 9). Este mercado de carbono es relativamente nuevo y con mucha relevancia en la mitigación del cambio climático, con iniciativas como el REDD+ (reducción de emisiones derivadas de la deforestación y degradación de los bosques en países en desarrollo) que lidera el MINAM

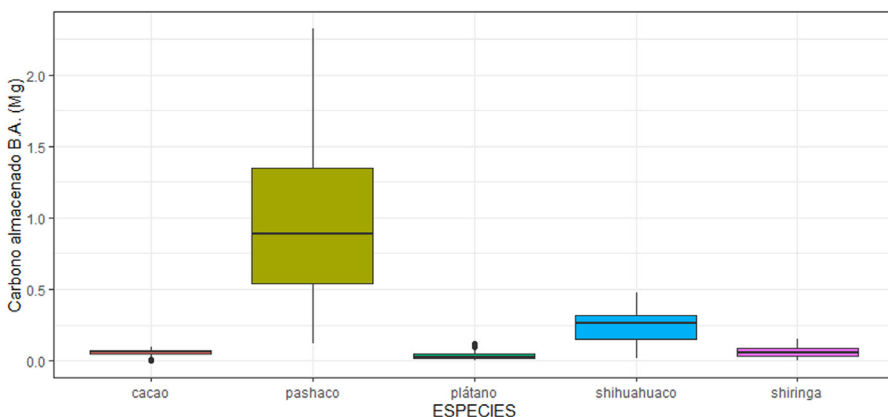


Figura 8. Carbono almacenado en la biomasa aérea de los árboles de SAF07.

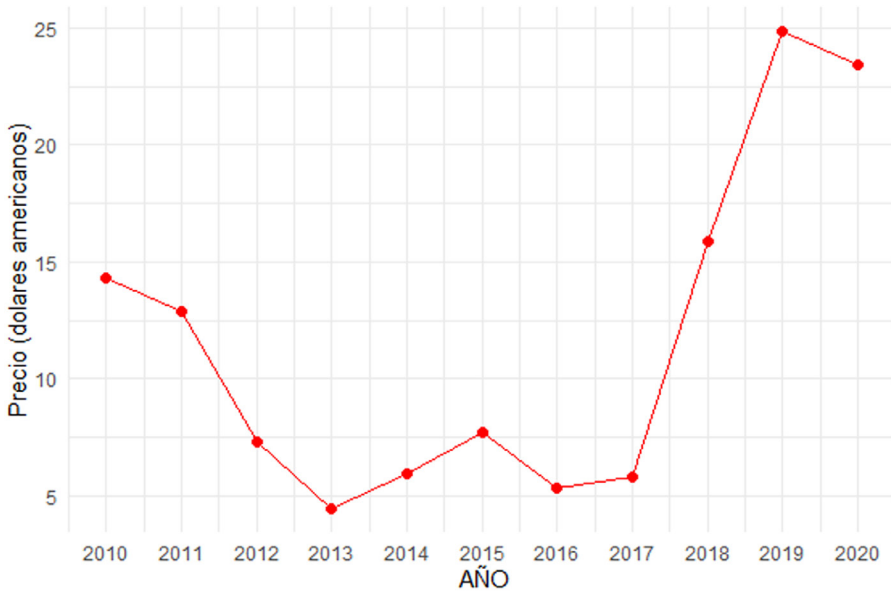


Figura 9. Precio del carbono (dólares americanos) desde el 2010 al 2020, por Mg de carbono.
Fuente: Elaborado con base en Sendeco2 2021.

en el Perú, con sus primeras experiencias en la conservación de bosques naturales y áreas protegidas del país, como en la Reserva Nacional de Tambopata y Parque Bahuaja-Sonene donde Pacifico seguros ha invertido medio millón de dólares en bonos de carbono que corresponden a 5000 ha de bosques protegidos. Con el tiempo este mercado se expandirá a plantaciones forestales en todo el país, y permitirá acceder a los beneficios ecológicos y económicos que pueden proveer los SAFs.

Conclusiones

Las especies presentan diferentes cantidades de carbono almacenado en su biomasa aérea, dependiendo de la combinación de especies forestales y frutales dentro de un sistema agroforestal, como la castaña (*Bertholletia excelsa*) que posee individuos de la misma edad en ambos sistemas agroforestales, pero posee mayores cantidades de carbono almacenado en el sistema agroforestal, a diferencia de un sistema donde este acompañado de otras especies

forestales y desarrollando una competencia interespecífica. También el cedro (*Cedrela odorata*) de la misma edad obtuvo diferentes cantidades de carbono almacenado en su biomasa aérea cuando está acompañado de diferentes especies frutales como en el caso de copoazú (*Theobroma grandiflorum*) y plátano (*Musa x paradisiaca*), presentando una cantidad superior que cuando está acompañado de piñuayo (*Bactris gasipaes*) y limón (*Citrus x latifolia*), debido a los efectos que pueden causar en los primeros estadios de desarrollo del cedro.

Dentro de los sistemas agroforestales, podemos observar que la castaña (*Bertholletia excelsa*) (presente en el SAF01, SAF02 y SAF06) es la especie con mayor cantidad de carbono almacenado en su biomasa aérea, tanto comparando con las demás especies forestales del SAF como entre SAFs. Asimismo, la especie pashaco (*Schizolobium amazonicum*) (presente en el SAF07) logró acumular la segunda mayor cantidad de carbono en su biomasa aérea que las demás especies forestales y SAFs con solo 5 años de instalación.

Los sistemas agroforestales representan considerables cantidades de carbono almacenado en la biomasa aérea de sus especies forestales y frutales, estos podrían representar considerables ingresos económicos para los agricultores. Donde, además de beneficiarse con la producción de los frutales y productos forestales podrían recibir ingresos con la captura de carbono de sus sistemas agroforestales.

Agradecimientos

Se agradece al Programa Nacional de Estudios e Investigación para el Desarrollo Forestal y Cambio Climático del INIA que brindó el presupuesto para el desarrollo de los sistemas agroforestales dentro de la EEA San Bernardo a lo largo de estos años, así como también al Ing. José Gil por la información brindada sobre la instalación de los sistemas agroforestales. Me gustaría agradecer también a Mvz. Nicol Condori, Ing. Josue Tafur, Ing. Amilcar Maslucan e Ing. Francys Garcia por su apoyo en la colecta de datos de los sistemas agroforestales.

Referencias

Arevalo, LA; Alegre, JC; Vilcahuaman, LJM. 2002. Metodología para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra. Embrapa Florestas, Colombo, Brasil. Consultado 15 mar. 2021. Disponible en <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/17083/1/doc73.pdf>.

Brancher, T. 2010. Estoque e ciclagem de carbono de sistemas agroflorestais em Tomé-Açu, Amazônia Oriental (en línea). Tesis M. Sc. Belém, Para, Brasil. Universidade Federal do Pará. 58 p. Consultado 15 mar. 2021. Disponible en <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/61103/1/Dissertacao-Tobias-Brancher.pdf>.

Dinkelmeyer, H; Lehmann, J; Kaiser, K; Teixeira, W; Renck, A; Zech, W. 2002. Fate of applied N fertilizer in mixed cropping systems in the Central Amazon. In III Congreso brasileiro de Sistemas Agroflorestais. EMBRAPA, Manaus, Brasil. p. 196-198 Consultado 15 mar. 2021.

Disponible en <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/670612/fate-o-f-applied-n-fertilizer-in-mixed-cropping-systems-in-the-central-amazon>.

Jaimez, RE; Araque, O; Guzman, D; Mora, A; Espinoza, W; Tezara, W. 2013. Agroforestry systems of timber species and cacao: survival and growth during the early stages. Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics 114(1):1-11. Consultado 15 mar. 2021. Disponible en <https://jarts.info/index.php/jarts/article/view/2012112642171/424>.

Jaramillo, VJ. 2004. El ciclo global del carbono. En Martínez, J; Fernández, A (coord.). Cambio climático: una visión desde México 77. 1 ed. México. Instituto Nacional de Ecología. p. 77-85. Consultado el 23 de ago. 2021. Disponible en https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/cambio_climatico_una_vision_desde_mexico_martinez_bremauntz.pdf.

Labarta, RA; Weber, JC. 1998. Valorización económica de bienes tangibles de cinco especies arbóreas agroforestales en la Cuenca Amazónica Peruana. Revista Forestal Centroamericana 23:12-21. Consultado 15 mar. 2021. Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/9705>.

Lavelle, P; Rodríguez, N; Arguello, O; Bernal, J; Botero, C; Chaparro, P; Gómez, Y; Gutiérrez, A; Del Hurtado, M; Loaiza, S; Pullido, S; Rodríguez, E; Sanabria, C; Velásquez, E; Fonte, S. 2014. Soil ecosystem services and land use in the rapidly changing Orinoco River Basin of Colombia. Agriculture, Ecosystems & Environment 185:106-117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.12.020>.

Mayorca Morales, JP; Motta Fernandez, BA; Rios Brito, EI; Tenazoa Huitron, GI. (2018). Oportunidades de desarrollo del mercado de bonos de carbono en el Perú (en línea). Tesis M. Sc. Lima, Perú. Universidad Esan. 157 p. Consultado 4 may. 2022. Disponible en <https://repositorio.esan.edu.pe/handle/20.500.12640/1405>.

Montagnini, F; Nair, PKR. 2004. Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. Agroforestry

- Systems 61(281):281-295. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029005.92691.79>.
- Nair, PKR. 2011. Agroforestry systems and environmental quality: introduction. *Journal of environmental Quality* 40(3):784-790. Consultado 15 mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200800030>.
- Nair, PKR. 1993. An introduction to agroforestry. Dordrecht, Países Bajos, ICRAF.
- Nair, PKR; Kumar, BM; Nair, VD. 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of plant nutrition and soil science* 172(1):10-23. Consultado 15 mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200800030>.
- Navarro, C; Montagnini, F; Hernández, G. 2004. Genetic variability of *Cedrela odorata* Linnaeus: results of early performance of provenances and families from Mesoamerica grown in association with coffee. *Forest Ecology and Management* 192(2-3):217-227. Consultado 15 mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.037>.
- Oelbermann, M; Voroney, RP; Gordon, AM. 2004. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, ecosystems & environment* 104(3):359-377. Consultado 15 mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.04.001>.
- Pallardy, SG. 2010. *Physiology of woody plants*. Academic Press. Consultado 23 ago. 2021. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/book/9780120887651/physiology-of-woody-plants>.
- Paul, C; Weber, M. 2013. Intercropping *Cedrela odorata* with shrubby crop species to reduce infestation with *Hypsipyla grandella* and improve the quality of timber. *International Scholarly Research Notices Forestry* 2013: 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/637410>.
- Perz, SG; Aramburú, C; Bremner, J. 2005. Population, land use and deforestation in the Pan Amazon Basin: a comparison of Brazil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú and Venezuela. *Environment, development and sustainability* 7:23-49. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-003-6977-9>.
- Plath, M; Mody, K; Potvin, C; Dorn, S. 2011. Establishment of native tropical timber trees in monoculture and mixed-species plantations: small-scale effects on tree performance and insect herbivory. *Forest Ecology and Management* 261:741-750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.12.004>.
- Schöngart, J; Gribel, R; da Fonseca-Junior, S; Haugaasen, T. 2015. Age and growth patterns of Brazil nut trees (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) in Amazonia, Brazil. *Biotropica* 47(5):550-558. DOI: <https://doi.org/10.1111/btp.12243>.
- Schroth, G; D'Angelo, SA; Teixeira, WG; Haag, D; Lieberei, R. 2002. Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. *Forest ecology and management* 163(1-3):131-150. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00537-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00537-0).
- Schroth, G; da Mota, M; Elias, ME. 2015. Growth and nutrient accumulation of Brazil nut trees (*Bertholletia excelsa*) in agroforestry at different fertilizer levels. *Journal of Forestry Research* (26):347-353. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0037-9>.
- Schulze, ED; Wirth, C; Heimann, M. 2000. Managing forests after Kyoto. *Science* 289:2058-2059. DOI: <http://doi.org/10.1126/science.289.5487.2058>.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Perú); ANA (Autoridad Nacional del Agua, Perú). 2010. Estudio diagnóstico hidrológico de la cuenca Madre de Dios cuenca del río zaña. Lima, Perú. Consultado 15 mar. 2021. Disponible en <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/35>.
- Seeberg, C. 2010. Carbon Finance Possibilities for Agriculture, Forestry and Other Land Use Projects in a Smallholder Context. Consultado el 28 abr. 2022. Disponible en http://www.fao.org/fileadmin/templates/ex_act/pdf/carbone_finance.pdf.

Sendeco2. 2021. Precios CO₂ (en línea, sitio web). Consultado 15 mar. 2021. Disponible en <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>.

Sotelo Montes, C; Weber, JC. 1997. Priorización de especies arbóreas para sistemas agroforestales en la selva baja del Perú. *Agroforestería en las Américas* 4(14):12-17. Consultado 15 mar. 2021. Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6702/A2654e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Tonini, H; de Oliveira, MM; Schwengber, D. 2008. Growth of Amazon native species submitted to the plantation in the Roraima state. *Ciência Florestal* 18(2):151-158. DOI: <https://doi.org/10.5902/19805098453>.

Tscharntke, T; Clough, Y; Bhagwat, SA; Buchori, D; Faust, H; Hertel, D; Hölscher, D; Jührbandt, J; Kessler, M; Perfecto, I; Scherber, C; Schroth, G; Veldkamp, E; Wanger, TC. 2011. Multi-functional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes – a review. *Journal of Applied Ecology* 48:619-629. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01939.x>.

UNFCCC. 1997. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. In Proceedings of the 3rd conference of the Parties, FCCC/CP/1997/L.7/Add.I. United Nations Framework Convention on Climate Change.

Uchida, T; Campos, MAA. 2000. Influência do sombreamento no crescimento de mudas de cumaru (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.-Fabaceae), cultivadas em viveiro. *Acta amazônica* 30(1):107-114. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-43922000301114>.

Weber, JC; Montes, CS. 2008. Geographic variation in tree growth and wood density of *Guazuma crinita* Mart. in the Peruvian Amazon. *New Forests* (36):29-52. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-007-9080-5>.

Young, A (ed). 1997. *Agroforestry for soil management*. 2 ed. Nairobi, Kenya, CAB international. ICRAF. Consultado 15 mar. 2021. Disponible en <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19971913255>.