

ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA Y CAPTURA DE CARBONO EN UN SISTEMA SILVOPASTORIL: HUEYTAMALCO, PUEBLA

STIMATION OF ABOVEGROUND BIOMASS AND CARBON CAPTURE IN A SILVOPASTORAL SYSTEM: HUEYTAMALCO, PUEBLA

Angel-Hernández, A.^{1*}; Fuentes López, M.E.²; Morales-Flores, S.¹; León-García, E.¹; Enríquez-Quiroz, J.F.¹

¹*Campo Experimental La Posta, Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, km 22.5 carretera Veracruz-Córdoba, Paso del Toro Municipio de Medellín, Ver.*

²*Campo Experimental San Martinito, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Carretera Federal México-Puebla Km 56.5, 74100 Santa Rita Tlahuapan, Pue.*

* Autor de correspondencia: angel.arturo@inifap.gob.mx

Fecha de envío: 23, enero, 2025

Fecha de publicación: 20, julio, 2025

Resumen:

El presente estudio tuvo como objetivo estimar la biomasa aérea y el carbono almacenado en un sistema silvopastoril (SSP) localizado en Hueytamalco, Puebla, con el fin de evaluar su contribución como sumidero de carbono y su potencial ambiental. El área de estudio abarcó 73 hectáreas compuestas por un 95 % de cobertura herbácea predominada por *Cynodon nlemfuensis* y un 5 % de cobertura arbórea, donde *Bursera simaruba* fue la especie dominante. Se emplearon ecuaciones alométricas validadas internacionalmente para estimar la biomasa arbórea, y metodologías específicas para cuantificar el carbono en pastizales y hojarasca. Los resultados mostraron que, pese a su escasa extensión, los árboles almacenaron en promedio 492.34 Mg C ha⁻¹, evidenciando su alta eficiencia como sumideros de carbono. Por su parte, la hojarasca acumuló 56.74 Mg C ha⁻¹, mientras que los pastizales, gracias a su mayor extensión, contribuyeron con 183.16 Mg C ha⁻¹ al almacenamiento total. La variabilidad del carbono entre componentes y especies estuvo influenciada por características morfológicas, densidad de madera y condiciones ecológicas locales, como tipo de suelo y disponibilidad hídrica. Estos resultados refuerzan la idea de que los SSP bien manejados pueden ofrecer beneficios significativos para la mitigación del cambio climático, la conservación de la biodiversidad y la sostenibilidad productiva.

Palabras clave: ganadería sustentable, gases efecto invernadero, sistemas multiespecie.

Abstract:

The present study aimed to estimate aboveground biomass and carbon stored in a silvopastoral system (SSP) located in Hueytamalco, Puebla, in order to evaluate its contribution as a carbon sink and its environmental potential. The study area covered 73 hectares composed of 95% herbaceous cover dominated by *Cynodon nlemfuensis* and 5% tree cover, where *Bursera simaruba* was the dominant species. Internationally validated allometric equations were used to estimate tree biomass, and specific methodologies were used to quantify carbon in grasslands and litterfall. The results showed that, despite their small area, the trees stored an average of 492.34 Mg C ha⁻¹, demonstrating their high efficiency as carbon sinks. Leaf litter accumulated 56.74 Mg C ha⁻¹, while grasslands, thanks to their larger area, contributed 183.16 Mg C ha⁻¹ to the total storage. Carbon variability among components and species was influenced by morphological characteristics, wood density, and local ecological conditions, such as soil type and water availability. These results reinforce the idea that well-managed SSPs can offer significant benefits for climate change mitigation, biodiversity conservation, and productive sustainability.

Keywords: sustainable livestock farming, greenhouse gases, multi-species systems.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas silvopastoriles integran una variedad de especies vegetales los cuales aportan grandes volúmenes de materia orgánica a través de la acumulación de hojarasca, tallos y producción de biomasa de raíces finas (Sotelo et al., 2017), además, capturan y almacenan el carbono atmosférico, fundamental en la mitigación del cambio climático (Oliva et al., 2017). El suelo es el mayor reservorio de carbono (Montagnini et al., 2015), sin embargo, una parte importante del carbono presente en la atmósfera puede ser almacenado de forma natural por las plantas en la biomasa aérea mediante los procesos de fotosíntesis (Contreras-Santos et al., 2021).

La biomasa aérea en diferentes sistemas agroforestales varía considerablemente según factores como la diversidad de especies, la edad de los árboles y sus características estructurales. Según Arenas (2022), se estima que la producción de biomasa aérea en sistemas agroforestales tropicales puede variar de 2.3 Mg ha⁻¹ año⁻¹ a 48 Mg ha⁻¹ año⁻¹, dependiendo de los componentes y sus arreglos espaciales y temporales. Esto indica que la gestión adecuada de la biodiversidad y la estructura del sistema es esencial para optimizar la captura de carbono en estos ecosistemas (Castro et al., 2012).

La implementación de sistemas silvopastoriles no solo se asocia con la captura de carbono, sino que también mejora la productividad de forrajes y proporciona beneficios adicionales para la biodiversidad y la sostenibilidad de los recursos agrícolas (Hernández et al., 2021). La evidencia sugiere que los sistemas silvopastoriles son una herramienta multifuncional que puede ayudar a lograr un equilibrio entre la producción alimentaria y la conservación del medio ambiente, llegando a la ganadería tradicional a una ganadería sustentable (Mosquera et al., 2024). En estos sistemas, que combinan árboles y ganado, se ha demostrado que la biomasa aérea puede estimarse a través de ecuaciones alométricas, las cuales permiten calcular el carbono almacenado basándose en la biomasa total, asumiendo que aproximadamente el 50% de esta biomasa está compuesta de carbono (Marcelo-Bazán et al., 2022).

Por lo que el objetivo del presente trabajo fue evaluar la cantidad de biomasa aérea y estimar el carbono almacenado en un sistema silvopastoril ubicado en Hueytamalco, Puebla, con el propósito de conocer su aporte como sumidero de carbono y su potencial ambiental.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en los bosques tropicales del Sitio Experimental Las Margaritas, localizado al noroeste del estado de Puebla entre los municipios Hueytamalco y San José Acateno, predomina un clima semicálido húmedo con lluvias todo el año, con una precipitación de 1 500 – 3 600 mm y un rango de temperatura de 16 – 26°C (INEGI, 2010).

El trabajo se realizó en una superficie de 73 hectáreas, correspondiente a un sistema silvopastoril (SSP) ubicado en una zona con presencia de componentes arbóreos y cobertura de pastizales (Figura 1). Las especies arbóreas presentes dentro de los SSP fueron identificadas y cuantificadas a través de un inventario (Contreras-Santos et al., 2023), para la recolección de datos, se implementó un muestreo sistemático con el fin de garantizar una cobertura representativa del área. Este muestreo dio lugar a la selección de 16 sitios de muestreo distribuidos homogéneamente.





Figura 1. Mapa de las Unidad de producción bovina con Sistemas silvopastoriles del Sitio Experimental Las Margaritas.

Figure 1. Map of the Bovine Production Unit with Silvopastoral Systems of the Las Margaritas Experimental Site.

La estimación de la biomasa aérea de los árboles presentes en el sistema se realizó utilizando una ecuación alométrica ampliamente reconocida y validada a nivel internacional, desarrollada por Chave et al. (2015). Esta ecuación toma en cuenta variables como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura del árbol y la densidad de la madera, lo que permite una cuantificación precisa de la biomasa forestal.

Por su parte, la estimación del contenido de carbono almacenado en los pastizales se efectuó siguiendo la metodología propuesta por Mchenry et al. (2015), la estimación de carbono del pasto en SPP se realizó a través de la técnica de aforos, la que consistió en realizar muestreos destructivos en tres marcos de 4 m² por parcela (Yepes et al., 2011), en cada uno de los marcos, se cortó toda la biomasa a nivel del suelo, pesándola en fresco y tomando muestra para materia seca. La estimación de carbono en biomasa y necromasa se obtuvo multiplicando la biomasa o necromasa por 0.47 (IPCC, 2006). En cuanto al componente de hojarasca, la cuantificación se llevó a cabo con base en el enfoque metodológico sugerido por Orihuela-Belmonte et al. (2013).

Se realizaron análisis de varianza para estimar las diferencias en la biomasa y su almacenamiento de carbono entre los tres estratos (Hojarazca, herbáceas y aroreas). Los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas fueron evaluados usando Shapiro-Wilks y gráficos de residuos versus predichos, respectivamente. Las diferentes variables fueron analizadas usando el modelo lineal general y las comparaciones fueron realizadas con la prueba de LSD de Fisher ($P < 0.05$). Se calcularon las incertidumbres de la estimación de carbono total para cada sistema a partir de intervalos de confianza (95 %). Los análisis estadísticos se realizaron en el software estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición del sistema silvopastoril

En el sistema silvopastoril (SSP) evaluado se identificaron tres especies arbóreas. Destaca *Bursera simaruba*, con una dominancia del 84.61 %, lo que indica su adaptabilidad a las condiciones del clima subhúmedo y su papel estructural en el sistema (Cuadro1), esto coincide con lo reportado por Sotomayor-Ramírez et al. (2019), quienes destacan la rusticidad y capacidad de regeneración de esta especie en SSP de Mesoamérica. Juárez-García et al. (2019), refieren que la mayoría de los árboles presentes en los potreros son el resultado de la transformación del bosque a potreros efectuada por el hombre y la regeneración natural a partir de árboles madre ya que por lo regular no se dan prácticas de reforestación.

Cuadro 1. Cobertura del terreno en el sistema silvopastoril del sitio experimental Las Margaritas, Hueytamalco, Puebla.

Table 1. Land cover in the silvopastoral system of the Las Margaritas experimental site, Hueytamalco, Puebla.

Tipo de cobertura	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Árboles	3.6	5.0
Pastizales	69.4	95.0
Total	73.0	100.0

La cobertura del área total fue predominantemente herbácea, con *Cynodon nlemfuensis* como especie forrajera principal, cubriendo el 95 % (69.4 ha), mientras que los árboles ocupaban solo el 5 % (3.6 ha) (Cuadro 1).

Milera. (2013) sugiere que en los sistemas silvopastoriles se deben incluir especies adaptadas que garanticen altos rendimientos de biomasa y que sean eficientes en la captación de CO₂.

Biomasa de los estratos en el sistema silvopastoril

En el sistema silvopastoril evaluado en el sitio experimental Las Margaritas, ubicado en Hueytamalco, Puebla, se estimó la biomasa seca (Mg MS ha⁻¹) de tres componentes principales: el estrato arbóreo, la hojarasca y los pastizales. La biomasa arbórea presentó el valor más alto con 984.68 Mg MS ha⁻¹, seguida de los pastizales con 366.32 Mg MS ha⁻¹ y finalmente la hojarasca con 113.48 Mg MS ha⁻¹ (Cuadro 2). Esta distribución refleja la importancia de los árboles como el principal reservorio de materia seca en los sistemas silvopastoriles tropicales, tanto por su volumen estructural como por su capacidad de acumular biomasa a largo plazo.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Murgueitio et al. (2015) y Montagnini & Nair (2021), quienes destacan que los árboles en sistemas silvopastoriles no solo aportan sombra y mejoran el microclima, sino que también representan una fracción significativa de la biomasa total, contribuyendo a la captura de carbono y a la sostenibilidad del sistema. La hojarasca, aunque representa un menor porcentaje de la biomasa total, desempeña un papel crucial en la dinámica de nutrientes y la fertilidad del suelo, ya que al descomponerse libera compuestos orgánicos que mejoran la estructura y actividad biológica del suelo (Vallejo et al., 2018).

Por otro lado, los pastizales, con una biomasa considerable, son fundamentales para la producción de forraje, garantizando la alimentación animal y el flujo energético dentro del sistema. La biomasa de este estrato puede variar en función del manejo del potrero, la disponibilidad de luz y el tipo de especies forrajeras utilizadas (Peters et al., 2017).

Cuadro 2. Biomasa en los componentes del sistema silvopastoril del sitio experimental Las Margaritas, Hueytamalco, Puebla.

Table 2. Biomass in the components of the silvopastoral system of the Las Margaritas experimental site, Hueytamalco, Puebla.

Componente	Biomasa estimada (Mg MS ha ⁻¹)
Biomasa arbórea	984.68
Hojarasca	113.48
Pastizales	366.32

Distribución de carbono en los compartimentos del sistema

La biomasa aérea viva de los árboles presentó un almacenamiento promedio de 492.34 Mg C ha⁻¹, cifra considerable dada su limitada extensión (Cuadro 3). Esto reafirma el rol clave que juegan los árboles como sumideros de carbono, tal como lo ha reportado Montagnini y Nair (2004) en sistemas tropicales. Contreras-Santos et al. (2023) señalan que el sistema silvopastoril conformado de especies tropicales como *Megathyrsus maximus* cv *Sabanera Agrosavia* y especies arbóreas Búcaro (*Erythrina fusca*), Ceiba (*Pachira quinata*), Orejero (*Enterolobium cyclocarpum*), Guásimo (*Guazuma ulmifolia*), Guama (*Inga edulis*),

Cuadro 3. Almacenamiento de carbono por componente del sistema silvopastoril del sitio experimental Las Margaritas, Hueytamalco, Puebla.

Table 3. Carbon storage by component of the silvopastoral system of the Las Margaritas experimental site, Hueytamalco, Puebla.

Componente	Mg C ha ⁻¹
Biomasa arbórea	492.34
Hojarasca	56.74
Pastizales	183.16
Promedio total	51.83



Roble (*Tabebuia rosea*) y Campano (*Albizia samán*) acumuló $2.18 \pm 1.13 \text{ t ha}^{-1} \text{ C}$. La hojarasca, que aporta nutrientes y mejora la estructura del suelo, almacenó $56.74 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Navarro-Martínez et al. (2024) señala que la hojarasca es un sumidero de carbono a corto plazo en los ecosistemas forestales. Mientras tanto, el área de pastizales contribuyó con $183.16 \text{ Mg C ha}^{-1}$, y debido a su gran extensión, se identificó como el compartimento con mayor acumulación total de carbono en el área evaluada (Figura 2).

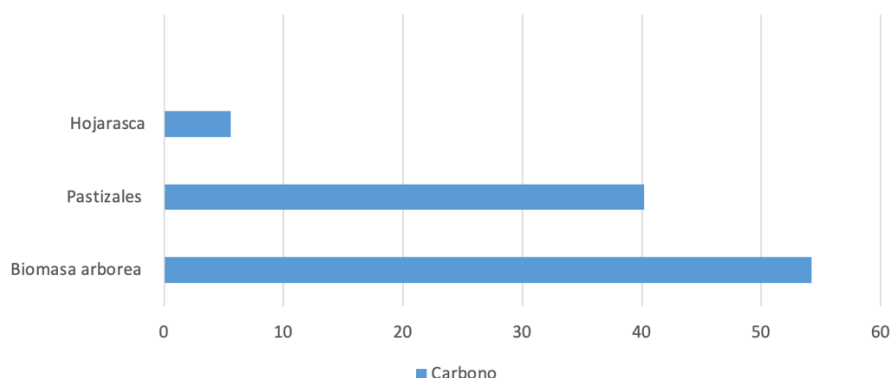


Figura 2. Distribución porcentual del carbono almacenado por componente del sistema silvopastoril del sitio experimental Las Margaritas, Hueytamalco, Puebla.

Figure 2. Percentage distribution of carbon stored by component of the silvopastoral system of the Las Margaritas experimental site, Hueytamalco, Puebla.

Este patrón de acumulación se alinea con lo observado por Ibrahim et al. (2007), quienes destacan que la incorporación de árboles en SSP, aún con baja densidad, puede incrementar significativamente el almacenamiento de carbono del sistema. Los valores de carbono en la biomasa viva no fueron uniformes, ya que dependen de las características morfológicas, tasa de crecimiento y concentración de carbono en los tejidos. Según Brown (1997), las especies leñosas difieren en su densidad de madera y contenido de carbono, lo que genera variabilidad aún dentro del mismo sistema. Debido a la diversidad de especies se evidenció que los sistemas silvopastoriles, fueron capaces de acumular carbono atmosférico en biomasa aérea diecisiete veces más que un sistema de producción tradicional (Contreras-Santos et al., 2023).

Adicionalmente, factores como el tipo de suelo, pendiente, acceso al agua y manejo del potrero influyen en la eficiencia de captura de carbono, como señalan Nair et al. (2010). En este estudio, se sugiere que el clima subhúmedo favorece una mayor biomasa herbácea en comparación con climas más secos o más húmedos, lo cual explica la contribución significativa de los pastizales al carbono total.

CONCLUSIÓN

El sistema silvopastoril evaluado en Hueytamalco, Puebla, demostró ser una alternativa agroecológica eficaz para la captura de carbono, al integrar componentes arbóreos, herbáceos y materia orgánica del suelo. La alta capacidad de almacenamiento de carbono en la biomasa arbórea, incluso con baja cobertura, evidencia la importancia de conservar y fomentar la presencia de árboles en sistemas ganaderos. Asimismo, los pastizales aportan de manera significativa debido a su cobertura extensiva.

Agradecimientos

A Volkswagen México por todo su apoyo y compromiso por equilibrio ecológico. los alumnos que participaron en esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Arenas, E. R. (2022). Carbón 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.
- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer*. FAO Forestry Paper 134.
- Castro, E., Lozano, Á., Barrera, J., & Páez, A. (2012). Productividad en materia seca y captura de carbono en un sistema silvopastoril y un sistema tradicional en cinco fincas ganaderas de piedemonte en el departamento de casanare. *Revista de Medicina Veterinaria*, (24), 51. <https://doi.org/10.19052/mv.1339>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., ... & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190.
- Contreras-Santos, J. L., C. K. Falla-Guzmán., J. L. Rodríguez, J. Fernando-Garrido, J. Martínez-Atencia, L. Aguayo-Ulloa. (2023). Reserva de carbono en

sistemas silvopastoriles: Un estudio en el Medio Sinú, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, vol. 34, núm. 1, 49138.

Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2019). *InfoStat versión 2019* [Software estadístico]. Grupo InfoStat, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Hernández, M., López-Ortíz, S., Rodríguez, J., Ortega-Jiménez, E., Pérez-Elizalde, S., & Díaz-Rivera, P. (2021). Rendimiento de forraje e interacciones aéreas en función de la densidad de árboles de *leucaena leucocephala* asociada a la gramínea *digitaria eriantha*. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 25(3). <https://doi.org/10.53897/revaia.21.25.31>

Ibrahim, M., Camargo, J., & Fajardo, D. (2007). Servicios ambientales de sistemas silvopastoriles: captura y almacenamiento de carbono. *Revista Pastos y Forrajes*, 30(3), 227–242.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2010. Compendio de información geográfica municipal Hueytamalco, Puebla. Consultado en https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21076.pdf.

IPCC. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. H.S. Eggleston, K. Miwa, N. Srivastava, & K. Tanabe (Eds.). Tokyo, Japan: National Greenhouse Gas Inventories Programme.

Juárez-García, A., Martínez-Zurimendi, P., Ferguson, B. G., Domínguez-Domínguez, M., & Villanueva-López, G. (2019). Effect of focal trees on the regeneration of tree species in pastures of southwest Mexico. *Agrociencia*, 53(7), 1119–1137.

Marcelo-Bazán, F., Chávez, W., Villanueva, J., Aldave, J., & Gallardo, U. (2022). Uso potencial de *eucalyptus viminalis* labill. para la captura de carbono en un sistema silvopastoril, Perú. *Colombia Forestal*, 26(1), 64-78. <https://doi.org/10.14483/2256201x.19043>

McHenry, M. P., Alston, L., El Hanandeh, A., & Badr, O. (2015). Sustainable biochar to mitigate global climate change, *EMBO reports*, 56.

Milera, M. 2013. Estación Experimental de Pastos y Forrajes “Indio Hatuey”, Cuba. Contribución de los sistemas silvopastoriles en la producción y el medio ambiente. *Avances en Investigación Agropecuaria*, vol. 17, núm. 3, pp. 7-24

Montagnini, F., & Nair, P. K. R. (2004). Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61(1), 281–295.

Montagnini, F., & Nair, P. K. R. (2021). *Agroforestry as a sustainable land use option: Research perspectives*. *Journal of Sustainable Forestry*, 40(3), 271–291.

Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H., & Eibl, B. (2015). Sistemas agroforestales: funciones productivas, socioeconómicas y ambientales (Serie técnica, Informe técnico No. 402). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. <https://bit.ly/38My0xk>



- Mosquera, E., Cabrera, G., & Forero, C. (2024). Potencial económico, social y ambiental de tecnologías de bioenergía con captura de co2 en biorrefinerías. *Ingeniería Y Competitividad*, 26(2). <https://doi.org/10.25100/iyc.v26i2.13360>
- Murgueitio, E., Calle, Z., Solorio, B., et al. (2015). *Intensive silvopastoral systems: Ecology, animal welfare and productivity*. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 44(9), 592–602.
- Nair, V. D., Nair, P. K. R., Kumar, B. M., & Haile, S. G. (2010). Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environmental Science & Policy*, 13(8), 509–519.
- Navarro-Martínez, J., Godínez-Jaimes, F., Rosas-Acevedo, J. L., & Méndez-González, J. (2024). Reservorio de carbono en necromasa y sotobosque en un ecosistema forestal templado de Guerrero, México: Reservorio de carbono en necromasa y sotobosque. *Madera y Bosques*, 30(3), e3032683.
- Oliva, M., Culqui Mirano, L., Leiva, S., Collazos, R., Salas, R., Vásquez, H., & Maicelo Quintana, J. L. (2017). Reserve of carbon in a silvopastoral system composed of *Pinus patula* and native herbaceous. *Scientia Agropecuaria*, 8(2), 149–157. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.02.07>
- Orihuela-Belmonte, M., Apellido2, A., & Apellido3, B. (2013). Producción y tasa de descomposición de hojarasca en selva y vegetación secundaria de diferentes edades en la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 4(20), 20-30.
- Peters, M., Rao, I. M., et al. (2017). *Forage-based systems for sustainable intensification of livestock production in Latin America*. *Animal Frontiers*, 7(2), 32–38.
- Sotelo, M., Suárez Salazar, J. C., Álvarez, F., Castro Núñez, A., Calderón Soto, V. H., Arango, J. (2017). Sistemas sostenibles de producción ganadera en el contexto amazónico — Sistemas silvopastoriles: ¿una opción viable? (Publicación CIAT No. 448). Centro Internacional de Agricultura Tropical. <https://hdl.handle.net/10568/89088>
- Sotomayor-Ramírez, D., Pérez, J., & Díaz, G. (2019). Evaluación de sistemas silvopastoriles con especies nativas en Veracruz, México. *Agrociencia*, 53(6), 765–777.
- Vallejo, V., Cobo-Díaz, J. F., et al. (2018). *Litter decomposition and nutrient release in agroforestry systems of the Colombian Amazon*. *Agroforestry Systems*, 92(3), 635–646.
- Yepes, A.P., Navarrete, D.A., Duque, A.J., Phillips, J.F., Cabrera, K.R., Álvarez, E., ... 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-.