



Biomasa aérea y carbono en el suelo en rodales de pino-encino bajo tratamientos silvícolas

Aboveground biomass and soil carbon in pine-oak stands under silvicultural treatments

Ashmir Ambrosio-Lazo¹, Gerardo Rodríguez-Ortiz^{2*}, Wenceslao Santiago-García³, Judith Ruiz Luna², Vicente Arturo Velasco-Velasco² y José Raymundo Enríquez-del Valle²

¹ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Programa de Maestría en Ciencias en Productividad en Agroecosistemas. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. ashmir26@gmail.com

² Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México. judith.rl@voaxaca.tecnm.mx
vicente.vv@voaxaca.tecnm.mx
jose.ev@voaxaca.tecnm.mx

³ Universidad de la Sierra Juárez. División de Estudios de Postgrado. Instituto de Estudios Ambientales. Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. forest_wsg@hotmail.com

* Autor de correspondencia.
gerardo.ro@voaxaca.tecnm.mx

RESUMEN

El aprovechamiento maderable modifica los patrones de partición y acumulación de biomasa estructural y de compartimentos del bosque; determinar dicha acumulación es importante para conocer el efecto de los tratamientos silvícolas (TS) aplicados. El objetivo de este trabajo fue analizar biomasa aérea y carbono (C) del suelo en rodales bajo TS aplicados en el periodo 2013-2014, en San Juan Lachao, Oaxaca. En 2022 se establecieron de manera selectiva 12 sitios (UM) en cuatro tratamientos, tres TS: 1er aclareo (1A), aclareo libre (AL), corta de regeneración (CR), y un área sin manejo (ASM). Se realizó inventario arbóreo y del piso forestal y sotobosque, para estimar la biomasa estructural y de compartimentos. Los tratamientos se diferenciaron mediante modelo lineal generalizado y comparación de medias (Duncan, 0.05); las UM se clasificaron mediante análisis clúster. Los tratamientos generan montos diferenciados ($p < 0.01$) en la biomasa de arbustos, hojarasca, humus y densidad aparente del suelo; pero no en la biomasa aérea total ($p > 0.05$). El área con CR mostró la mayor cantidad de biomasa en el compartimento herbáceo y arbustivo con 0.24 t ha^{-1} y 3.80 t ha^{-1} , respectivamente. ASM, AL y 1A mostraron diferencia significativa de biomasa en humus ($p < 0.01$) en comparación con CR (3.93 t ha^{-1}), con incrementos respectivos de 160%, 265% y 275%. El ASM presentó la mayor acumulación de biomasa aérea total (180.49 t ha^{-1}), mientras que los TS, en promedio, registraron 166.97 t ha^{-1} . El contenido de materia orgánica (11.6%) y C (6.7%) en el suelo del ASM fue significativamente diferente ($p \leq 0.01$) al de los TS. Los TS modifican la biomasa de los compartimentos del piso forestal, lo cual puede revertirse con la aplicación de tratamientos complementarios.

PALABRAS CLAVE: aclareo, biomasa estructural, compartimentos, densidad del suelo, materia orgánica, San Juan Lachao.

ABSTRACT

Timber harvesting modifies the patterns of partition and accumulation of structural biomass and forest compartments; determining this accumulation is important to know the effect of the silvicultural treatments (TS) applied. The objective was to analyze the aboveground biomass and soil carbon (C) in stands under TS applied in the period 2013-2014, in San Juan Lachao, Oaxaca. In 2022, 12 sites (UM) were selectively established in four treatments, three TS: 1st thinning (1A), free thinning (AL), regeneration cutting (CR), and an unmanaged area (ASM). Tree and forest floor inventory was carried out and undergrowth, to estimate structural and compartment biomass. The treatments were differentiated using a generalized linear model and comparison of means (Duncan, 0.05); The MUs were classified by cluster analysis. The treatments generate different amounts ($p < 0.01$) in the biomass of shrubs, leaf litter, humus and apparent density of the soil; but not in the total aboveground biomass ($p > 0.05$). The area with CR showed the highest amount of biomass in the herbaceous and shrubby compartment with 0.24 t ha^{-1} and 3.80 t ha^{-1} , respectively. The ASM, AL and 1A showed a significant difference in biomass in humus ($p < 0.01$) compared to CR (3.93 t ha^{-1}), with respective increases of 160%, 265% and 275%. The ASM presented the highest accumulation of total aboveground biomass (180.49 t ha^{-1}), while the TS on average recorded 166.97 t ha^{-1} . The content of organic matter (11.6%) and C (6.7%) in the ASM soil was significantly different ($p \leq 0.01$) from that of the TS. TS modify the biomass of the forest floor compartments, which can be reversed with the application of complementary treatments.

KEYWORDS: thinning, structural biomass, compartments, soil density, organic matter, San Juan Lachao.

INTRODUCCIÓN

En México y a escala global, el secuestro de carbono (C) proporcionado por los bosques es relevante debido a las altas emisiones de CO₂, que causan un desequilibrio climático y efectos negativos hacia la sociedad (Acosta-Mireles et al., 2011; Yu et al., 2022); por otro lado, los aprovechamientos forestales no sustentables y cambios de uso del suelo contribuyen a las emisiones de CO₂ y reducen el potencial para la captura de carbono (Galicia et al., 2015). El aprovechamiento maderable modifica los patrones de partición y acumulación de biomasa en los diferentes compartimentos del bosque; cada método y tratamiento silvícola aplicado afecta de forma distinta (Barth et al., 2016; Rodríguez-Ortiz et al., 2019); por ello, la finalidad de estos estudios es incrementar los reservorios de carbono, sin dejar de aprovechar los bosques, ya que son una fuente de ingresos para las comunidades (Cortez-Pérez et al., 2021).

A escala global, en el año 2022 las emisiones antropogénicas totales de carbono fueron de 11.1 Gt año⁻¹, de las cuales los bosques absorbieron en promedio 3.3 Gt año⁻¹ ± 0.8 Gt año⁻¹ (Friedlingstein et al., 2023). En México, los bosques de vegetación pino-encino son importantes para la producción forestal, de ellos se obtiene 80.71% de la producción maderable (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2020). Cuantificar la biomasa de los bosques que se hayan sometido a aprovechamiento maderable es importante para evaluar la productividad y el efecto de los tratamientos silvícolas sobre los contenidos de C almacenado (Chávez-Pascual et al., 2017; Ketterings et al., 2001; Soriano-Luna et al., 2015). Conocer los montos de C y los flujos de energía es importante para entender el funcionamiento y la dinámica de los ecosistemas forestales, y tomar decisiones adecuadas en el manejo forestal (Cutini et al., 2013; Joshi y Dhyani, 2018; Rodríguez-Ortiz et al., 2019).

El C se puede determinar a través de la cantidad de biomasa arbórea estimada (aérea y subterránea), vegetación secundaria, suelo, y material en descomposición (Chávez-Pascual et al., 2017; Miguel-Martínez et al., 2016; Ruiz-Díaz et al., 2014). En los bosques de pino-encino, approxima-

damente 50% de la biomasa arbórea es C orgánico (Ruiz-Díaz et al., 2014; Bravo et al., 2007). Diversos estudios mencionan que aproximadamente 44% del C orgánico del bosque está en el suelo, 42% en la biomasa arbórea y vegetación secundaria, 8% en la madera muerta y 5% en el mantillo (Galicia et al., 2016; Pan et al., 2011). Determinar el C orgánico presente en la biomasa de la vegetación secundaria y la depositada en el suelo es importante para conocer mejor la dinámica de un ecosistema (Ekoungoulou et al., 2014).

La biomasa acumulada en un ecosistema forestal es un parámetro indicador de la productividad a lo largo del tiempo (Eamus et al., 2000; Fonseca et al., 2009); está compuesta por el peso seco de la materia orgánica (M.O.) aérea y subterránea que existe en ese ecosistema (Návar, 2009). La biomasa que un árbol acumula y está distribuida entre sus estructuras depende de varios factores como: altitud, tratamientos silvícolas, método de manejo, densidad arbórea, tiempo, etc., (Figueroa-Navarro et al., 2010; García-Aguilar et al., 2015; Gracia et al., 2005; Rodríguez-Ortiz et al., 2019).

En un país como México, donde 60% de los bosques pertenece a las comunidades locales, quienes encuentran sus medios de vida mediante la práctica del manejo forestal comunitario, es importante evaluar la capacidad de estos ecosistemas para almacenar biomasa y C y, con ello, poder fundamentar la toma de decisiones (Leyva-pablo et al., 2021; Madrid et al., 2009; Torres-Rojo et al., 2016).

La comunidad de San Juan Lachao, Oaxaca, cuenta con 6317 ha de bosque de pino-encino, de las cuales, 573 ha están bajo manejo forestal a través del método de desarrollo silvícola (MDS) y 1787 ha bajo el método mexicano de ordenación de bosques irregulares (MMOBI). Las especies arbóreas de importancia maderable son *Pinus douglasiana* Mtz., *P. maximinoi* H.E. Moore, *P. devoniana* Lindl., *Quercus rugosa* Née, *Q. crassifolia* Humb. & Bonpl. y otras latifoliadas como: *Arbutus xalapensis* Kunth, *Alnus acuminata* Kunth (Servicios Técnicos Forestales [STF], 2011).



OBJETIVOS

El objetivo de esta investigación fue analizar la biomasa áerea y carbono orgánico del suelo de rodales bajo tratamientos silvícolas en San Juan Lachao, Oaxaca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó en el bosque comunal bajo manejo de 3201 ha de San Juan Lachao, Juquila, Oaxaca, México, con coordenadas: 16° 12' 51.1" LN y 97° 06' 36.8" LO, con variaciones de altitud entre 900 m y 2600 m y promedio de 1900 m (Fig. 1). Los tipos de vegetación son: bosque de pino-encino, bosque de encino-pino y mesófilo de montaña. El clima predominante es cálido subhúmedo (Cw); la temperatura promedio anual es 22 °C, la precipitación promedio 2500 mm y el tipo de suelo predominante es regosol (STF, 2011).

Establecimiento de los sitios de muestreo

En el año 2022 se establecieron 12 sitios circulares de 400 m² con compensación por pendiente (divididos en cuatro cuadrantes), de manera dirigida, en rodales aprovechados durante el periodo 2013-2014, esto bajo la metodología usada por Chávez-Pascual et al. (2017) y Miguel-Martínez et al. (2016). Se utilizó un diseño de muestreo selectivo para evaluar cuatro tratamientos: aclareo libre (AL), el cual se basó en una corta de 20% sobre la masa forestal de manera deliberada, es decir, se removieron árboles de cualquier clase; 1er aclareo (1A) con cortas de 25% sobre árboles suprimidos; corta de regeneración bajo el método de árboles padres (CR) con cortas de 75%, dejando aproximadamente 30 árboles residuales por hectárea; y área sin manejo (ASM), con el mismo tipo de vegetación y valores similares de altitud y pendiente que los rodales con tratamientos silvícolas; en todos los tratamientos se establecieron tres sitios (UM), los cuales contaban con las mismas características de altitud (1750 m a 1830 m), exposición, densidad arbórea ($\geq 500 \text{ ha}^{-1}$) y pendiente (25% – 50 %). Los sitios (UM) se geoposicionaron con ayuda de

GPS (*global positioning system*) (Garmin eTrex 30, USA®) MAPS 6.

Inventario y muestreo arbóreo

En los sitios se realizó el inventario de todos los árboles ($> 7.5 \text{ cm}$), en donde se registró: diámetro normal (DN, cm) con una cinta diamétrica (Hartmann ®, 283D), altura total (AT, m) mediante un clinómetro (Haglöf ®, EC II D-HS115), y diámetro de copa (DC, m) con una cinta métrica (Truper ® TP50ME). Se eligió una muestra de árboles de 5% en forma proporcional a la frecuencia relativa de cada especie, a los que se extrajo una submuestra (viruta), a una altura de 1.30 m respecto al suelo, con un taladro de Pressler (Haglöf®, Sweden). Estas muestras fueron obtenidas para determinar la densidad básica (DB, kg m⁻³). En cambio, para las latifoliadas como *Quercus* spp., *Arbutus xalapensis* Kunth, *Alnus acuminata* Kunth, entre otras, se derribó al menos un individuo de cada especie por sitio para obtener tres rodajas de 5 cm de grosor de la parte media del árbol, y poder conocer su DB. Se tomaron variables descriptivas del sitio: altitud, exposición y pendiente promedio con un clinómetro.

Muestreo de compartimentos

Mediante la metodología propuesta por Rodríguez-Ortiz et al. (2019), se colectó la necromasa (madera, conos y ramas en estado seco) y el material arbustivo en dos áreas de 9 m² por sitio, y se pesaron con una báscula romana de 25 kg de alcance (Pretul ®, 21255); la necromasa en rollo se cubicó con la fórmula de Newton (Romahn-de la Vega y Ramírez, 2010):

$$V = \frac{L}{6} (S_0 + 4S_m + S_1)$$

donde:

V = volumen de la troza (m³)

L = longitud del cilindro idealizado (m)

S₀ = área de la sección transversal mayor (m²)

S_m = área de la sección transversal media (m²)

S_l = área de la sección transversal menor (m²)

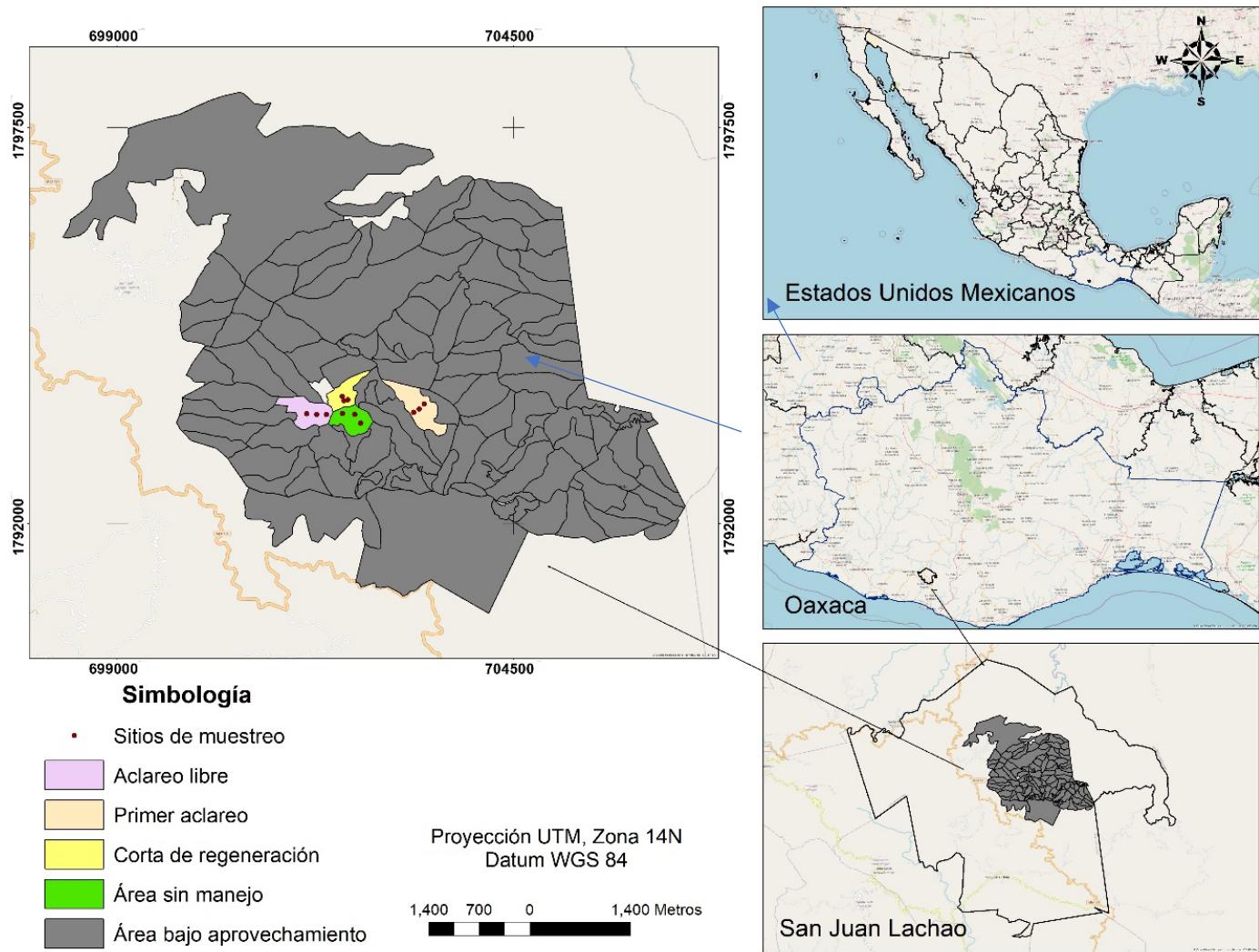


FIGURA 1. Ubicación geográfica del área de estudio y de los tratamientos silvícolas evaluados en San Juan Lachao, Oaxaca.

La hojarasca, el humus, y el material herbáceo se colectaron en un área de 1 m² dentro de cada cuadrante de los sitios, se pesaron con una báscula de precisión (Dhaus, CS 5000, 5000 g ± 2 g); también se introdujo a presión y verticalmente en el suelo un tubo PVC de 30 cm de longitud y 4 cm de diámetro, para extraer una muestra (10 cm - 30 cm) que se cubicó (cm³) con la fórmula de Smallian (Romahn-de la Vega y Ramírez, 2010):

$$V = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{D}{100}\right)^2 \times L$$

donde:

V= volumen del suelo (cm³)

D= diámetro del tubo de PVC (cm²)

L= longitud del tubo de PVC (cm²)



A todo el material obtenido se le obtuvo una submuestra de entre 100 g y 500 g para obtener su peso seco (PS, g).

Análisis de muestras

Las virutas y rodajas se transportaron en bolsas térmicas al Laboratorio de Agro-ecosistemas del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Posteriormente se les determinó el volumen verde (VV, cm³), con ayuda de un vernier digital y aplicando la fórmula de Newton (Romahn-de la Vega y Ramírez, 2010).

$$VV = \frac{L}{6} (S_0 + 4S_m + S_1)$$

donde:

VV = volumen verde de la rodaja o viruta (cm³)

L = longitud de la rodaja o viruta (cm)

S₀ = área de la sección transversal mayor (cm²)

S_m = área de la sección transversal media (cm²)

S₁ = área de la sección transversal menor (cm²)

Posteriormente, virutas y rodajas se introdujeron a una estufa de secado (Memmert®, 100-800) a 102 °C hasta obtener su peso constante, es decir, su peso seco (PS, g), el cual se determinó con una balanza analítica (Shimadzu® aty 224 mg ± 1 mg) (Rodríguez-Ortiz et al., 2011; Zúñiga et al., 2023). Se obtuvo la densidad básica (DB, kg m⁻³) por especie.

$$DB = (PS/VV) \times 1000$$

donde:

DB = densidad básica de la madera del fuste (kg m⁻³)

PS = peso seco (g)

VV = volumen verde (cm³)

Las muestras de los demás compartimentos se introdujeron a la estufa de secado a diferentes temperaturas, hasta obtener su peso constante y posteriormente su peso seco (PS, g): hojarasca, humus, necromasa, herbáceas y arbustivas a 75 °C y suelo a 50 °C (Rodríguez-Ortiz et al., 2019; Zúñiga et al., 2023). Se obtuvo un factor de

conversión de biomasa (FC) para las muestras de necromasa, arbustivo, herbáceas, hojarasca y humus, el cual es eficaz para obtener la biomasa (Bravo et al., 2008):

$$FC = PS/PF$$

donde:

PS = peso seco (g)

PF = peso fresco (g)

Para el suelo se determinó la DA (kg m⁻³):

$$DA = (PS/VF) \times 1000$$

donde:

DA = densidad aparente del suelo (kg m⁻³)

PS = peso seco (g)

VF = volumen fresco (cm³)

y el carbono a través del contenido de materia orgánica, bajo el método Walkley and Black, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2000).

Manejo y análisis de datos

Se determinó el volumen total árbol con corteza (VTAcc, m³) de las especies arbóreas encontradas, con el sistema biométrico forestal (Vargas-Larreta et al., 2017); la biomasa de cada individuo por especie (kg) se estimó multiplicando el VTAcc (m³) por su DB (kg m⁻³) obtenida (Rodríguez-Ortiz et al., 2011). Se obtuvo la biomasa (kg) de los compartimentos: necromasa, arbustivo, herbáceo, humus y hojarasca de cada área muestreada mediante el producto del PF (kg) y el FC. Los datos de biomasa se convirtieron a toneladas por hectárea (t ha⁻¹).

En los datos se comprobaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas respectivas de Shapiro-Wilk y Bartlett ($\alpha > 0.05$); algunas variables que no pasaron estas pruebas se transformaron a logaritmo natural solo y combinado. Los

tratamientos se diferenciaron mediante modelo lineal generalizado (PROC GLM) y prueba de medias (Duncan, 0.05); las UM se clasificaron con análisis clúster, esto para el piso forestal y sotobosque, descartando la biomasa arbórea la cual no se reflejaba en la clasificación. Todos los análisis se desarrollaron en el programa SAS 9.4 (Statistical Analysis System) (SAS Institute, 2017).

RESULTADOS

Biomasa aérea

En respuesta a los tratamientos, se encontraron diferencias altamente significativas en la acumulación de biomasa

estructural de arbustos y en los compartimentos hojarasca y humus ($p < 0.01$) (Tabla 1); estas variables presentaron una heterogeneidad moderada - alta (CV entre 31.5% y 64.2%) debido a que la densidad arbórea y la cobertura es diferente entre los tratamientos (Tabla 2). El compartimento herbáceo y necromasa no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) debido a la gran heterogeneidad (CV > 94.0%) de los residuos de la extracción realizada que genera problemas de inflación de varianzas. La biomasa estructural arbórea en las especies de *Pinus* y de *Quercus* no mostraron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$) (Tabla 1).

TABLA 1. Resumen de análisis de varianza del efecto del aprovechamiento maderable sobre la biomasa aérea y carbono del suelo.

Variable	GL error	Cuadrados medios		CV (%)	\sqrt{CME}
		Tratamientos	Error		
<i>Pinus</i> spp.	8	1181.5 ^{ns}	1582.7	42.4	39.8
<i>Quercus</i> spp y otras latifoliadas. ^{†††}	8	0.8 ^{ns}	0.4	17.3	0.6
Total arbórea	8	470.9 ^{ns}	1908.2	31.3	43.6
Hojarasca	44	119.1 ^{**}	11.7	31.5	3.4
Humus	44	306.9 ^{**}	20.0	41.3	4.5
Herbácea [†]	37	0.6 ^{ns}	0.3	94.1	0.6
Arbustivo ^{††}	12	2.1 ^{**}	0.3	64.2	0.6
Necromasa ^π	20	1.0 ^{ns}	0.5	152.6	0.7
Biomasa aérea total	8	349.5 ^{ns}	2370.8	28.6	48.7
Suelo (DA)	44	352576.9 ^{**}	42603.5	23.8	206.4
Carbono en suelo	44	2898.6 ^{**}	351.8	30.9	18.8

GL=grados de libertad, CV=coeficiente de variación, CME = cuadrado medio del error, DA=densidad aparente (kg m^{-3}), **altamente significativo ($p \leq 0.01$), ns = no significativo ($p > 0.05$). Datos transformados: [†]: $\ln\sqrt{x}$; ^{††}: $\ln(\cos x+1)$; ^{†††}: $\ln(x)$; ^π = $\ln \sqrt{x}/100$.



TABLA 2. Efecto de los tratamientos silvícolas sobre la acumulación de biomasa aérea y carbono en suelo en rodales bajo aprovechamiento.

Biomasa ($t\ ha^{-1}$)	Tratamientos			
	Aclareo libre	Primer aclareo	CR	ASM
<i>Pinus spp</i>	65.9± 13.9a	98.0± 7.4a	112.8± 29a	98.6± 32.0a
<i>Quercus spp y otras latifoliadas</i>	70.9± 19.0a	28.2± 10.6a	24.8± 5.8a	57.7± 22.5a
Total arbóreo	136.8± 25.4a	126.2± 16.5a	137.5± 28.6a	156.3± 28.4a
Hojarasca	11.3± 1.3b	15.1± 0.8a	8.1± 1.0b	8.9± 0.7b
Humus	14.5± 1.4a	14.8± 1.4a	3.9± 0.8b	10.2± 1.5a
Herbácea	0.1± 0.02b	0.1± 0.1ab	0.2± 0.1a	0.2± 0.1ab
Arbustiva	0.4± 0.1b	1.0± 0.3b	3.8± 0.6a	0.7± 0.4b
Necromasa ^a	4.1± 0.8ab	20.1± 16.5a	3.1± 2.4b	4.3± 2.1ab
Aérea total	167.1± 27.3a	177.2± 23.7a	156.6± 32.5a	180.5± 28.3a
C suelo ($t\ ha^{-1}$)	40.3± 8.7b	75.8± 4.4a	57.4± 4.1ab	69.0± 2.5a
DA suelo ($kg\ m^{-3}$)	735.4± 86.4bc	959.9± 23.7ab	1063.8± 68.5a	713.9± 38.6c
DN (cm)	15.5± 0.9b	16.4± 1.4b	14.1± 0.7b	25.8± 3.3a
AT (m)	14.7± 0.4a	13.4± 0.4a	11.1± 0.9b	14.8± 0.4a
DC (m)	5.9± 0.7b	7.2± 0.1ab	5.3± 0.7b	10.0± 1.4a
AC (m^2)	30.5± 7.0b	45.8± 1.8b	33.4± 10.9b	87.1± 19.3a
Densidad (árboles ha^{-1})	1166.7± 109.3a	1141.7± 344.4a	825.0± 14.4ab	491.7± 79.5b

CR = corta de regeneración (árboles padres), ASM = área sin manejo (conservación), B = biomasa, C = carbono, DN = diámetro normal AT = altura total, DC = diámetro de copa, AC = área de copa, DA=densidad aparente. Los datos con letras distintas en hileras presentan diferencias estadísticas significativas (Duncan, 0.05). Media ± error estándar. ^aSeparación de medias con datos transformados a $\ln \sqrt{x/100}$.

La biomasa estructural arbórea por género y total, así como la biomasa aérea total no mostraron diferencia estadística ($p > 0.05$) entre los TS aplicados y el área bajo conservación (ASM), debido a que estas últimas, a pesar de que contienen árboles de mayores dimensiones (diámetro, altura, etc.), poseen la menor densidad arbórea ($492\ ha^{-1}$); de esta manera, los rodales de San Juan Lachao tienen en promedio $170.4\ t\ ha^{-1}$ de biomasa total aérea (Tabla 2).

El área donde se aplicó corta de regeneración mostró los montos más bajos en los compartimentos de humus y hojarasca, $12.0\ t\ ha^{-1}$, que es 59.2% menor al testigo (ASM) y 149.2% menor al primer aclareo de mayor acumulación (Tabla 2). Estas diferencias podrían deberse: 1) la baja densidad arbórea resultante de la corta de regeneración por árboles padres, en donde la vegetación secundaria (arbustiva y herbácea) predominó; 2) que en los sitios en

que hubo CR predomina arbolado joven el cual muestra escasa senescencia y abscisión de hojas y ramas. Debido a que el comportamiento de necromasa no se diferenció estadísticamente entre tratamientos, la separación de medias se realizó con datos transformados, de tal manera que los sitios con primer aclareo generaron una acumulación mayor de 449.4% con respecto al resto de los tratamientos (Tabla 2).

Los 12 sitios se clasificaron tomando en consideración la biomasa acumulada en el piso forestal (humus, hojarasca y necromasa) y sotobosque (herbáceas y arbustivas); de esta manera, se observa a una distancia euclídea promedio de 50.2 la separación de dos grandes grupos. La unidad de muestreo S5_1A contiene biomasa en el piso forestal y

sotobosque diferenciada de las demás UM; el resto de los sitios se separó a una distancia media de 12.5 entre conglomerados, de tal forma que los sitios con aplicación de CR (óvalo verde) se asocian al contener cantidades similares de biomasa en el piso forestal y sotobosque. Por otro lado, las áreas de conservación (rectángulo naranja) asocian montos similares de biomasa, lo cual sucede a una distancia media de 4.6 (Fig. 2).

La densidad básica de la madera del género *Pinus* fue de 466 kg m⁻³ y del encino 584 kg m⁻³. El área con AL mostró una DB promedio de 542 kg m⁻³; el 1A, 544 kg m⁻³; áreas con CR, 563 kg m⁻³; y el ASM, 538 kg m⁻³; mostrando estas dos últimas la mayor densidad básica, lo cual se atribuye a la distribución de especies y diversidad de edad arbórea.

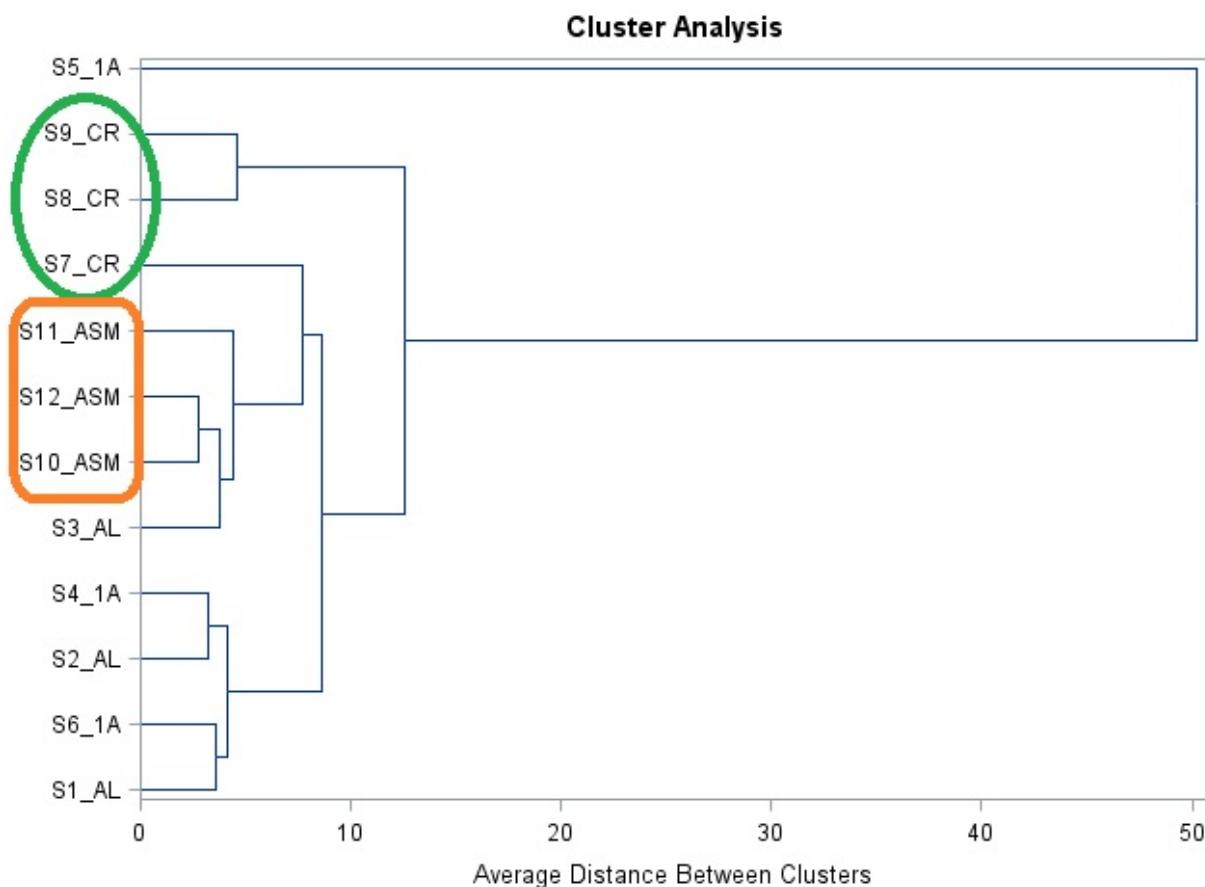


FIGURA 2. Formación de grupos de unidades de muestreo (S) (elipse y rectángulo) con tratamientos silvícolas diferentes, en respuesta de la acumulación de biomasa en el piso forestal y sotobosque.

S = sitio (UM), AL = aclareo libre, IA = primer aclareo, CR = corta de regeneración, ASM = área sin manejo.



Carbono en suelo

La densidad aparente (DA) y el contenido de C del suelo se diferenciaron ($p < 0.01$) entre tratamientos (Tabla 1). El suelo del área con CR mostró una mayor DA (1063.8 kg m^{-3}) ($p < 0.01$) en comparación con el área sin manejo (713.9 kg m^{-3}), siendo 49% más denso. Las áreas bajo primer aclareo, así como las de conservación (ASM) presentaron los mayores contenidos de C en el suelo (72.4 t ha^{-1}), diferenciándose estadísticamente con el TS de aclareo libre, lo que indica un efecto negativo en el suelo por la aplicación de AL (Tabla 2). En el mismo sentido, el contenido de materia orgánica en el suelo del ASM (11.6%) fue significativamente diferente ($p \leq 0.01$) de los demás tratamientos. El contenido de C almacenado en el suelo del ASM (6.7%) fue 91.4% mayor que el almacenado en rodales bajo AL (3.5%) (Fig. 3).

DISCUSIÓN

Biomasa estructural

El área bajo conservación (ASM) no mostró diferencias estadísticas de biomasa arbórea (156.3 t ha^{-1}), sobre las áreas bajo tratamientos silvícolas (AL, 1A y CR) (133.5 t ha^{-1}). Álvarez et al. (2012) mencionan que, en bosques mixtos de pino-encino bajo conservación, los montos superiores a 150 t ha^{-1} son excelentes reservorios de C, aunque esto depende del tipo de vegetación y de factores fisiográficos (García-Aguilar et al., 2015). Galicia et al. (2015) encontraron, en un bosque maduro de pino-encino sin aprovechamiento de la Sierra Norte de Oaxaca, altos valores de biomasa arbórea (225 t ha^{-1} a 347 t ha^{-1}). Siles et al., (2017) determinaron 221.2 t ha^{-1} de biomasa arbórea, en una reserva con vegetación pino-encino de Santa Rosa, Nicaragua. Estos valores superiores a los de este estudio, se pueden atribuir a que son áreas bajo conservación y a que San Juan Lachao recién inicia con su aprovechamiento maderable, por lo que aún no se refleja significativamente el aumento de la biomasa arbórea en respuesta a los tratamientos silvícolas.

Los valores de biomasa arbórea del ASM no difieren de los del área con CR, lo cual coincide con Chávez-Pascual et al. (2017), quienes calcularon, en áreas con CR (10 años), 55.94 t ha^{-1} y, en ASM, 60.67 t ha^{-1} . Cuando se aplican los tratamientos silvícolas de forma adecuada, la biomasa arbórea incrementa. En diversos estudios de distribución de biomasa en árboles se ha identificado una disminución de la proporción de biomasa con el aumento del tamaño del árbol (Cortes-Sánchez et al., 2019; Figueroa-Navarro et al., 2010; Soriano-Luna et al., 2015); por ello aplicar tratamientos silvícolas con una periodicidad adecuada incrementa la acumulación de biomasa.

El ASM presentó árboles con diámetro de 25.8 cm y biomasa de 317.8 kg por árbol; las áreas bajo aprovechamiento presentaron $\text{DN} = 15.3 \text{ cm}$ y biomasa arbórea de 133.5 kg por árbol. Estos datos concuerdan con los estimados por Acosta-Mireles et al. (2011), quienes mencionan, para un bosque de pino-encino bajo manejo de la sierra Huasteca de Hidalgo, $\text{DN} > 15 \text{ cm}$ con 209.75 kg de biomasa por árbol. También concuerdan con datos encontrados por Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011) en un estudio en el sur de Nuevo León, donde determinaron una biomasa de 219.87 kg por árbol para *P. pseudostrobus* Lindl. y 251.23 kg por árbol para *P. teocote* Schiede ex Schltdl. Vásquez-Fabián et al. (2017) hallaron mayores contenidos de biomasa en *P. pseudostrobus* Lindl. (492.45 kg por árbol), en árboles con $\text{DN} = 21 \text{ cm}$ y altura total de 16.7 m . De igual forma, Chávez-Pascual et al. (2018) observaron altas cantidades de biomasa (444.14 kg por árbol) para $\text{DN} = 27.7 \text{ cm}$. Delgado et al. (2005) comentan que existe una estrecha relación alométrica entre el diámetro normal y la biomasa, entre mayores sean los diámetros mayor acumulación de biomasa se presenta (Rodríguez-Larramendi et al., 2016).

La densidad básica de la madera del género *Pinus* fue de 466 kg m^{-3} y del encino 584 kg m^{-3} , y es un parámetro fundamental para estimar la biomasa y conocer la dinámica del carbono. Álvarez & Rubio (2013) registraron valores similares en un bosque de pino-encino de la Sierra Juárez;

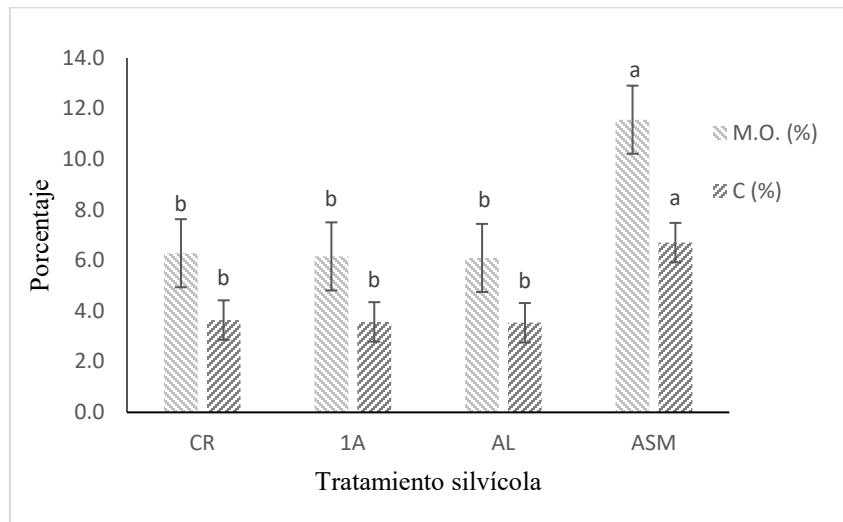


FIGURA 3. Porcentaje de materia orgánica (MO) y contenido de carbono (C) en el suelo.

CR = corta de regeneración (árboles padres), 1A = primer aclareo, AL = aclareo libre, ASM = área sin manejo.
Los datos con letras distintas presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05).
Las barras verticales representan el error estándar.

450 kg m⁻³ para pino y 630 kg m⁻³ para encino; la DB de la madera es un indicador potencial para estimar la biomasa arbórea de cualquier ecosistema (Álvarez et al., 2012; Ganamé et al., 2021).

Biomasa en compartimentos y carbono en el suelo
El ASM presenta menor densidad arbórea (491 ha⁻¹), pero mayor diámetro y altura promedio; esta área presentó (0.15, 0.68, 8.9 y 4.26) t ha⁻¹ de biomasa en los compartimentos: herbáceo, arbustivo, hojarasca y necromasa, respectivamente. El área con AL presentó la mayor densidad (1166 ha⁻¹) con (0.09, 0.43, 11.3 y 4.05) t ha⁻¹ de biomasa en los mismos compartimentos respectivos. Con respecto a lo anterior, Barth et al. (2016) encontraron, en densidades arbóreas de 375 ha⁻¹, contenidos de biomasa de (0.44, 1.59, 14.54, 0.87) t ha⁻¹ y, en densidades arbóreas de 1500 ha⁻¹, biomasa de (0.40, 1.60, 12.76, 2.53) t ha⁻¹, esto para los compartimentos herbáceo, arbustivo, hojarasca y necromasa, respectivamente. Castelán-Lorenzo y Arteaga-Martínez (2009) y Pensado-Fernández et al. (2014) refieren que la adecuada densidad y distribución arbóreas favorecen las condiciones del sitio, por lo tanto, un incremento en la biomasa.

Las áreas con AL, 1A y ASM mostraron (14.46, 14.77, 10.22) t ha⁻¹ de biomasa en humus, respectivamente, siendo superiores al área con CR (3.93 t ha⁻¹); de igual forma, el área con 1A fue la de mayor contenido de biomasa en hojarasca (15.1 t ha⁻¹). Estos resultados concuerdan con los señalados por Chávez-Pascual et al. (2017), donde la menor acumulación de biomasa del piso forestal (hojarasca y humus) fue en áreas con CR (32.57 t ha⁻¹ ± 2.9 t ha⁻¹) y la mayor en sitios conservados (44.4 t ha⁻¹ ± 1.8 t ha⁻¹).

Las áreas con CR muestran la menor cantidad de hojarasca y humus en el piso forestal, debido a que predomina arbolado muy joven, en el que ocurre escasa senescencia y abscisión de ramas y hojas (Wagner et al., 2006). Por otro lado, las ASM presentan altas concentraciones de biomasa en esos compartimentos, lo que concuerda con un estudio realizado en la Reserva de la Biosfera, Huautla, Morelos, por Gómez-Díaz et al. (2012), quienes registraron, en dos condiciones de bosque de encino, bosque secundario medio y bosque maduro, 7.7 t ha⁻¹ y 10.2 t ha⁻¹ de biomasa en hojarasca, así como 7.0 t ha⁻¹ y 21.7 t ha⁻¹ de biomasa en humus, respectivamente. De igual forma, Gómez-Díaz et al. (2012) encontraron en dos condiciones de bosque tropical seco (secundario temprano



y maduro): 4.7 t ha⁻¹ y 5.8 t ha⁻¹ de biomasa en el piso forestal (humus + hojarasca).

Los sitios con aplicación de 1A acumularon 20.1 t ha⁻¹ de necromasa, que representa un incremento porcentual entre 381% y 572% con respecto al resto de TS; en este sentido, las áreas sometidas a aclareos presentan altas cantidades de necromasa, como lo documentan Martiarena et al. (2011) en una plantación de *Pinus taeda* L. en Argentina, donde en densidades arbóreas residuales de (711, 364 y 122) ha⁻¹ encontraron (25, 18.3 y 16.7) t ha⁻¹ de necromasa, respectivamente. Los aclareos son buenas técnicas para suprimir la vegetación que compite con las plantas jóvenes de pino, cambiando la composición de la vegetación (Santala et al., 2019). El ASM tuvo 4.26 t ha⁻¹ de necromasa resultante de podas naturales, caída de frutos y muerte por competencia (la cual fue poca), estos valores concuerdan con Galicia et al. (2015), quienes registraron, en bosque maduros sin aprovechamiento, valores de 8.7 t ha⁻¹ a 17.9 t ha⁻¹; esto puede vincularse con el estado sanitario del arbolado, ya que la incidencia de árboles muertos fue baja.

El área con CR tuvo 3.8 t ha⁻¹ de biomasa arbustiva, siendo 458.9% superior al ASM y 166.0% al área bajo AL. También, los sitios de CR tuvieron 60% más de biomasa herbácea que el ASM. Esto coincide con los resultados presentados por Chávez-Pascual et al. (2017) en un bosque de pino-encino de la Sierra Norte de Oaxaca, donde encontraron diferencias significativas de biomasa arbustiva y herbácea en áreas con CR a 10 años (42.27 t ha⁻¹ y 1.42 t ha⁻¹). Esta proliferación arbustiva y herbácea se debe a la alta reducción de la densidad arbórea favoreciendo la entrada de luz bajo el dosel (Ruiz-Díaz et al., 2014); por el contrario, las ASM son un bosque abierto con menor densidad arbórea, pero con dimensiones mayores, limitando la energía solar hacia el suelo (Parker et al., 2012). Por lo anterior, áreas con CR y sin tratamientos complementarios tienden a aumentar el material arbustivo y herbáceo y pueden afectar la regeneración de especies de importancia maderable como *Pinus* spp. (Pallavacini, 2010).

No hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) en la acumulación de biomasa herbácea y arbustiva entre los tratamientos AL, 1A y ASM; esto coincide con lo

encontrado por Martiarena et al. (2011) quienes señalan valores respectivos de (1.33, 1.25 y 1.07) t ha⁻¹ de biomasa herbácea en respuesta a aclareos con intensidades de 0%, 33% y 66%, pero contrasta en biomasa arbustiva donde observaron valores en el mismo orden de (0.26, 0.70 y 5.29) t ha⁻¹.

La densidad aparente del suelo del área con CR (1063.8 kg m⁻³) mostró diferencias significativas ($p < 0.01$) en comparación con el rodal sin manejo (713.88 kg m⁻³) siendo 49% más denso. Por otro lado, Martiarena et al. (2011) encontraron valores mayores en suelos forestales bajo aprovechamiento: 1320 kg m⁻³ en áreas bajo conservación y en áreas con 33% y 66 % de aclareo 1290 kg m⁻³ y 1270 kg m⁻³, respectivamente.

Los sitios con aplicación de AL contienen los menores montos de C en suelo (40.3 t ha⁻¹), además de valores reducidos en MO (6%) y contenido de C (3.8%) (Fig. 3); el resto de TS acumulan, en promedio 67.4 t C ha⁻¹, lo cual representa un decremento de 67.2% en el área bajo AL. Solís-Hernández et al. (2014) estimaron, en suelos forestales (10 cm - 30 cm), 6.1 t ha⁻¹ - 102.5 t ha⁻¹ de C en áreas con CR, y 10.9 t ha⁻¹ - 106.3 t ha⁻¹ en áreas bajo aclareos. Vela-Correa et al. (2012) determinaron, en suelos bajo conservación (10 cm - 30 cm) del Distrito Federal con vegetación de *Abies* spp. y *Pinus* spp., contenidos de C orgánico de 100 t ha⁻¹ a 150 t ha⁻¹. Por otro lado, en rodales conservados de pino-encino y rodales bajo aprovechamiento, de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México, se registraron 103 t ha⁻¹ ± 35 t C ha⁻¹ y 39 t C ha⁻¹ ± 20 t C ha⁻¹, respectivamente (Pérez-Ramírez et al., 2013); lo que indica que el almacenamiento de C disminuye con la profundidad del suelo.

CONCLUSIONES

Los tratamientos silvícolas (TS) aplicados en los bosques comunales de San Juan Lachao no modifican la biomasa estructural arbórea, sin embargo, influyen en los montos de biomasa acumulada en arbustos y herbáceas, así como la acumulada en la hojarasca, necromasa y humus. Los TS de aclareo libre y cortas de regeneración (CR) tienden a reducir la biomasa acumulada en el piso forestal de los rodales; sin

embargo, las intensidades de corta bajas (primer aclareo) igualan la acumulación de biomasa del piso forestal del área sin manejo (ASM).

Los tratamientos silvícolas no afectan de forma significativa a la biomasa aérea total; esto es debido a que el tiempo de respuesta de los tratamientos es a largo plazo, y San Juan Lachao recién empezó con su programa de manejo, por lo que se sugiere seguir realizando evaluaciones en estos sitios establecidos. Por otra parte, el suelo del área bajo conservación presentó mayor contenido de carbono (6.7%) en la materia orgánica (MO =11.6%), esto debido a la conservación del mismo. Es por ello que, al realizar aprovechamiento maderable, se deben contemplar tratamientos complementarios de reincorporación de MO al suelo, llevando a cabo un balance nutrimental.

REFERENCIAS

- Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., & Gómez Villegas, R. G. (2011). Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(4), 529–543. <https://doi.org/10.29312/remexca.v2i4.1638>
- Aguirre-Calderón, O. A., & Jiménez-Pérez, J. (2011). Evaluación del contenido de carbono en bosques del Sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(6), 74–84. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i6.575>
- Álvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., de las Salas, G., del Valle, I., Lema, A., Moreno, F., Orrego, S., & Rodríguez, L. (2012). Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management*, 267, 297–308. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.013>
- Álvarez, S., & Rubio, A. (2013). Línea base de carbono en bosque mixto de pino-encino de la Sierra Juárez (Oaxaca, México). Aplicación del modelo CO2FIX V.3.2. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(1), 125–137. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.01.005>
- Barth, S. R., Giménez, A. M., Joseau, M. J., Gauchat, M. E., & Fassola, H. E. (2016). Compartimentalización de la biomasa aérea de *Grevillea robusta* A. en función a la densidad inicial de plantación. *Scientia Forestalis*, 44(111), 653–664. <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n111.11>
- Bravo, F., del Río, M., Bravo-Oviedo, A., del Peso, C., & Montero, G. (2008). Forest management strategies and carbon sequestration. En F. Bravo, R. Jandl, V. LeMay, & K. von Gadow (Eds.) *Managing forest ecosystems: The challenge of climate change. Managing Forest Ecosystems, vol 17* (pp. 179-194). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8343-3_11
- Bravo, F., Herrero, C., Ordóñez, C., Segura, M., Gómez, C., Menéndez, M., & Cámaras, A. (2007). Cuantificación de la fijación de CO₂ en la biomasa arbórea de los sistemas forestales españoles. En F. Bravo (Coord.), *El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático* (pp. 143-122). Fundación Gas Natural.
- Castelán-Lorenzo, M., & Arteaga-Martínez, B. (2009). Establecimiento de regeneración de *Pinus patula* Schl. et Cham., en cortas bajo el método de árboles padres. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(1), 49–57. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62916073005>
- Chávez-Pascual, E. Y., Rodríguez-Ortiz, G., Carrillo-Rodríguez, J. C., Enríquez-del Valle, J. R., Chávez-Servia, J. L., & Campos-Ángeles, G. V. (2018). Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 1273–1284. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i6.1290>
- Chávez-Pascual, E. Y., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-Del Valle, J. R., Velasco-Velasco, V. A., & Gómez-Cárdenas, M. (2017). Comportamientos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas. *Madera y Bosques*, 23(3), 147–161. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331627>
- Comisión Nacional Forestal [Conafor]. (2020). *El sector forestal mexicano en cifras 2020*. Zapopan, Jalisco, México: Conafor.
- Cortés-Pérez, M., De León-González, F., Paz-Pellat, F., Leyva-Pablo, T., Santiago-García, W., Ponce-Mendoza, A., & Fuentes-Ponce, M. (2021). Aboveground carbon storage in a temperate forest: high and low intensity forest management. *Madera y Bosques*, 27(4), e2742440. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742440>
- Cortés-Sánchez, B. G., Ángeles-Pérez, G., De los Santos-Posadas, H. M., & Ramírez-Maldonado, H. (2019). Allometric equations to estimate biomass in oak species in Guanajuato, Mexico. *Madera y Bosques*, 25(2), e2521799. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521799>
- Cutini, A., Chianucci, F., & Manetti, M. C. (2013). Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Italian coastal stands. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, 6(1), 331–335. <https://doi.org/10.3832/ifor0941-006>
- Delgado, L. A., Acevedo, M. F., Castellanos, H., Ramírez, I., & Serrano, J. (2005). Relaciones alométricas y patrones de crecimiento para especies de árboles de la reserva forestal Imataca, Venezuela. *Interciencia*, 30(5), 275–283.



- Eamus, D., McGuinness, K., & Burrows, W. (2000). Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the Northern Territory and Western Australia. *National Carbon Accounting System. Australia*. <http://www.greenhouse.gov.au/ncas>
- Espinoza-Zúñiga, P., Leos-Rodríguez, J. A., Rodríguez-Ortiz, G., Montiel-Batalla, B. M., & Valdivia-Alcalá, R. (2023). Carbono estructural y compartimentos en bosques certificados por el Forest Stewardship Council, en Oaxaca, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(1), e3474. <https://doi.org/10.19136/era.a10n1.3474>
- Ekoungoulou, R., Liu, X., Loumeto, J. J., & Ifo, S. A. (2014). Tree above- and below-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in secondary forest of Congo. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8(4), 09–20. <https://doi.org/10.9790/2402-08420920>
- Figueroa-Navarro, C. M., Ángeles-Pérez, G., Velázquez-Martínez, A., & de los Santos-Posadas, H. M. (2010). Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schlehd. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 105–112. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v1i1.658>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., & Barbero, L. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, 15(12), 5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>
- Fonseca G, W., Alice G, F., & Rey B, J. M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, 30(1), 36–47. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002009000100006>
- Galicia, L., Gamboa Cáceres, A. M., Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña Ramírez, V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34, 1–29. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/73>
- Galicia, L., Saynes, V., & Campo, J. (2015). Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *Botanical Sciences*, 93(3), 433–457. <https://doi.org/10.17129/botsci.66>
- Ganamé, M., Bayen, P., Ouédraogo, I., Balima, L. H., & Thiombiano, A. (2021). Allometric models for improving aboveground biomass estimates in West African savanna ecosystems. *Trees, Forests and People*, 4, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100077>
- García-Aguilar, J. Á., Rodríguez-Ortiz, G., & Martínez-de la Cruz, J. (2015). Influencia de variables fisiográficas en la productividad de biomasa aérea en bosques mixtos. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 2(2), 87–98. https://rmae.voaxaca.tecnm.mx/wp-content/uploads/2020/11/4-RMAE_2015-12-Biomasa.pdf
- Gómez-Díaz, J. D., Monterroso-Rivas, A. I., Tinoco-Rueda, J. A., & Etchevers-Barra, J. D. (2012). Almacenes de carbono en el piso forestal de dos tipos de bosque. *Terra Latinoamericana*, 30(2), 177–187. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v30n2/2395-8030-tl-30-02-00177.pdf>
- Gracia, C., Gil, L., & Montero, G. (2005). Impactos sobre el sector forestal. En J. M. Moreno Rodríguez (Coord.), *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático* (pp. 399–435). Ministerio de Medio Ambiente.
- Institute SAS. (2017). *Base SAS 9.4 procedures guide: statistical procedures*.
- Joshi, R. K., & Dhyani, S. (2018). Biomass, carbon density and diversity of tree species in tropical dry deciduous forests in Central India. *Acta Ecologica Sinica*, 39(4), 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.09.009>
- Ketterings, Q. M., Coe, R., van Noordwijk, M., Ambagau', Y., & Palm, C. A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146(1–3), 199–209. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00460-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00460-6)
- Leyva-Pablo, T., de León-González, F., Etchevers-Barra, J. D., Cortés-Pérez, M., Santiago-García, W., Mendoza-Ponce Alejandro, & Fuentes-Ponce, M. H. (2021). Carbon storage in forests with community forest management. *Madera y Bosques*, 27(4), e2742421. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742421>
- Madrid, L., Núñez, J. M., Quiroz, G., & Rodríguez, Y. (2009). La propiedad social forestal en México. *Investigación Ambiental*, 1(2), 179–196. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/gacetas/627/propiedad.pdf>
- Martiarena, R. A., Pinazo, M. A., Wallis Von, A., Knebel, O., & Pahr, N. M. (2011). Alternativas de manejo silvícola para la conservación de nutrientes en sistemas forestales en Misiones, Argentina. *Ciencia de Suelo*, 29(1), 39–48. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/5811>
- Miguel-Martínez, A., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J. R., Pérez-León, M. I., Castañeda-Hidalgo, E., & Santiago-García, W. (2016). Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus ayacahuite* del norte de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7), 1575–1584. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i7.151>

- Návar, J. (2009). Biomass component equations for Latin American species and groups of species. *Annals of Forest Science*, 66(2), 208–216. <https://doi.org/10.1051/forest/2009001>
- Pallavacini, Y. (2010). Factores que influyen en la acumulación de biomasa de herbáceas durante la sucesión en minas de carbón. *Ecosistemas*, 19(3), 78–82. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/376>
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Parker, W. C., Pitt, D. G., & Morneault, A. E. (2012). Influence of herbaceous and woody vegetation control on seedling microclimate, leaf gas exchange, water status, and nutrient relations of *Pinus strobus* L. seedlings planted in a shelterwood. *Forest Ecology and Management*, 271, 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.042>
- Pensado-Fernández, J. A., Sánchez-Velásquez, L. R., Pineda-López, M. del R., & Díaz-Fleischer, F. (2014). Plantaciones forestales vs. regeneración natural In situ: El caso de los pinos y la rehabilitación en el Parque Nacional Cofre de Perote. *Botanical Sciences*, 92(4), 617–622. <https://doi.org/10.17129/botsci.109>
- Pérez-Ramírez, S., Ramírez, M. I., Jaramillo-López, P. F., & Bautista, F. (2013). Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Revista Chapino, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(1), 157–173. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.06.042>
- Rodríguez-Larramendi, L. A., Guevara-Hernández, F., Reyes-Muro, L., Ovando-Cruz, J., Nahed-Toral, J., Prado-López, M., & Campos Saldaña, R. A. (2016). Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 77–94. <https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i37.53>
- Rodríguez-Ortiz, G., Aldrete, A., González-Hernández, V. A., de Los Santos-Posadas, H. M., Gómez-Guerrero, A., & Fierros-González, A. M. (2011). ¿Afectan los aclareos la acumulación de biomasa aérea en una plantación de *Pinus patula*? *Agrociencia*, 45(6), 719–732. <https://doi.org/14053195>
- Rodríguez-Ortiz, G., García-Aguilar, J. Á., Leyva-López, J. C., Ruiz-Díaz, C., Enríquez-del Valle, J. R., & Santiago-García, W. (2019). Biomasa estructural y por compartimentos en regeneración de *Pinus patula* en áreas con matarrasa. *Madera y Bosques*, 25(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511713>
- Romahn-de la Vega, C. F., & Ramírez, M. H. (2010). *Dendrometría. Universidad Autónoma de Chapino*. México, DF, 312 p. <http://diciof.chapino.mx/pdf/publicaciones/dendrometria.pdf>
- Ruiz-Díaz, C., Rodríguez-Ortiz, G., Cristóbal Leyva-López, Enríquez-del Valle, J. R. (2014). Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México. *Naturaleza y Desarrollo*, 12(1), 28–45.
- Santala, K., Aubin, I., Hoepting, M., Bachand, M., & Pitt, D. (2019). Managing conservation values and tree performance: Lessons learned from 10 year experiments in regenerating eastern white pine (*Pinus strobus* L.). *Forest Ecology and Management*, 432, 748–760. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.038>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat] (2000) Norma Oficial Mexicana NOM-021- RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. Cd. Mx., México
- Servicios Técnicos Forestales [STF] (2011). Programa de manejo forestal para el aprovechamiento y conservación. *San Juan Lachao, Oaxaca*.
- Siles, P., Talavera, P., Rugama, F. A., Alaniz, L., & Ortiz González, W. (2017). Composición florística, estructura y biomasa de los bosques de pino-encino en la reserva Santa Rosa, Tisey, Estelí, Nicaragua. *Revista Biología Tropical*, 65(2), 763–775. <https://www.redalyc.org/journal/449/44950834027/html/>
- Solís-Hernández, A., Nájera-Luna, J. A., Méndez-González, J., Vargas-Larreta, B., & Álvarez-Gallegos, M. (2014). Carbono orgánico del suelo en rodales silvícolas del ejido La Victoria, Pueblo Nuevo, Durango. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 22(63), 5-11.
- Soriano-Luna, M. Á., Ángeles-Pérez, G., Martínez-Trinidad, T., Plascencia-Escalante, F. O., & Razo-Zárate, R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423–438. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000400006
- Torres-Rojo, J. M., Moreno-Sánchez, R., & Mendoza-Briseño, M. A. (2016). Sustainable forest management in Mexico. *Current Forestry Reports*, 2(2), 93–105. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0033-0>
- Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J. J., Aguirre-Calderón, O. A., López-Martínez, J. O., de los Santos-Posadas, H. M., Zamudio-Sánchez, F. J., Treviño-Garza, E. J., Martínez-Salvador, M., & Aguirre-Calderón, C. G. (2017). SiBiFor: Sistema biométrico forestal para el manejo de los bosques de México. *Revista Chapino Serie Ciencias*



Forestales y del Ambiente, 23(3), 437–455.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>

Vásquez-Fabián, S. A., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J. R., Campos-Ángeles, G. V., & Santana-Flores, A. (2017). Volumen y biomasa aérea de *Pinus pseudo strobus* y *P. teocote* del sur de Oaxaca. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 4(2), 164–172. https://rmae.voaxaca.tecnm.mx/wp-content/uploads/2020/11/7-RMAE_2017-15-Biomasa-To-edit.pdf

Vela-Correa, G., López-Blanco, J., & Rodríguez-Gamiño, M. D. L. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas*, 77(77), 18. <https://doi.org/10.14350/ig.31007>

Wagner, R. G., Little, K. M., Richardson, B., & Mcnabb, K. (2006). The role of vegetation management for enhancing productivity of the world's forests. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 79(1), 57–79. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpi057>

Yu, Z., Ciais, P., Piao, S., Houghton, R. A., Lu, C., Tian, H., Agathokleous, E., Kattel, G. R., Sitch, S., Goll, D., Yue, X., Walker, A., Friedlingstein, P., Jain, A. K., Liu, S., & Zhou, G. (2022). Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980. *Nature Communications*, 13(5374). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32961-2>

Manuscrito recibido el 15 de diciembre de 2022

Aceptado el 12 de marzo de 2024

Publicado el 09 de octubre de 2024

Este documento se debe citar como:

Ambrosio-Lazo, A., Rodríguez-Ortiz, G., Santiago-García, W., Ruiz Luna, J., Velasco-Velasco, V. A., & Enríquez-del Valle, J. R. (2024). Biomasa aérea y carbono en el suelo en rodales de pino-encino bajo tratamientos silvícolas. *Madera y Bosques*, 30(2), e3022564. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3022564>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C.
se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual
4.0 Internacional.