

Efecto de tratamientos silvícolas y factores de sitio sobre nutrientes contenidos en la biomasa aérea

Effect of silvicultural treatments and site factors on nutrients contained in aboveground biomass

Yazmin Pérez-Alavez¹ , Gerardo Rodríguez-Ortiz^{1*} , Wenceslao Santiago-García² , Gisela Virginia Campos-Angeles¹ , Salvador Lozano-Trejo , Meredith P. Martin³ 

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Carretera al ITAO S/N, Ex-Hacienda de Nazareno, CP. 71233. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.

²División de Estudios de Posgrado-Instituto de Estudios Ambientales, Universidad de la Sierra Juárez. Avenida Universidad S/N, CP. 68725. Ixtlán de Juárez, Oaxaca México.

³Department of Forestry and Environmental Resources, North Carolina State University, Raleigh, 27606, USA.

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

Artículo científico

Recibido: 21 de mayo 2025

Aceptado: 16 de octubre 2025

RESUMEN. Los ecosistemas forestales templados son uno de los reservorios de carbono (C) y nutrientes más importantes, donde sus montos se ven afectados por las actividades de manejo forestal, la calidad del sitio y del ambiente. El objetivo fue evaluar el efecto de tratamientos silvícolas (TS) y factores de sitio sobre los montos de C y otros nutrientes contenidos en la biomasa aérea. En 2023 se establecieron 60 sitios de 400 m² bajo diseño de muestreo estratificado aleatorio; se realizó inventario del arbolado y se estimó C, nitrógeno (N) y calcio (Ca). Se realizaron pruebas de bondad de ajuste (χ^2), se diferenciaron TS mediante modelo lineal generalizado (GLM) y pruebas de medias (Duncan, $\alpha = 0.05$). Los montos de C arbóreo aéreo generan alta dependencia ($p \leq 0.01$) de factores del sitio como pendiente, altitud y exposición y de los tratamientos silvícolas. Todos los compartimentos se diferenciaron en sus contenidos de C, N y Ca ($p \leq 0.05$) entre TS, excepto en los contenidos de C en la estructura arbórea, necromasa y hojarasca.

Palabras clave: Calcio, compartimentos, manejo forestal, nitrógeno.

ABSTRACT. Temperate forest ecosystems are one of the most important reservoirs of carbon (C) and other nutrients, whose amounts are affected by forest management activities, the site quality and the environment. The objective of this work was to evaluate the effect of silvicultural treatments (ST) and site factors on the amounts of C and other nutrients contained in the aboveground biomass. In 2023, 60 sites of 400 m² were established under a random stratified sampling design; an inventory of the trees was carried out to estimate C stored in trees, and C, nitrogen (N) and calcium (Ca) were estimated in necromass, leaf litter, humus and soil compartments. Goodness-of-fit tests were performed (χ^2), ST were differentiated using generalized linear model (GLM) and means tests (Duncan, $\alpha = 0.05$), as well as rank correlation analysis (Spearman, 0.05). Site factors such as slope, altitude and exposure generate high dependence ($p \leq 0.01$) on silvicultural treatments in the amounts of aerial tree C. All compartments differed in their C, N and Ca contents ($p \leq 0.05$) between ST, except in the C contents in the tree structure, necromass and leaf litter.

Keywords: Calcium, compartments, forest management, nitrogen.

Como citar: Pérez-Alavez Y, Rodríguez-Ortiz G, Santiago-García W, Campos-Angeles GV, Lozano-Trejo S, Martin MP (2025) Efecto de tratamientos silvícolas y factores de sitio sobre nutrientes contenidos en la biomasa aérea. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. V: e4619. DOI: 10.19136/era.a12nV.4619.

INTRODUCCIÓN

Una de las preocupaciones mundiales de mayor interés es la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), causada por la quema de combustibles, que generan el 70% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) (Ledesma *et al.* 2021). Los GEI generan aumento de temperatura, ascenso del nivel del mar, deterioro de hábitats, reducción de áreas boscosas, entre otras (Regil-García *et al.* 2020). Por esta razón, se han implementado políticas gubernamentales y acuerdos internacionales que proporcionan mecanismos de flexibilidad; uno de ellos el proyecto llamado Mecanismo de Desarrollo Limpio (Mercado-García y Molina-Rodríguez 2021), como forma de compensar a los países que protegen sus bosques y aquellos que reducen las emisiones de GEI (Bautista-Cruz *et al.* 2022, Ruiz-Nápoles *et al.* 2023).

Los bosques templados son uno de los reservorios de carbono (C) más importantes a escala mundial, ya que ayudan en la regulación del clima (Cortés-Pérez *et al.* 2021). Estos ecosistemas a nivel mundial y en México ocupan alrededor del 24% de área forestal, donde son los de mayor importancia económica (Quijada *et al.* 2020, Flores-Morales *et al.* 2022). Estos ecosistemas boscosos proveen servicios ambientales, sociales, biológicos y económicos; además ayudan a mitigar el cambio climático intercambiando el 80% de C en la atmósfera (Caballero-Cruz *et al.* 2022). Uno de los servicios ambientales que suministran estos bosques son el secuestro de CO₂ que ayuda a mitigar las emisiones de GEI. Un bosque que crece está catalogado como un sumidero de C, los bosques durante su crecimiento absorben el CO₂ de la atmósfera y lo convierten en C que se almacena en toda su biomasa. Aunado a ello queda C almacenado en el suelo, en la materia orgánica del piso forestal (hojarasca) y en los árboles muertos (Carvajal-Agudelo y Andrade 2020).

El almacenamiento de C en los bosques depende del manejo forestal, la estructura del bosque, densidad arbórea, área basal (AB), altura total (AT) de los individuos y diámetro normal (DN), lo cual se encuentra muy relacionado con la cantidad total de biomasa (Cortés-Pérez *et al.* 2021, Ledesma *et al.* 2021, Souza *et al.* 2021, Caballero-Cruz *et al.* 2022). A nivel mundial, en los ecosistemas forestales el C en suelo ocupa el 44%, la biomasa aérea 42%, madera muerta 8% y el mantillo 5% (Galicia *et al.* 2016), alrededor de la mitad del C se encuentra en el piso forestal. En la actualidad se indica que estos suelos pueden actuar como sumideros de C (Cruz-Sánchez *et al.* 2022). El 36% de estos suelos se encuentran sin degradación aparente, permiten un ecosistema más estable (Pérez-Hernández *et al.* 2023).

El manejo forestal adecuado es importante para la conservación de la diversidad, y estructura arbórea evitando plagas y enfermedades. Los diferentes tratamientos silvícolas (TS) favorecen la estructura del bosque y conservan la diversidad (Manzanilla-Quijada *et al.* 2022). Al realizar la cosecha forestal algunos nutrientes del suelo se pierden, por el arrastre de las trozas, pero no amenaza la sustentabilidad, ya que la caída de follaje, ramas, hojarasca y fuste al piso forestal ayudan a que estos nutrientes regresen de nuevo (López-Escobar *et al.* 2018). Por otro lado, la explotación forestal no sustentable ocasiona la pérdida de suelo llegando a erosionarlos, aumentan también la escorrentía superficial y en consecuencia la productividad (Béjar-Pulido *et al.* 2021).

El nitrógeno (N) es un elemento importante para las plantas en la fotosíntesis, y la síntesis de proteína, que son necesarias para la construcción de células, además es un componente de la

clorofila necesaria para que realizar la fotosíntesis. La principal reserva de N en el suelo es la materia orgánica. Las plantas absorben el N del suelo en forma de nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+). Son el cuarto elemento más abundante en los tejidos vivos (Sosa-Rodriguez *et al.* 2019). El calcio (Ca) es otro elemento fundamental para las plantas, ya que ayuda a fortalecer las paredes celulares, crean una estructura estable y es fundamental para la absorción de nutrientes, además es un mensajero secundario de las plantas ante las condiciones de estrés (Rahman *et al.* 2016, Moreno-Gómez *et al.* 2021). El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de los tratamientos silvícolas y factores de sitio, sobre los montos de carbono, nitrógeno y calcio contenidos en la parte estructural, de compartimentos y suelo en rodales con manejo forestal maderable del sur de Oaxaca, México. La hipótesis es, los mayores montos de C, N, O y Ca contenidos en la biomasa se asocian a rodales de mayor densidad arbórea y expuestos a una exposición.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en la comunidad de San José del Pacífico, Oaxaca, México en la región de la Sierra Sur, en el predio denominado “El Encino”. El área presenta una superficie de 120 ha ubicada a una altitud promedio de 2480 m y localizado entre $16^\circ 16' 86''$ LN y $96^\circ 50' 19''$ LO. Los rodales bajo manejo forestal maderable tienen pendientes entre 30 y 80%; los árboles varían en altura total (15 m - 30 m) y diámetro normal (30 cm - 90 cm). Las principales especies arbóreas son *Pinus patula* Schl. et Cham *P. pseudostrobus* Lind, *P. leiophylla* Schl. & Cham, *P. oaxacana* Mirov, *P. douglasiana* Martínez, *Quercus crassifolia* Humb. y Bonpl, *Q. rugosa* Née, *Q. laurina* Humb. y Bonpl, con una densidad arbórea entre 300 y 1 000 árboles ha^{-1} .

En el año 2020 se llevó a cabo un plan de manejo forestal maderable con ciclo de corta de 10 años en su segundo año de intervención, utilizando el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI); se aplicaron cuatro TS: primer aclareo (A1), segundo aclareo (A2), tercer aclareo (A3), corta de regeneración (CR) y áreas segregadas para conservación que funcionaron como testigo en este estudio. El MMOBI aplicado a estructuras irregulares trata de una corta selectiva respetando la intensidad máxima de corta de 30-40% de las existencias y el diámetro mínimo de corta, buscando modificar las masas forestales dejando edades y tamaños de igual manera (Ramírez-Santiago *et al.* 2019).

Muestreo de sitios

Se empleó muestreo estratificado aleatorio, utilizando como estratos las superficies con TS y bajo conservación; los $n = 60$ sitios de 400 m^2 (UM) fueron distribuidos de manera aleatoria y proporcional al tamaño del estrato (A1 = 11, A2 = 17, A3 = 11, CR = 11, testigo = 10). Para el cálculo de los estadísticos del muestreo se utilizó la variable volumen maderable (m^3), debido a su alta correlación ($r > 0.9$) con los montos de nutrientes en la biomasa arbórea (Bautista-Cruz *et al.* 2022). Se obtuvo media estratificada ($\bar{y}_{st} = 822.8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$), error estándar ($S_{\bar{y}_{st}} = 39.72 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) e intervalos de confianza al 95% ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) [$743.32 \leq \bar{y}_{st} \leq 902.27$]; el error de muestreo fue de 4.8% a una precisión de $D = 1.55 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. Se realizó el inventario del arbolado existente en los sitios, llevados a cabo bajo

la metodología de La Reserva de Acción Climática (CAR) y se obtuvo: diámetro normal (DN cm) ≥ 30 cm, mediante una cinta diamétrica Forestry Suppliers®, altura total (AT, m) mediante un altímetro Haga, diámetro de copa (m) tomado en dos posiciones norte-sur con una cinta métrica de 20 m, En el centro de los sitios se instalaron subsitios de 100 m², para medir los árboles con diámetros normales ≥ 5 cm, para la recolección de la necromasa se establecieron dos sitios (por UM) cuadrangulares de 3x3 m² en donde se recolectó toda la necromasa existente; en sitios (por UM) de 1x1 m² se colectó toda la hojarasca y el humus y la muestra del suelo se tomó con ayuda de un tubo PVC® de 30 cm de largo por 7.6 de diámetro.

Determinación de nutrientes

El volumen maderable se obtuvo mediante las ecuaciones alométricas establecidas por el SiBiFor en la unidad de manejo 2009 (Vargas-Larreta *et al.* 2017); la gravedad específica (GE) de la madera se obtuvo mediante muestras de virutas en el caso de los pinos y rodajas en el caso de hojasas; el producto de la GE y volumen dio como resultado la biomasa arbórea. El análisis de nutrientes se realizó en todos los compartimentos y estructuras; para determinar C se usó el método de calcinación Walkley y Black (1934), el N por el método de Kjendahl (1883) basado en la NOM-021-SEMARNAT-2000 y el Ca por el método digestivo con mezcla diácida y determinado por espectrofotometría de absorción atómica. Los contenidos nutrimentales se infirieron por unidad de superficie, utilizando los montos de biomasa estimados.

Determinación de variables de sitio

Para el caso de la exposición esta se tomó con una brújula marca Suunto, la pendiente (Pn, %) con clinómetro marca Suunto y altitud (Al, m) con un gps marca Garmin, debido a las altitudes y pendientes que se encontraban en el lugar, estas se clasificaron en altas, medias y bajas (Al-baja ≤ 2400 , Al-mediana (2 400, 2 500], Al-alta $> 2 500$; Pn-baja ≤ 40 , Pn-mediana (40, 60], Pn-alta > 60).

Manejo y análisis de datos

Las variables de sitio obtenidas en el inventario se analizaron mediante pruebas de bondad de ajuste (χ^2 , 0.05) para relacionar variables de sitio y manejo con el C, N, Ca, contenido en la biomasa estructural y de compartimentos. Los contenidos de nutrientes se diferenciaron entre TS mediante la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis ($\alpha = 0.05$) y pruebas de separación de medias (Duncan, 0.05), con el paquete estadístico SAS (SAS 2022).

RESULTADOS

Los TS, así como las variables de sitio como exposición, pendiente y altitud generan montos diferenciados ($p \leq 0.01$) de C arbóreo aéreo, de tal manera que el TS cortas de regeneración acumula en la exposición oeste 11% del total de C almacenado. Los montos de C aéreo arbóreo son altamente dependientes de TS y altitud, donde los mayores montos se almacenan en los tratamientos A1 y testigo en altitudes altas (> 2518 m), donde acumulan el 27%. Los mayores montos de C se encuentran en pendientes medias (> 44 y $< 61\%$) que almacenan el 67% del C total (Tabla 1).

Tabla 1. Pruebas de independencia entre variables de sitio y tratamientos silvícolas, sobre los montos de carbono arbóreo aéreo (t C).

Variable	Tratamiento silvícola					
	A1	A2	A3	CR	Testigo	Total
Exposición	$\chi^2 = 343.20^{**}$					
Este	7.54 (0.01)	15.54 (0.03)	6.61(0.01)			29.69 (0.05)
Norte		8.36 (0.01)	10.40 (0.02)			18.76 (0.03)
Noreste	49.37 (0.09)		13.44 (0.02)	26.18 (0.05)	22.13 (0.04)	111.12 (0.20)
Noroeste		25.49 (0.04)		21.10 (0.04)		46.59 (0.08)
Oeste	14.46 (0.03)	26.71 (0.05)	38.04 (0.07)	61.95(0.11)	46.68 (0.08)	187.83 (0.34)
Sur	28.97(0.05)	48.55 (0.09)	13.04 (0.02)		9.08 (0.02)	99.64 (0.18)
Sureste	16.87 (0.03)	17.16 (0.03)				34.03 (0.06)
Suroeste		5.81 (0.01)	10.30 (0.02)		16.04 (0.03)	32.15 (0.06)
Altitud (Al, m)	$\chi^2 = 96.87^{**}$					
Alta	84.97 (0.15)	64.72 (0.12)	37.56 (0.07)	50.91 (0.09)	69.63 (0.12)	307.80 (0.55)
Mediana	32.23 (0.06)	52.24 (0.09)	48.42 (0.09)	58.32 (0.10)	15.21(0.03)	206.45 (0.37)
Bajo		30.64 (0.05)	5.85 (0.01)		9.08(0.02)	45.58 (0.08)
Pendiente (Pn, %)	$\chi^2 = 178.34^{**}$					
Alta	21.51 (0.04)		23.36 (0.04)	18.60 (0.03)		63.47 (0.11)
Mediana	88.16(0.16)	67.98 (0.12)	55.43 (0.10)	90.64 (0.16)	72.74 (0.13)	374.95 (0.67)
Baja	7.54(0.02)	79.63 (0.14)	13.04 (0.02)		21.19 (0.04)	121.41 (0.22)
Total	117.21 (0.21)	147.61 (0.26)	91.84 (0.16)	109.24 (0.20)	93.93 (0.17)	559.82 (100)

A = aclareo, CR = corta de regeneración; frecuencia absoluta (frecuencia relativa). Al-baja \leq 2400, Al-mediana (2400, 2500], Al-alta $>$ 2500; Pn-baja \leq 40, Pn-mediana (40, 60], Pn-alta $>$ 60. ******Valores altamente significativos (χ^2 , $p \leq 0.01$).

El análisis de varianza mostró que todos los nutrientes evaluados en estructuras y compartimentos se diferenciaron ($p \leq 0.05$) entre TS, excepto en el C contenido en aéreo, hojarasca, necromasa y árboles y en la biomasa arbórea; el C en suelo se caracteriza por tener la menor variabilidad en los sitios ($CV < 27.47\%$), lo cual se refleja en cuadrados medios del error bajos (Tabla 2).

El C contenido en la biomasa aérea arbórea en los sitios bajo TS y áreas de conservación es el mismo ($173.7 \text{ Mg C ha}^{-1}$); el testigo supera con 27.6% al resto de los tratamientos de Ca en necromasa, también contiene un alto contenido de N en hojarasca y suelo; existe una disminución del 30.0% del Ca del suelo cuando se realiza A2 y una reducción de 40 Mg C ha^{-1} al aplicar T (Tabla 3). Es importante observar (Tabla 3) que los nutrientes disminuyen cuando se inician los aclareos (A1 y A2) y que a medida que el rodal pasa a la fase de A3 y CR, estos montos en ocasiones superan al testigo; esto es indicativo que el rodal intervenido ha tenido el tiempo adecuado (2-3 años) para recuperar su productividad inicial.

Los rodales bajo TS contienen en promedio la misma cantidad de C en necromasa (2.7 Mg ha^{-1}) que el testigo; sin embargo, el compartimento de hojarasca mostró los niveles más altos en A3 (8.5 Mg ha^{-1}) y las CR en humus (14.9 Mg ha^{-1}) (Figura 1a). El testigo obtuvo la mayor cantidad de Ca (0.02 Mg ha^{-1}) en necromasa y hojarasca (0.04 Mg ha^{-1}); en el compartimento humus las CR generan 0.17 Mg ha^{-1} (Figura 1b). No obstante, la necromasa en las CR genera 0.07 t N ha^{-1} triplicando el

monto que se obtuvo en otros TS y testigo este último generó la mayo acumulación de N en hojarasca y suelo (0.16 y 0.06 Mg·ha⁻¹ (Figura 1c).

Tabla 2. Resumen del análisis de varianza de nutrientes contenidos en la biomasa de estructuras y compartimentos y suelo.

Variable	Suma de cuadrados	Coefficiente de variación (%)	\sqrt{CME}
Biomasa arbórea	17169.23 ^{ns}	57.9	17.6
Carbono arbóreo	16201.55 ^{ns}	57.7	17.3
Carbono (C) necromasa	16818.05 ^{ns}	57.3	17.4
Calcio (Ca) necromasa	14927.35*	54.0	16.4
Nitrógeno (N) necromasa	10353.29**	44.9	13.7
C hojarasca	15493.15 ^{ns}	55.0	16.7
Ca hojarasca	12509.85**	49.4	15.0
N hojarasca	10262.40**	44.7	13.6
C humus	7216.73**	37.5	11.4
Ca humus	9877.36**	43.9	13.4
N humus	7285.82**	37.7	11.5
C suelo	3863.34**	27.4	8.3
Ca suelo	4892.34**	30.9	9.4
N suelo	9035.24**	42.0	12.8

CME = cuadrado medio del error, **, *Valores altamente significativos y significativos ($p \leq 0.01$, $p \leq 0.05$), ^{ns} = no significativo ($p > 0.05$), Prueba de Kruskal Wallis ($\alpha = 0.05$).

Tabla 3. Nutrientes (t·ha⁻¹) en rodales bajo tratamientos silvícolas.

Variable	Tratamiento silvícola				
	Aclareo 1	Aclareo 2	Aclareo 3	Corta de regeneración	Testigo
B arbórea	37.3(1068.4) ± 91.5 ^a	28.8(902.9) ± 71.3 ^a	25.7(841.5) ± 105.2 ^a	30.1(1008.8) ± 138.2 ^a	31.4(959.2) ± 109.1 ^a
C arbóreo	36.1(185.7) ± 12.9 ^a	32.1(174.7) ± 13.6 ^a	36.6(150.17) ± 18.3 ^a	28(181.54) ± 31.1 ^a	24.7(176.16) ± 23.6 ^a
neC	33.91 (2.80) ± 5.7 ^a	26.50(2.46) ± 4.27 ^a	25.32 (2.41) ± 4.3 ^a	36.91 (2.84) ± 4.9 ^a	32.20 (2.74) ± 6.1 ^a
neCa	35.82 (0.02) ± 5.6 ^{ab}	28.62 (0.01) ± 4.3 ^{bc}	27.68 (0.01) ± 4.3 ^{bc}	20.09 (0.01) ± 4.2 ^c	42.40 (0.02) ± 5.1 ^a
neN	28.91 (0.02) ± 4.9 ^b	22.91 (0.02) ± 3.6 ^b	22.14 (0.02) ± 3.7 ^b	53.55 (0.07) ± 2.1 ^a	29.00 (0.02) ± 4.8 ^b
HC	26.59(7.52) ± 6.4 ^b	28.53 (7.66) ± 4.7 ^b	43.96 (8.51) ± 3.3 ^a	28.27 (7.63) ± 4.1 ^b	25.80 (7.51) ± 4.4 ^b
Hca	21.55 (0.04) ± 5.5 ^c	23.056 (0.04) ± 4.3 ^c	35.27 (0.04) ± 4.1 ^{ab}	48.00 (0.04) ± 2.5 ^a	28.50 (0.04) ± 3.9 ^{bc}
HN	19.23 (0.13) ± 4.9 ^c	20.88 (0.13) ± 3.9 ^c	32.14 (0.14) ± 4.1 ^b	35.91 (0.15) ± 3.1 ^b	51.50 (0.16) ± 2.1 ^a
HuC	29.91 (9.52) ± 3.5 ^b	27.82 (9.25) ± 3.4 ^b	34.64(10.18) ± 3.8 ^b	52.09(14.93) ± 2.7 ^a	7.40 (6.46) ± 1.5 ^c
HuCa	21.18 (0.11) ± 3.9 ^c	19.88 (0.10) ± 3.4 ^c	27.27 (0.12) ± 3.8 ^c	49.27 (0.17) ± 3.8 ^a	41.70 (0.14) ± 4.3 ^b
HuN	29.91 (0.83) ± 3.5 ^b	27.82 (0.81) ± 3.4 ^b	34.82 (0.89) ± 3.8 ^b	51.91 (1.29) ± 2.8 ^a	7.40 (0.56) ± 1.5 ^c
SC	6.09 (17.09) ± 1.1 ^c	26.77 (35.95) ± 1.9 ^b	25.64(35.26) ± 3.6 ^b	48.46(58.44) ± 2.5 ^a	49.30 (59.17) ± 2.5 ^a
Sca	28.27 (0.96) ± 3.3 ^c	9.35 (0.54) ± 1.3 ^d	49.00 (1.55) ± 2.8 ^a	36.73 (1.17) ± 3.5 ^{bc}	41.70 (1.29) ± 3.2 ^b
SN	12.09 (0.03) ± 3.0 ^c	33.41 (0.05) ± 2.8 ^b	19.73 (0.04) ± 4.5 ^c	39.82 (0.05) ± 4.5 ^{ab}	47.40 (0.06) ± 3.7 ^a
CT	6.27 (36.93) ± 1.2 ^d	25.82 (55.32) ± 1.7 ^c	26.91(56.35) ± 3.8 ^c	50.91(83.85) ± 2.1 ^b	46.60 (75.88) ± 2.9 ^a
CaT	27.91 (1.12) ± 3.1 ^c	9.24 (0.69) ± 1.3 ^d	47.91 (1.72) ± 3.0 ^a	38.09 (1.39) ± 3.6 ^b	42.00 (1.49) ± 3.1 ^b
NT	27.82 (1.01) ± 3.2 ^b	27.29 (1.00) ± 3.5 ^b	34.46 (1.09) ± 4.0 ^b	53.73 (1.55) ± 1.6 ^a	9.00 (0.80) ± 2.0 ^c

B = biomasa, ne = necromasa, H = hojarasca, Hu = humus, S = suelo, T = totales, C = carbono, N = nitrógeno, Ca = calcio. Valores con la misma letra en hilas no presentan diferencias estadísticas significativas (Duncan, 0.05). Media en rangos (media original) ± desviación estándar (n = 60 sitios). Prueba de Kruskal Wallis ($\alpha = 0.05$).

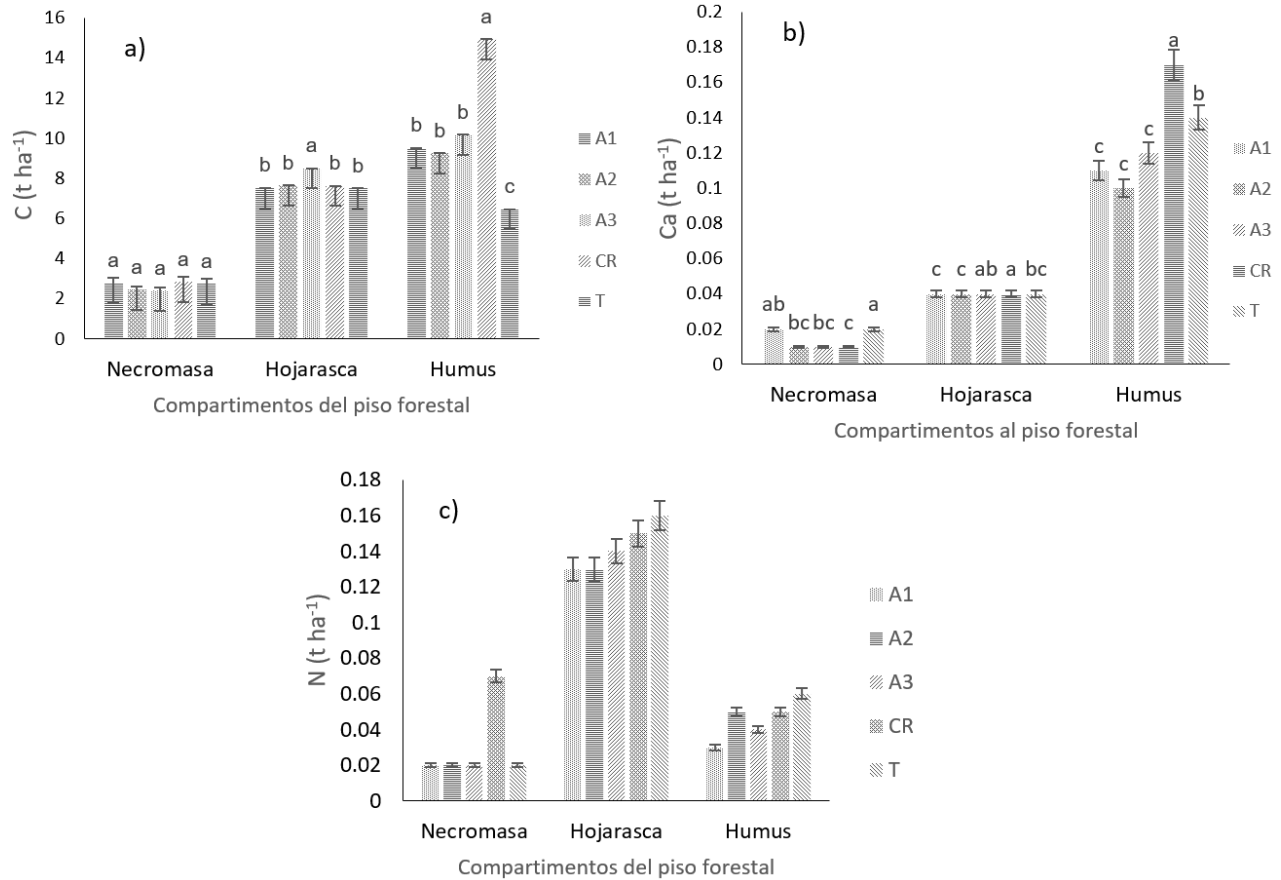


Figura 1: Carbono (C) a), calcio (Ca) b) y nitrógeno (N) c) de compartimentos con tratamientos silvícolas. A = aclareo, CR = corta de regeneración, T = testigo. Valores con la misma letra en hileras y por compartimento no presentan diferencias estadísticas significativas (Duncan, 0.05).

DISCUSIÓN

Los montos de C arbóreo aéreo son altamente dependientes de los factores de sitio (pendiente, altitud y exposición) y del tratamiento silvícola aplicado; de tal manera que las CR en sitios con exposición oeste presentaron la mayor acumulación de C arbóreo (61.95 t, 11.0%); el mismo tratamiento acumula el 16.0% del C arbóreo aéreo en sitios con pendientes entre 40% y 60%, mientras que los sitios bajo aclareos A1 y A2, localizados a más de 2500 m acumulan el 27% en este compartimento (149.7 t C), (Tabla 1). La edad, altura, densidad arbórea, y variables de sitio como exposición, altitud y pendiente se encuentran relacionados y son altamente dependientes con la acumulación de biomasa, y por ende de C (Charmakar *et al.* 2021, Chávez-Pascual *et al.* 2017).

Los TS no mostraron diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) en los montos de C estructural, sin embargo, al evaluar los contenidos de N, C, y Ca en compartimentos del piso forestal (necromasa, hojarasca, humus y suelo) estos fueron diferentes ($p \leq 0.05$), (Tabla 1 y 2). Espinoza-Zúñiga *et al.* (2023) mencionan que los TS que llevan varios años de aplicados, como los aclareos finales (A3) y las CR tienden a acumular los mayores contenidos de N en humus y hojarasca y los mayores contenidos de C y Ca en el suelo; en el caso de este estudio, el C en el suelo es el mismo

que contienen las CR que los sitios testigo con un 58.8%, superiores a los encontrados por Pan *et al.* (2011), quienes registraron 44% de C al suelo; mientras que el Ca en el suelo es más de 20.3% en el tratamiento A3 que el testigo. Esta diferencia se eleva hasta 58.4% al comparar el N en humus de las CR y testigo, indicando que entre más intensos son los tratamientos, mayor será la acumulación de nutrientes al suelo, esto se debe a que los árboles con edades y portes más grandes depositan la mayor cantidad de hojarasca al piso forestal (López-López *et al.* 2013).

Los rodales bajo manejo forestal secuestran la misma cantidad de C arbóreo aéreo (173.7 Mg C ha⁻¹) que los sitios testigo (Tabla 3), esto implica que la productividad modificada mediante la intervención silvícola se ha recuperado, ya que el área de estudio se caracteriza por poseer rodales productivos debido a la diversidad de latifoliadas, *Quercus* y *Pinus* de grandes dimensiones (DN de 55 -75 cm y AT de 25-30 m) de mayor densidad que acumulan mayor cantidad de biomasa y C (climas templados). Algunos otros rodales con mayor acumulación (200-250 Mg C ha⁻¹) de C son los bosques densos de *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham en climas tropicales y subtropicales (Hernández-Vera *et al.* 2017, Pompa-García *et al.* 2017, Leyva-Pablo *et al.* 2021). Sin embargo, Regil-García *et al.* (2020), en un bosque denso de *Abies religiosa*, reportaron 287 Mg C ha⁻¹, superiores a los registrados en este estudio. Esta alta productividad se observa claramente (Tabla 3) en la biomasa aérea arbórea (B), donde el valor promedio fue de 959.7 t ha⁻¹, valor superior al reportado por Ledesma *et al.* (2021) y Avendaño-Hernández *et al.* (2009), quienes encontraron 3.6 t B ha⁻¹ en un bosque de *Abies religiosa*; así como al de Chávez-Pascual *et al.* (2017), que reportaron 125.7 Mg B ha⁻¹ en un bosque de *Pinus oaxacana* bajo conservación en Ixtlán, Oaxaca. Por otro lado, Sivisaca *et al.* (2018) encontraron 322.4 Mg B ha⁻¹ en bosques montanos bajos en el sur de Ecuador.

El C contenido en el suelo se incrementa a medida que el rodal va pasando de las primeras intervenciones (A1,2) hasta llegar a la fase final (CR), donde los montos de C se igualan al testigo (58.8 Mg C ha⁻¹), esto tomando en consideración que el muestreo de este compartimento se realizó hasta 30 cm de profundidad. Datos similares mencionan Morales-Inocente *et al.* (2020) y Vargas-Larreta *et al.* (2023), quienes encontraron mayor acumulación de C a 20 cm, mientras que este estudio se encontró de 15- 20 cm, lo cual coincide a los reportados por Morfin *et al.* (2015) en profundidades de 15 cm, así como con otros autores (Bautista-Cruz *et al.* 2022, Caballero-Cruz *et al.* 2022, Cruz-Sánchez *et al.* 2022). El C en necromasa en todos los compartimentos no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$), en el caso del C en hojarasca el tratamiento A3 tuvo 8.5 Mg ha⁻¹ y en el caso de humus el tratamiento CR obtuvo 14.93 Mg ha⁻¹ (Figura 1a); estos datos son inferiores a los encontrados por Raj-Aryal *et al.* (2018) ya que, en áreas forestales ganaderas, el C acumulado en el suelo ayuda a controlar emisiones por deforestación (Nahed-Toral *et al.* 2013). Esto se debe a que la cantidad de necromasa en los TS es mejor por el manejo que se dio.

Los contenidos de Ca para los compartimentos de necromasa y hojarasca en sitios bajo aclareo fueron inferiores ($p \leq 0.05$) al tratamiento testigo (0.2 t ha⁻¹ vs. 0.14 t ha⁻¹); para el caso del humus, el tratamiento CR sobresale con 0.17 t Ca ha⁻¹, superando por 17.0% al testigo. Es importante notar que en los tres compartimentos (Figura 1b) el tratamiento testigo acumula la mayor cantidad de Ca, demostrando que las actividades de manejo afectan los montos de este nutriente, que es importante y esencial para las plantas ante las condiciones de estrés y pudrición (Moreno-Gómez *et al.* 2021, Rahman *et al.* 2016).

Los compartimentos del piso forestal (hojarasca y necromasa) y suelo tienden a acumular mayores contenidos de N a medida que el rodal llega a sus etapas finales de aprovechamiento (CR), en donde el contenido de N en hojarasca se reduce 30.5% en el A1 en relación al testigo (Figura 1c); de esta manera los TS recuperan los nutrientes en las últimas cortas (RS, C), ya que el N es uno de los elementos esenciales para las plantas, también es un macroelemento importante para el desarrollo de las mismas (Cocotle *et al.* 2022, Martínez-Soto *et al.* 2023).

CONCLUSIONES

Los montos de carbono arbóreo aéreo generan alta dependencia ($p \leq 0.01$) de factores del sitio (pendiente, altitud y exposición) y de tratamientos silvícolas (TS) aplicados en bosques del predio denominado el Encino de San José del Pacífico, al sur de Oaxaca, México. Estos bosques tienen alto potencial de secuestro de C arbóreo aéreo. Todos los compartimentos se diferenciaron en sus contenidos de C, N y Ca ($p \leq 0.05$) entre TS, excepto en los contenidos de C en la estructura arbórea, necromasa y hojarasca. El TS corta de regeneración genera 69.3% de nitrógeno en el compartimento humus, en relación al resto de los tratamientos. El TS tercer aclareo generó 20.2% más de calcio en el suelo, en relación con el testigo. Los TS afectan la disponibilidad de nutrientes ya que rodales que llegan a su fase final de cosecha recuperan en tres años su existencia de nutrientes.

AGRADECIMIENTOS

A CONAHCYT por la beca de posgrado otorgada, a Victor Miguel Bravo y Anne Yarbrough Bravo por los permisos otorgados para entrar a su propiedad.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Avendaño Hernández D Ma, Acosta-Mireles M, Carrillo-Anzures F, Etchevers-Barra JD (2009) Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. Revista Fitotecnia Mexicana 32(3): 233-238. <https://doi.org/10.35196/rfm.2009.3.233>
- Bautista-Cruz J, Sierra Y, Bermeo JF (2022) Emisiones de gases de efecto invernadero en las instituciones de educación superior. Producción + Limpia 17(1):169-186. <https://doi.org/10.22507/pml.v17n1a10>
- Béjar-Pulido SJ, Cantú-Silva I, González-Rodríguez H, Marmolejo-Moncivais JG, Yáñez-Díaz MI, Luna-Robles EO (2021) Effect of land use change and agricultural management on physical and hydrological properties of an Andosol in Uruapan, Michoacán. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 27(2): 323-335. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.04.032>
- Caballero-Cruz P, Treviño-Garza EJ, Mata-Balderas JM, Alanís-Rodríguez E, Yerena-Yamallel JI, Cuéllar-Rodríguez LG (2022) Análisis de la estructura y diversidad arbórea de bosques templados en la

- ladera oriental del volcán Iztaccíhuatl, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 13(71): 76-102. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1253>
- Carvajal-Agudelo BN, Andrade HJ (2020) Captura de carbono en biomasa de sistemas de uso del suelo, municipio de Yopal, Casanare. Colombia. *Orinoquia* 24(1): 13-22. <https://doi.org/10.22579/20112629.587>
- Charmakar S, Oli-Nath B, Joshi-Raj N, Maraseni-Narayan T, Atreya K (2021) Forest carbon storage and species richness in FSC Certified and non-certified community forests in Nepal. *Small-scale Forestry* 20: 199-219. <https://doi.org/10.1007/s11842-020-09464-3>
- Chávez-Pascual EY, Rodríguez-Ortiz G, Enríquez-del Valle JR, Velasco-Velasco V, Gómez-Cárdenas M (2017) Compartimentos 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>
- Cocotle RL, Ramírez MS, Hernández BC (2022) Impacto en la calidad del suelo mediada por el cambio de uso en el Cofre de Perote, México. *Revista de la Alta Tecnología y Sociedad* 14(1): 1-8.
- Cortés-Pérez M, De León-González F, Paz-Pellat F, Leyva-Pablo T, Santiago-García W, Ponce-Mendoza A, Fuentes-Ponce M (2021) Almacenamiento de carbono aéreo en un bosque templado de Oaxaca: Manejo de alta y baja intensidad. *Madera y Bosques* 27(4): e2742440. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742440>
- Cruz-Sánchez Y, López-Teloxa LC, Gómez-Díaz JD, Monterroso-Rivas AI (2022) Respiración de CO₂ desde el suelo en bosques templados del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, centro de México. *Bosque* 43(2): 125-133. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002022000200125>
- Espinoza-Zúñiga P, Leos-Rodríguez JA, Rodríguez-Ortiz G, Martínez-Cruz AL, Montiel-Batalla BM, 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>
- Esquivel-Valenzuela B, Cueto-Wong JA, Cruz-Gaistardo CO, Guerrero-Peña A, Jarquín-Sánchez A, Burgos-Córdova D (2018) Carbono orgánico y nitrógeno total en suelos forestales de México mediante espectroscopia VIS-NIR. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(47): 295-313. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.158>
- Flores-Morales EA, Aguirre-Calderón OA, Treviño-Garza EJ, González-Tagle MA, Alanís-Rodríguez E, Ángeles-Pérez G, Huizar-Amezcuca F (2022) Diversidad y estructura arbórea de un bosque templado bajo manejo en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango, México. *Polibotánica* 54: 11-26. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.54.2>
- Galicia L, Gamboa-Cáceres AM, 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): 1-29.
- Hernández-Vera D, Pompa-García M, Yarena-Yamallel JI, Alanís-Rodríguez E (2017) Within-tree carbon concentration variation in three Mexican pine species. *Bosque* 38(2): 381-386. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002017000200015>
- IPCC (2013) Cambio climático: bases físicas. Contribución del grupo de trabajo I al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Intergovernmental Panel on Climate Change. Ginebra, Suiza. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf. Fecha de consulta: 10 de junio 2023.
- Kjeldahl, J. (1883) A new method for the determination of nitrogen in organic matter. *Zeitschrift für Analytische Chemie* 22: 366-382. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01338151>.
- Kurz WA, Birdsey R, Mascorro V, Greenberg D, Dai Z, Olguín M, Colditz R (2016) Modelización y evaluación integradas de la dinámica del carbono forestal en América del Norte: herramientas para monitorear,

- registrar en informes y proyectar emisiones y remociones de gases de efecto invernadero en el sector forestal. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal. 24p.
- Ledesma SG, Sione SMJ, Ozsust JD, Rosenberger LJ (2021) Estimación del contenido y captura potencial de carbono en la biomasa arbórea de bosques nativos del Espinal (Entre Ríos, Argentina). *Fave. Sección Ciencias Agrarias* 20(1): 331-345.
- Leyva-Pablo T, León-González F, Etchevers-Barra JD, Cortés-Pérez M, Santiago-García W, Ponce-Mendoza A, Fuentes-Ponce MH (2021) Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal comunitario. *Madera y Bosques* 27(spe): e2742421. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742421>
- López-Escobar NF, Gómez-Guerrero A, Velázquez-Martínez A, Fierros-González AM, Castruita-Esparza LU, Vera-Castillo JAG (2018) Reservorios y dinámica de nutrientes en dos rodales bajo aprovechamiento de *Pinus montezumae* Lamb. en Tlaxcala, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 24(1): 115-129. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.09.055>
- López-López JD, Méndez-González J, Nájera-Luna JA, Cerano-Paredes J, Flores-Flores JD, Nájera-Castro JA (2013) Producción de hojarasca en *Pinus halepensis* Mill. y *Pinus cembroides* Zucc. y su relación con algunos factores climáticos. *Agrociencia* 47(5): 497-510.
- Manzanilla-Quijada GE, Treviño-Garza EJ, Aguirre-Calderón OA, Alanís-Rodríguez E, Yerena-Yamallel JJ, Mata-Balderas JM (2022) Dinámica del crecimiento en bosques templados del sur de Nuevo León, México. *Madera y Bosques* 28(1): e2812324. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812324>
- Martínez-Soto RA, Cantú-Silva I, Yáñez-Díaz MI, González-Rodríguez H, Béjar-Pulido SJ (2023) Reservorio de carbono y nitrógeno en un suelo Cambisol bajo dos usos de suelo en Linares, Nuevo León, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 14(79): 4-30. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i79.1339>
- Mercado-García A, Molina-Rodríguez CB (2021) América Central en el mercado de emisiones: Una evaluación multicriterio de proyectos del mecanismo de desarrollo limpio. *Problemas del Desarrollo* 52(204): 35-58. <https://doi.org/10.22201/iiiec.20078951e.2021.204.69648>
- Moreno-Gómez T, Hernández-Pérez A, Sandoval-Rangel A, Robledo-Torres V, Mendoza-Villarreal R, González-Fuentes JA (2021) Interacción entre calcio y boro en el crecimiento y contenido mineral de plantas de pimiento morrón. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 8(3): e2813. <https://doi.org/10.19136/era.a8n3.2813>.
- Morales-Inocente MA, Nájera-Luna JA, Escobedo-Bretado MA, Cruz-Cobos F, Hernández FJ, y Vargas-Larreta LB (2020) Carbono retenido en biomasa y suelo en bosques de El Salto, Durango, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes* 28: 5-13. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2020802997>
- Morfin R, Michel JE, González FJM, Carrillo MR, Rangel OL, Orozco OJ, Rodríguez AG, Guerrero PG (2015) Estimación de las reservas de carbono en la biomasa forestal en México. Comisión Nacional Forestal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Jalisco, México. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/35/6917Anexo%208.pdf>. Fecha de consulta: 23 de marzo 2023.
- Nahed-Toral J, Valdivieso-Pérez A, Aguilar-Jiménez R, Cámara-Cordova J, Grande-Cano D (2013) Sistemas silvopastoriles con manejo tradicional en el sureste de México: un prototipo de agroforestería ganadera para una producción más limpia. *Journal of Cleaner Production* 57: 266-279. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.020>
- Pan Y, Birdsey R, Fang J, Houghton R, Kauppi P, Kurz W, Phillips O, Shvidenko, A, Lewis S, Canadell J, Ciais P, Jackson R, Pacala S, McGuire A, 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>
- Pérez-Hernández J F, Razo-Zárate R, Rodríguez-Laguna R, Capulin-Grande G, Árcega-Santillán I, Manzur-Chávez N (2023) Efecto del manejo forestal en las características físico-hidrológicas del suelo en un

- bosque de clima templado. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 14(80): 54-79. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i80.1388>.
- Pompa-García, M, Sigala J, Jurado E, Flores J (2017) Tissue carbon concentration of 175 Mexican forest species. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 10(4): 754-758. <https://doi.org/10.3832/ifor2421-010>
- Quijada GEM, Balderas JMM, Garza EJT, Calderón ÓAA, Rodríguez EA, Yamallel JIY (2020) Diversidad, estructura y composición florística de bosques templados del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11: 95-123 <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i61.703>
- Ramírez-Santiago R, Ángeles-Pérez G, Hernández-de La Rosa P, Cetina-Alcalá VM, Escalante OP, Clark-Tapia R (2019) Efectos del aprovechamiento forestal en la estructura, diversidad y dinámica de rodales mixtos en la Sierra Juárez de Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 25(3): e2531818. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531818>
- Raj-Aryal D, Gómez-Castro H, Carmen-García N, José-Ruiz OJ, Molina-Paniagua LF, Jiménez-Trujillo JA, Venegas-Venegas JA, Pinto-Ruiz R, Ley-de Coss A, Guevara-Hernández F (2018) Potencial de almacenamiento de carbono en áreas forestales en un sistema ganadero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(48): 150-180. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.184>
- Rahman A, Mostofa MG, Nahar K, Hasanuzzaman M, Fujita M (2016) Exogenous calcium alleviates cadmium-induced oxidative stress in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by regulating the antioxidant defense and glyoxalase systems: calcium-induced cadmium stress tolerance in rice. *Revista Brasileira de Botânica* 39: 393-407. <https://doi.org/10.1007/s40415-015-0240-0>
- Regil-García HH, Franco-Maass S, Endara-Agramont AR, Flamenco-Sandova AF, Espinoza-Maya A, Calderón-Contreras R, Pérez-Vega BA (2020) Procesos de pérdida y recuperación del contenido de carbono en biomasa aérea en las zonas forestales del área de protección de flora y fauna Nevado de Toluca en el periodo 2000-2013. *Revista Geográfica de América Central* 64: 181-211. <https://dx.doi.org/10.15359/rgac.64-1.8>
- Ruiz-Nápoles P, Castañeda-León J, Moreno-Reyes E (2023) Emisión de gases de efecto invernadero en la economía mexicana y políticas de mitigación, 2020-2030. *El Trimestre Económico* 90(358): 531-551. <https://doi.org/10.20430/ete.v90i358.1662>
- SAS (2022) *The SAS System for Windows User's guide release 9.4*. SAS Institute. Cary North Carolina, USA. 35p.
- Sivisaca DCL, Herrera BGP, Mendoza ZHA (2018) Modelos alométricos para estimar el almacenamiento de carbono de bosques montanos bajos en el sur del Ecuador. *Ciência Florestal* 28(3):1328-1339. <https://doi.org/10.5902/1980509833464>
- Sosa-Rodriguez BA, Sánchez-de-Prager M, García-Vivas YS, Espinoza-Guardiola MD, Rodríguez JA, Sosa-Rodríguez GM (2019) Dinámica de nitrógeno del suelo en agroecosistemas bajo el efecto de abonos verdes. *Acta Agronómica* 68(4): 257-264. <https://doi.org/10.15446/acag.v68n4.71963>
- Souza DV, Ferrari LS, Coutinho VM, Santos JX, Péllico N, Sanquetta CR, Dalla CAP (2021) Diameter structure, spatial pattern, and management scenarios of Acapu trees: A Case Study. *Floresta e Ambiente* 28(1): e20190023. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2019-0023>
- Vargas-Larreta B, Amezcua-Rojas M, López-Martínez JO, Cueto-Wong JA, Cruz-Cobos F, Nájera-Luna JA (2023) Estimación de los almacenes de carbono orgánico en el suelo en tres tipos de bosque templado en Durango, México. *Botanical Sciences* 101(1): 90-101. <https://doi.org/10.17129/botsci.3094>
- Vargas-Larreta B, Corral-Rivas JJ, Aguirre-Calderón OA, López-Martínez JO, Santos-Posadas HM, Zamudio-Sánchez FJ, Treviño-Garza EJ, Martínez-Salvador M, Aguirre-Calderón CG (2017) SiBiFor: Sistema Biométrico Forestal para el manejo de los bosques de México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente* 23(3): 437-455. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>
- Walkley AJ, Black IA (1934) Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.