

CARBONO EN LA HOJARASCA REINCORPORADA AL PISO FORESTAL EN RODALES BAJO MANEJO EN OAXACA

CARBON IN LITTERFALL REINCORPORATED INTO THE FOREST FLOOR IN MANAGED STANDS IN OAXACA^a

Ambrosio-Lazo, A.;^{1*} Rodríguez-Ortiz, G.¹; Santiago-García, W.²

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Ex Hacienda de Nazareno, C.P. 71233, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.

²Universidad de la Sierra Juárez, Instituto de Estudios Ambientales, Cam. a la Universidad, C. P. 68725, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México.

*Autor para correspondencia: ashmir26@gmail.com

Fecha de envío: 30, mayo, 2025

Fecha de publicación: 10, diciembre, 2025

Resumen:

El aprovechamiento maderable modifica los montos de biomasa (B) en la hojarasca que se reincorpora al piso forestal (desfronde), esto conlleva un cambio en el retorno, almacenamiento y disponibilidad de nutrientes en el suelo; en especial el contenido de carbono (C); por ello, es importante analizar esta caída de hojarasca de acuerdo a cada tratamiento silvícola (TS) aplicado. El objetivo fue analizar las tasas de incorporación anual de C contenido en la hojarasca, al piso forestal en áreas bajo diferentes TS, en el sur de Oaxaca. En 2022 se establecieron de forma selectiva 12 sitios en cuatro tratamientos, tres TS: 1er aclareo (A1), aclareo libre (AL), corta de regeneración (CR) y un área sin manejo (ASM). Se realizó inventario arbóreo y se establecieron trampas de captura de desfronde estacional, bajo un diseño factorial 4×4 (TS, estación del año); los TS se diferenciaron mediante un modelo lineal generalizado y comparación de medias (*Duncan, 0.05*). En los TS no se observaron diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$) en los montos de B y C en desfronde; sin embargo, en el factor estacionalidad y su interacción con los TS se mostraron valores diferentes ($p \leq 0.05$), como es el caso del primer aclareo en la estación de invierno que generó los mayores montos (4.65 t B ha^{-1} y 2.18 t C ha^{-1}). Por otro lado, las estaciones de verano y otoño generaron las mismas cantidades de B y C en todos los tratamientos silvícolas, lo que indica un cambio de gradiente al acabar el otoño. En un estudio de C es importante incluir los compartimentos del bosque y el desfronde estacional, para magnificar las tasas de incorporación al piso forestal de rodales con intervención silvícola.

Palabras clave: Estacionalidad, nutrientes, piso forestal, tratamiento silvícola.

^a Tesis de Maestría en Ciencias en Productividad en Agroecosistemas.

Abstract:

Timber harvesting modifies the amount of biomass (B) in the litter that is reincorporated into the forest floor (deforestation). This leads to changes in the return, storage, and availability of nutrients in the soil, especially carbon (C) content. Therefore, it is important to analyze this litterfall according to each silvicultural treatment (ST) applied. The objective was to analyze the annual incorporation rates of C contained in litter into the forest floor in areas under different ST in southern Oaxaca. In 2022, 12 sites were selectively established in four treatments, three TS: first thinning (A1), free thinning (AL), regeneration felling (CR), and an unmanaged area (ASM). A tree inventory was conducted, and seasonal defoliation capture traps were set up using a 4x4 factorial design (TS, season); the TS were differentiated using a generalized linear model and comparison of means (*Duncan*, 0.05). No statistically significant differences ($p > 0.05$) were observed in the amounts of B and C in defoliation in the TS. However, different values ($p \leq 0.05$) were observed for the seasonality factor and its interaction with the TS, as is the case with the first thinning in the winter season, which generated the highest amounts (4.65 t B ha^{-1} and 2.18 t C ha^{-1}). On the other hand, the summer and autumn seasons generated the same amounts of B and C in all silvicultural treatments, indicating a change in the gradient at the end of autumn. In a C study, it is important to include forest compartments and seasonal deforestation to magnify the rates of incorporation into the forest floor of stands with silvicultural intervention.

Keywords: Seasonality, nutrients, forest floor, silvicultural treatment.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el cambio climático derivado de los gases de efecto invernadero (GEI), genera una preocupación a nivel global, y abre campo hacia la búsqueda de soluciones para la mitigación de dichos gases, en particular el CO₂. Una de las soluciones se encuentra es la captura de CO₂ por parte de los bosques, por ello, es necesario comprender mejor cuanto contribuyen los bosques bajo manejo maderable y conservación al ciclo global del carbono (C) y al control de GEI (Jiménez-Pérez et al., 2018; Köhl et al., 2015). Los cambios en la estructura forestal de un bosque por la aplicación de tratamientos silvícolas (TS), no solo modifican el contenido de C arbóreo, sino también el C almacenado en los compartimentos secundarios del bosque; un caso particular sucede con las tasas de incorporación al piso forestal (Chávez-Pascual et al., 2017; Miranda-Verly et al., 2023; Zaninovich & Gatti, 2020).

La caída de esta hojarasca (desfronde) es un sistema de retorno de nutrientes, es una fuente importante de materia orgánica, almacenamiento de nutrientes y energía para el suelo; su descomposición desempeña un papel importante en el mantenimiento de la fertilidad del suelo en los ecosistemas forestales (Paudel et al.,

2015). Por otro lado, la caída de hojarasca varía de acuerdo a cada tipo de ecosistema, manejo aplicado, clima, edad, composición de las especies, estructura del rodal, pendiente, tipo de suelo, exposición y altitud (You et al., 2017; Zhou et al., 2016), así como variantes climáticas, incluyendo los cambios actuales derivados del cambio climático (Martínez-Yrízar et al., 2018; Rowland et al., 2018).

Los ecosistemas forestales tienen un alto potencial para la captura de carbono, por ello, cuantificar su contenido en áreas bajo manejo ayuda a conocer mejor la dinámica del bosque y a conocer el efecto de los TS aplicados, para poder tomar mejores decisiones. Conocer los montos de carbono en la caída de hojarasca en un bosque es esencial para conocer su dinámica y comportamiento de forma específica y compleja, y de esta forma poder evaluar la productividad forestal y tomar decisiones optimas en el manejo forestal (González-Rodríguez et al., 2019; Paudel et al., 2015).

Evaluar los contenidos de carbono incluyendo la hojarasca, proporciona información viable para vincularse al mercado de bonos de C (Herold et al., 2011), brindando un servicio ambiental a la sociedad; ya que en los últimos 50 años los ecosistemas terrestres han solventado aproximadamente una tercera parte de las emisiones de carbono (Ballantyne et al., 2012).

Es importante evaluar la biomasa y carbono del material vegetal que se incorpora al piso forestal (desfronde) ya que juega un papel importante en el flujo de nutrientes al suelo; además de poder entender mejor la variación del carbono almacenado en el piso y suelo forestal (González-Rodríguez et al., 2018; López-Hernández et al., 2022); por ello, el objetivo fue evaluar el efecto de los tratamientos silvícolas sobre los contenidos de carbono en la hojarasca que se incorpora al piso forestal de forma estacional, en el bosque de pino-encino de San Juan Lachao, Oaxaca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó en una superficie de 3201 ha del bosque bajo manejo forestal maderable en San Juan Lachao, Juquila, Oaxaca, México. En las coordenadas: 16° 09' 30.26" LN y -97° 07' 28.04" LO (Figura 1) con altitud promedio de 1900 m. Donde predomina el clima cálido subhumedo (Cw) (Sistema Köppen-

García), la temperatura promedio anual es de 22° C y la precipitación de 2500 mm. La comunidad de San Juan Lachao realiza manejo forestal maderable a través del Método de Desarrollo Silvícola (MDS). 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).

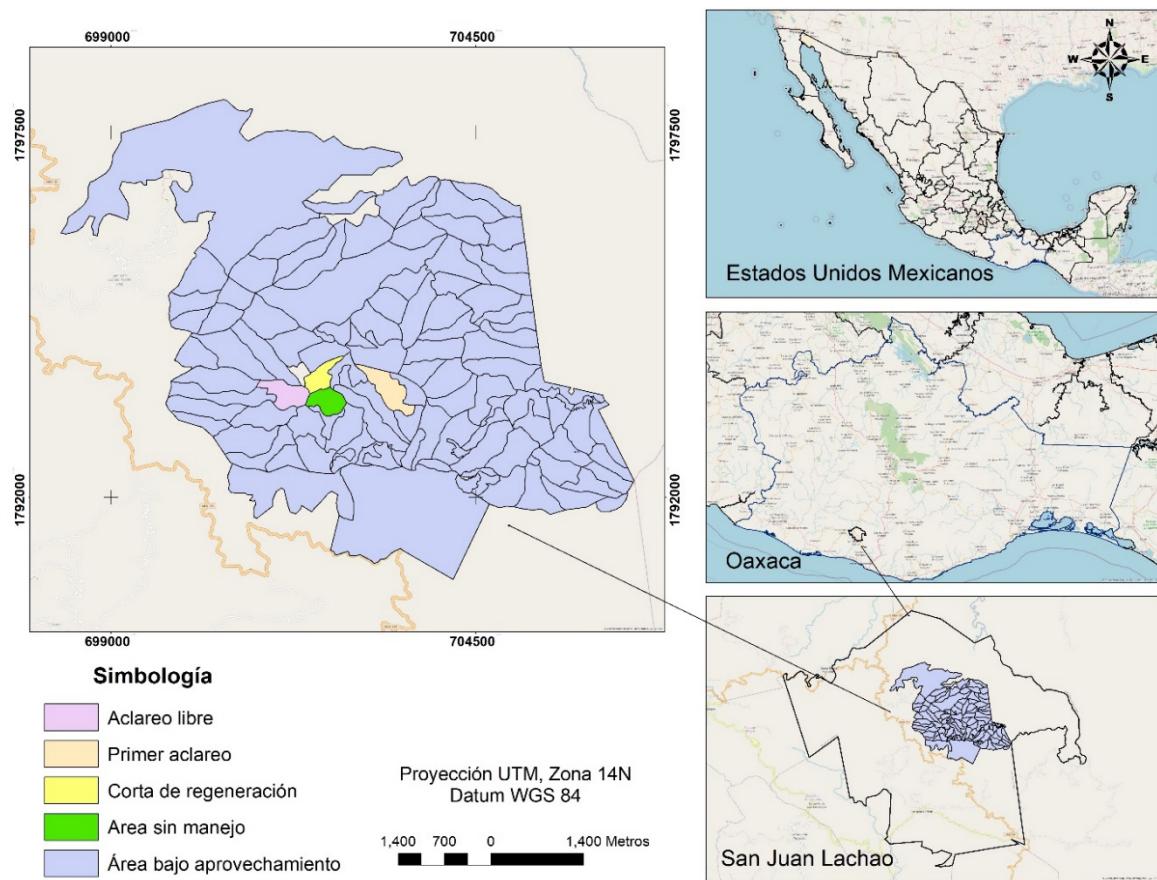


Figura 1. Área de estudio, en donde se aplicaron los tratamientos silvícolas.

Figure 1. Study area, where silvicultural treatments were applied.

Establecimiento de los sitios de muestreo

En el año 2022 se establecieron de manera dirigida 12 sitios circulares (compuestos por cuatro cuadrantes) de 400 m² con compensación por pendiente, en rodales aprovechados durante el periodo 2013-2014. Se evaluaron cuatro tratamientos silvícolas (TS): aclareo libre (AL), primer aclareo (A1), corta de regeneración bajo el

método de árboles padres (CR) y un área sin manejo (ASM). Las unidades experimentales o sitios (UE) se establecieron bajo diseño completamente aleatorio (DCA) con tres repeticiones.

Las UE se geo-posicionaron con la ayuda de un GPS (global positioning system) (Garmin eTrex 30, USA®) MAPS 6. En todos los sitios se realizó el inventario arbóreo, contemplando individuos con diámetro normal (DN, cm) > 7.5 cm, medido con cinta diamétrica (Hartmann ®, 283D); además de altura total (AT, m) obtenida con clinómetro (Haglöf ®, EC II D-HS115) y diámetro de copa (DC, m) con cinta métrica (Truper ® TP50ME).

Para evaluar el C incorporado al piso forestal mediante la caída del material vegetal (desfronde); se realizó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial de 4×4 (TS; estacionalidad: primavera, verano, otoño e invierno). Se colocaron cuatro trampas/UE (una por cuadrante). Las trampas midieron 0.725 m de diámetro y 0.413 m², fabricadas de alambrón y malla. El desfronde se recolectó durante un año cada fin de estación, cual se pesó en una báscula de precisión (Dhaus®, CS 5000, 5000±2 g) para obtener su peso fresco (PF, g).

Manejo y análisis de datos

Las muestras se analizaron en el laboratorio de Agroecosistemas del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Se introdujeron en una estufa de secado (Memmert®, 100-800) a 72°C, hasta llegar a peso constante y posteriormente su peso seco (PS, g). Para calcular la biomasa total (B) contenida en el desfronde se utilizó el factor de conversión (FC), que se calcula usando el cociente entre el peso seco y peso fresco, expresado en porcentaje (Rodríguez-Ortiz et al., 2019). Las muestras se molieron y mezclaron por separado, hasta obtener una mezcla homogénea; posteriormente se obtuvo su % de carbono, a través del contenido de materia orgánica, bajo el método Walkey y Black establecido en la NOM-021-RENAC (Semarnat, 2000).

La B (kg) de desfronde de cada área muestreada se obtuvo mediante el producto PV (kg)×FC; los datos de biomasa se infirieron por superficie (t ha⁻¹) y mediante el producto con el contenido de carbono (%) se generaron los montos de C por hectárea.

A las variables B ($t \text{ ha}^{-1}$) y C ($t \text{ ha}^{-1}$) se les aplicó prueba de normalidad de Shapiro Will y homogeneidad de varianzas de Bartlett ($\alpha = 0.05$); algunas variables se transformaron para el cumplimiento de los supuestos. Se realizó análisis de varianza (ANOVA) con el procedimiento Proc GLM y prueba de medias (Duncan, 0.05) para diferenciar TS. Al C contenido en el desfronde se le aplicó análisis ortogonales para desenmascarar diferencias entre TS; todos los análisis fueron realizados en el programa SAS (Statistical Analysis System) (SAS Institute Inc, 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En respuesta a los tratamientos silvícolas(TS), no existió significancia en la acumulación del desfronde ($p > 0.05$); por otro lado, en el desfronde estacional y en la interacción TS×estación se encontraron montos diferenciados ($p \leq 0.01$) en las variables analizadas; esto indica que la estacionalidad es un factor importante para evaluar de forma más precisa el efecto de los TS sobre los montos de biomasa y C en desfronde (Cuadro 1).

Cuadro 1. Resumen de análisis de varianza del efecto de los tratamientos silvícolas sobre el desfronde estacional de hojarasca.

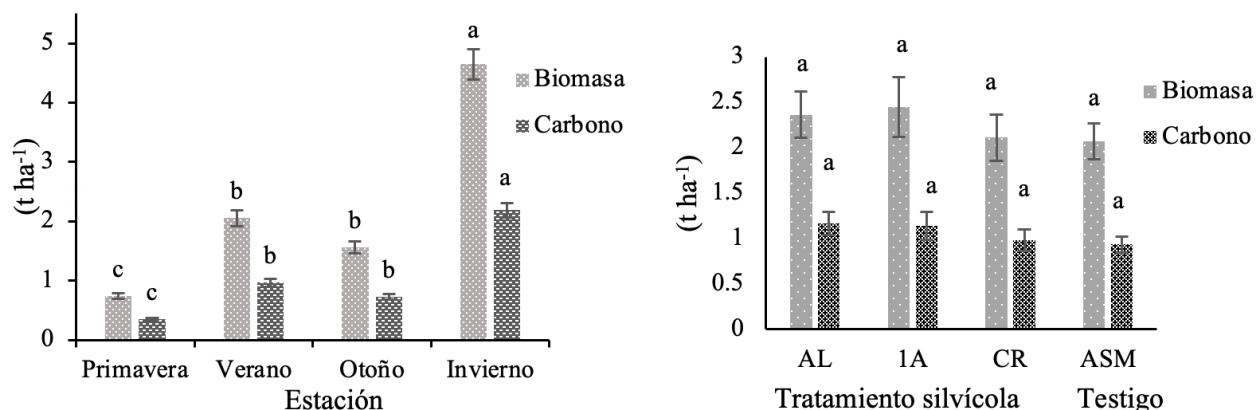
Table 1. Summary of analysis of variance of the effect of silvicultural treatments on seasonal litter shedding.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios	
		Biomasa [†]	Carbono ^{††}
Tratamiento silvícola (TS)	3	0.01 ^{ns}	0.03 ^{ns}
Estacionalidad	3	2.64 ^{**}	2.24 ^{**}
TS×estacionalidad	9	0.04 ^{**}	0.03 ^{**}
Error	176	0.01	0.01
Total	191		

^{ns} =no significativo ($p > 0.05$), ^{**}= altamente significativo ($p < 0.01$). Datos transformados [†] \sqrt{x} , ^{††} $\ln \sqrt{x}$.

En los TS se observó mayor heterogeneidad en los montos de biomasa acumulada en el desfronde (figura 2a); por otro lado, la estacionalidad generó montos diferenciados en ambas variables, mostrando mayor acumulación en

invierno ($p < 0.01$), mientras que la acumulación del material vegetal en verano y otoño ($p > 0.05$) fueron iguales, lo que indica un cambio de gradiente al finalizar el otoño (figura 2b). Con respecto a esto, la estacionalidad es un factor importante al evaluar de forma más precisa el efecto de los TS sobre los montos de C y B en desfronde (López-Hernández et al., 2022; Pérez-Alavez et al., 2021). Es necesario hacer uso de la interacción (TS×estacionalidad) para que se reflejen estas diferencias entre los TS y el área sin manejo (ASM).



CR = corta de regeneración (árboles padres), A1 = primer aclareo, AL = aclareo libre, ASM = área sin manejo. Letras distintas sobre las barras por variable presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05). Las barras verticales representan el error estándar.

Figura 2. Biomasa (a) y carbono (b) acumulado en el desfronde, estacional y por tratamiento silvícola.

Figure 2. Biomass (a) and carbon (b) accumulated in litterfall, seasonal and by silvicultural treatment.

Cuadro 2. Efecto de los tratamientos silvícolas sobre el desfronde estacional de hojarasca al piso forestal

Table 2. Effect of silvicultural treatments on seasonal litterfall shedding to the forest floor

Tratamiento	Biomasa ($t\ ha^{-1}$)	Carbono ($t\ ha^{-1}$)
A1-Invierno	5.37±0.66 ^a	2.51±0.31 ^a
AL-Invierno	4.84±0.41 ^a	2.39±0.20 ^{ab}
CR-Invierno	4.48±0.52 ^a	2.08±0.24 ^{ab}
ASM-Invierno	3.91±0.36 ^{ab}	1.77±0.16 ^{bc}
1A-Verano	2.55±0.39 ^{bc}	1.19±0.18 ^{cd}
AL-Verano	2.16±0.24 ^{cd}	1.07±0.12 ^{cde}
ASM-Verano	1.83±0.17 ^{cde}	0.83±0.08 ^{def}
ASM-Otoño	1.83±0.13 ^{cde}	0.83±0.06 ^{def}

AL-Otoño	1.70 ± 0.21^{cde}	0.84 ± 0.10^{def}
CR-Verano	1.67 ± 0.22^{cde}	0.78 ± 0.10^{def}
CR-Otoño	1.42 ± 0.24^{cde}	0.66 ± 0.11^{def}
1A-Otoño	1.28 ± 0.20^{cde}	0.60 ± 0.09^{def}
CR-Primavera	0.88 ± 0.07^{de}	0.41 ± 0.03^{ef}
AL-Primavera	0.77 ± 0.08^{de}	0.38 ± 0.04^{ef}
ASM-Primavera	0.71 ± 0.13^{de}	0.32 ± 0.06^f
1A-Primavera	0.59 ± 0.07^e	0.28 ± 0.03^f

AL=aclareo libre, 1A=primer aclareo, CR = corta de regeneración (árboles padres), ASM = área sin manejo (conservación). Los datos con letras distintas en columnas presentan diferencias estadísticas significativas (Duncan, 0.05), Media ± error estándar.

Las áreas con aclareos (AL y A1) tuvieron el mayor contenido de B (2.41 t ha^{-1}) y C (1.16 t ha^{-1}) en desfronde (Figura 2), esto puede deberse a que las áreas bajo aclareos se componen de árboles jóvenes (10-20 años), los cuales tienden a tirar más hojarasca que los árboles maduros (áreas con ASM y CR), debido a que están en una fase de crecimiento más activa y necesitan una gran cantidad de nutrientes, los cuales se obtienen de las hojas viejas (acelerando su muerte) (García-Osorio et al., 2020; López-Hernández et al., 2018). Aunque también hay que contemplar la composición de especies y densidad residual después de cada TS aplicado.

El área con aplicación A1 en invierno fue el tratamiento con mayor acumulación de C de desfronde (2.51 t ha^{-1}) siendo 684 % y 796 % superior al ASM en primavera (0.32 t ha^{-1}) y A1 en primavera (0.28 t ha^{-1}), respectivamente (cuadro 2); esto es debido a que en los meses de invierno la fotosíntesis se reduce o se detiene por la falta de luz solar, por ello al caer las hojas, el árbol reduce su superficie expuesta y disminuye la pérdida de energía y agua, además de evitar la congelación (González-Rodríguez et al., 2019; Hernández-Ramos et al., 2022).

En el material vegetal que se incorpora al piso forestal, el bosque de pino-encino de acumula anualmente en promedio (suma de estacionalidades) $9.002 \text{ t B ha}^{-1}$ y $4.2314 \text{ t C ha}^{-1}$, debido a la composición de especies; representando montos elevados en comparación de lo que presentan. Estos montos fueron mayores a los reportados por Hernández-Merino et al. (2022) en un bosque de pino-encino del norte de México, con una caída anual de B en hojarasca de 5.92 t ha^{-1} ; también al reportado por Bravo-Oviedo et al. (2013) en un bosque *P. pinaster* Ait.

en España, donde la contribución anual de C de la hojarasca fue de 0.499 t ha^{-1} ; y a los reportados por Navarro et al. (2013) en rodales de pino carrasco (*P. halepensis* Mill.) bajo TS en la región mediterránea, con promedio anual de 0.95 t C ha^{-1} .

En los rodales evaluados se encontró la mayor caída de hojarasca principalmente en invierno: 4.65 t C ha^{-1} y 2.18 t C ha^{-1} (Figura 2), esto debido a la reducción de luz solar, las bajas temperaturas y la falta de agua disponible. Estos resultados se alinean bien con estudios de caída de hojarasca en el noreste de México, donde en un bosque pino-encino se presentaron cambios estacionales similares (González-Rodríguez et al., 2011). Caso contrario al de Pérez-Alavez et al. (2021) quienes encontraron mayores contenidos de B y C en otoño 0.314 t ha^{-1} y 0.03 t ha^{-1} , respectivamente; aunque esto depende del manejo, factores fisiográficos y del actual cambio climático. Además, los resultados de este estudio pueden complementarse con los hallazgos de Pérez-Alavez et al. (2025), quienes reportan que el 36% del carbono aéreo en el estrato arbustivo se concentra en el segundo aclareo, influido por factores de sitio como exposición y altitud.

En los contrastes ortogonales realizados en este estudio, en invierno se muestran diferencias estadísticas en la B y el C de desfronde en los TS (AL, CR y 1A) vs. ASM ($p < 0.01$). Lo que indica que cuando se aplican TS, el desfronde tiende a ser mayor, debido a factores como la densidad residual, área de copa y edad (Bueis et al., 2017). Por otro lado, en primavera, verano y otoño no mostraron diferencias estadísticas significativas entre los TS vs. ASM ($p < 0.01$), lo que indica que no hay efecto negativo de los TS en estos períodos (cuadro 2).

CONCLUSIÓN

En los rodales bajo manejo forestal maderable de San Juan Lachao se encontró la mayor caída de hojarasca en invierno (4.65 t B ha^{-1} y 2.18 t C ha^{-1}), esto debido a la reducción de luz solar, las bajas temperaturas y la falta de agua disponible. Por otro lado, cada área bajo diferente tratamiento silvícola (TS) se comporta de forma diferente de acuerdo a la edad, composición de especies y factores climáticos; conocer esto es importante para tener un panorama más complejo en respuesta de los TS. Para analizar el desfronde, la estacionalidad es un factor importante ya que

brinda información de forma más compleja y factible; y así poder tomar decisiones más estructuradas sobre la aplicación de tratamientos silvícolas y los posteriores tratamientos complementarios en áreas bajo manejo. Por otro lado, evaluar el C en desfronde es importante para conocer la dinámica de carbono de forma más compleja y poder acceder al mercado voluntario con mayores herramientas.

LITERATURA CITADA

- Ballantyne, A. P., Alden, C. B., Miller, J. B., Tans, P. P., & White, J. W. C. (2012). Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. *Nature*, 488, 70–72. <https://doi.org/10.1038/nature11299>
- Bravo-Oviedo, A., del Rio, M., Montero, G., & Rubio-Cuadrado, Á. (2013). Sexto congreso forestal español: Desfronde y tasa de descomposición foliar en rebollar-pinar de repoblación con distinto grado de clara. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*. <https://www.researchgate.net/publication/287890135>
- Bueis, T., Bravo, F., Pando, V., & Turrión, M. B. (2017). Influencia de la densidad del arbolado sobre el desfronde y su reciclado en pinares de repoblación del norte de España. *Bosque*, 38(2), 401–407. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000200017>
- 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 Bosques*, 23(3), 147–161. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331627>
- García-Osorio, M. T., Plascencia-Escalante, F. O., Ángeles-Pérez, G., Montoya-Reyes, F., & Beltrán-Rodríguez, L. (2020). Producción y tasa de descomposición de hojarasca en áreas bajo rehabilitación en El Porvenir, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 26(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632099>
- González-Rodríguez, H., Domínguez-Gómez, T. G., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M. V., Ramírez-Lozano, R. G., Pando-Moreno, M., & Fernández, C. J. (2011). Litterfall deposition and leaf litter nutrient return in different locations at Northeastern Mexico. *Plant Ecology*, 212(10), 1747–1757. <https://doi.org/10.1007/s11258-011-9952-9>
- González-Rodríguez, H., López-Hernández, J. M., Ramírez-Lozano, R. G., Gómez-Meza, M. V., Cantú-Silva, I., Sarquis-Ramírez, J. I., & Mora Olivo, A. (2019). Depósito de hojarasca y retorno de nutrientes en bosques y matorrales de pino-encino del noreste de México. *Madera y Bosques*, 25(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531514>
- González-Rodríguez, H., Ramírez-Lozano, R. G., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M. V., Estrada-Castillón, E., & Arévalo, J. R. (2018). Deposition of litter and nutrients in leaves and twigs in different plant communities of northeastern Mexico. *Journal of Forestry Research*, 29(5), 1307–1314. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0553-x>
- Hernández Ramos, J., Reyes-Hernández, V. J., & Beltrán-Rodríguez, L. (2022). La copa como indicador fotosintético relevante en el manejo forestal de bosques templados.

Hernández-Merino, V., Manzanares-Miranda, N., Cantú-Silva, I., López-Hernández, J. M., & González-Rodríguez, H. (2022). Caída de hojarasca y depósito de nutrientes en tres ecosistemas forestales del noreste de México. *E-CUCBA*, 10(19), 97–104. <https://doi.org/10.32870/ecucba.vi19.268>

Herold, M., Román-Cuesta, R. M., Mollicone, D., Hirata, Y., Van Laake, P., Asner, G. P., Souza, C., Skutsch, M., Avitabile, V., & MacDicken, K. (2011). Options for monitoring and estimating historical carbon emissions from forest degradation in the context of REDD+. *Carbon Balance and Management*, 6(1), 13. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-6-13>

Institute SAS. (2017). Base SAS 9.4 procedures guide: statistical procedures.

Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., & Yerena-Yamallel, J. I. (2018). Concentración de carbono en especies del bosque de pino-encino en la sierra madre oriental. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), 50–61. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i17.420>

Köhl, M., Lasco, R., Cifuentes, M., Jonsson, Ö., Korhonen, K. T., Mundhenk, P., Navar, J. de J., & Stinson, G. (2015). Changes in forest production, biomass and carbon: Results from the 2015 UN FAO Global Forest Resource Assessment. *Forest Ecology and Management*, 352, 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.036>

López-Hernández, J. M., Corral-Rivas, J. J., González-Rodríguez, H., Domínguez-Gómez, T. G., Gómez-Meza, M. V., & Cantú-Silva, I. (2018). Depósito y descomposición de hojarasca de Pinus cooperi C.E.Blanco en El Salto, Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.249>

López-Hernández, J. M., González-Rodríguez, H., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M. V., Estrada-Castillón, A. E., Contreras-Guajardo, N. L., & Del Valle-Arango, J. I. (2022). Caída de hojarasca y retorno de nutrientes en diferentes comunidades vegetales del Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(1). <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.2891>

Martínez-Yrízar, A., Jaramillo, V. J., Maass, M., Bürquez, A., Parker, G., Álvarez-Yépez, J. C., Araiza, S., Verduzco, A., & Sarukhán, J. (2018). Resilience of tropical dry forest productivity to two hurricanes of different intensity in western Mexico. *Forest Ecology and Management*, 426, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.024>

Miranda-Verly, O., Vieira-Leite, R., Tavares-Junior, I. da S., Silva-Soares da Rocha, S. J., Garcia-Leite, H., Marinaldo-Gleriani, J., Xavier-Rufino, M. P. M., de Fatima-Silva, V., Eletto-Torres, C. M. M., Plata-Rueda, A., Monteiro de Castro e Castro, B., Cola-Zanuncio, J., & Antônio Gonçalves Javocine, L. (2023). Atlantic forest woody carbon stock estimation for different successional stages using Sentinel-2 data. *Ecological Indicators*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109870>

Navarro, F. B., Romero-Freire, A., Del Castillo, T., Foronda, A., Jiménez, M. N., Ripoll, M. A., Sánchez-Miranda, A., Huntsinger, L., & Fernández-Ondoño, E. (2013). Effects of thinning on litterfall were found after years in a *Pinus halepensis* afforestation area

- at tree and stand levels. *Forest Ecology and Management*, 289(2), 354–362. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.026>
- Paudel, E., Dossa, G. G. O., Xu, J., & Harrison, R. D. (2015). Litterfall and nutrient return along a disturbance gradient in a tropical montane forest. *Forest Ecology and Management*, 353, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.028>
- Pérez-Alavez, Y., Rodríguez-Ortiz, G., Santiago-García, W., Campos-Angeles, G. V., Enríquez-del Valle, J. R., & Martin, M. P. (2021). Effect of Thinning Intensity on Litterfall Biomass and Nutrient Deposition in a Naturally Regenerated *Pinus Pseudostrobus* Lind. Forest in Oaxaca, Mexico. *Journal of Sustainable Forestry*, 42(1), 77–94. <https://doi.org/10.1080/10549811.2021.1946410>
- Pérez-Alavez, Y., Rodríguez-Ortiz, G., Campos-Angeles, G. V., & Lozano-Trejo, S. (2025). Carbono aéreo en el estrato arbustivo de rodales bajo manejo forestal maderable. *Revista Ciencia e Innovación Agroalimentaria de la Universidad de Guanajuato*, 6, 68-76.
- 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>
- Rowland, L., da Costa, A. C. L., Oliveira, A. A. R., Almeida, S. S., Ferreira, L. V., Malhi, Y., Metcalfe, D. B., Mencuccini, M., Grace, J., & Meir, P. (2018). Shock and stabilisation following long-term drought in tropical forest from 15 years of litterfall dynamics. *Journal of Ecology*, 106(4), 1673–1682. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12931>
- 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.
- You, C., Wu, F., Yang, W., Tan, B., Yue, K., & Ni, X. (2017). The National Key Forestry Ecology Project has changed the zonal pattern of forest litter production in China. *Forest Ecology and Management*, 399, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.05.019>
- Zaninovich, S. C., & Gatti, M. G. (2020). Carbon stock densities of semi-deciduous Atlantic forest and pine plantations in Argentina. *Science of The Total Environment*, 747, 141085. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141085>
- Zhou, J., Lang, X., Du, B., Zhang, H., Liu, H., Zhang, Y., & Shang, L. (2016). Litterfall and nutrient return in moist evergreen broad-leaved primary forest and mixed subtropical secondary deciduous broad-leaved forest in China. *European Journal of Forest Research*, 135(1), 77–86. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0918-7>