

Caída de hojarasca y retorno de nutrientes en diferentes comunidades vegetales del Noreste de México

Litterfall and nutrient return in different plant communities of Northeastern Mexico

Juan M. López-Hernández¹ 
Humberto González-Rodríguez^{2*} 
Israel Cantú-Silva² 
Marco V. Gómez-Meza³ 
Andrés E. Estrada-Castillón² 
Norma L. Contreras-Guajardo²
Jorge I. del Valle-Arango⁴

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Agronomía y Veterinaria, Carretera San Luis Potosí-Matehuala Km. 14.5. Ejido Palma de la Cruz. CP. 78321. Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P., México.

²Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Carretera Nacional, No. 85, km 145. CP. 67700. Linares, Nuevo León, México.

³Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Economía. Avenida Lázaro Cárdenas 4600 Ote. Fracc. Residencial Las Torres. CP. 64930. Monterrey, Nuevo León, México.

⁴Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agrarias, Carrera 65 Bloque 14, oficina 310. Medellín, Colombia.

*Autor de correspondencia:
humberto.gonzalezrd@uanl.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 25 de febrero 2021

Aceptado: 23 de febrero 2022

Como citar: López-Hernández JM, González-Rodríguez H, Cantú-Silva I, Gómez-Meza MV, Estrada-Castillón AE, Contreras-Guajardo NL, del Valle-Arango JI (2022) Caída de hojarasca y retorno de nutrientes en diferentes comunidades vegetales del Noreste de México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 9(1): e2891. DOI: 10.19136/era.a9n1.2891

RESUMEN. La hojarasca que se acumula sobre el piso forestal y su posterior descomposición juegan un papel importante en el mantenimiento de la productividad de los diferentes ecosistemas terrestres al constituir el principal flujo de nutrientes al suelo. El objetivo del estudio fue evaluar la producción de hojarasca y retorno de nutrientes a través de la caída de la hojarasca y la eficiencia en el uso de macro-nutrientes. El estudio se realizó en los sitios de Linares, Crucitas y Los Ramones, en el Estado de Nuevo León, México. El promedio de caída de hojarasca fue de 5 800, 5 270 a 6 596 kg ha⁻¹ año⁻¹ para Linares, Crucitas y Los Ramones, respectivamente. El retorno total de nutrientes siguió la secuencia: Linares > Crucitas > Los Ramones con valores de 135, 122 y 101 kg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. A pesar de que el retorno de P en la hojarasca fue menor, la eficiencia del uso de este nutriente fue mayor que la presentada por el Ca, Mg ó K. La mayor eficiencia de uso de nutrientes en términos de Ca y Mg se observó en Los Ramones, el K en Crucitas y el P en linares. Existe variación espacial y temporal en la producción de hojarasca, retorno de nutrientes y la eficiencia en su uso entre los sitios evaluados. Por tanto, la caída de hojarasca, retorno de nutrientes y uso eficiente en estos sitios dependen de la riqueza de especies, diferencias edáficas, calidad de la hojarasca y fenología de las diferentes especies.

Palabras clave: Eficiencia, hojarasca, matorral, nutrientes.

ABSTRACT. The litterfall that accumulates in the forest soil and its further decomposition play an important roll in the maintenance of productivity in different terrestrial ecosystems since its constitute the main flow of nutrients to the soil. The objective of this study was to evaluate the production of litterfall, its nutrient return thru litterfall deposition and macro-nutrient use efficiency. The study was conducted in Linares, Crucitas and Los Ramones, state of Nuevo León, México. Average litterfall deposition was 5 800, 5 270 and 6 596 kg ha⁻¹ year⁻¹ for Linares, Crucitas and Los Ramones, respectively. Total nutrient return thru litterfall followed the sequence: Linares > Crucitas > Los Ramones, with value of 135, 122 and 101 kg ha⁻¹ year⁻¹, respectively. Even though the return of P thru litterfall was the lowest, P nutrient use efficiency was higher with respect to Ca, Mg and K. Greatest nutrient use efficiency in terms of Ca and Mg was observed in Los Ramones, K in Crucitas and P in Linares. The results showed that there exist spatial and temporal variation in the production of litterfall, nutrient return and nutrient use efficiency between studied sites. Thus, litterfall deposition, nutrient return and nutrient use efficiency between sites depend on stand composition and richness, edaphic properties, litterfall quality, and plant phenology.

Key words: Efficiency, litterfall, nutrients, thornscrub.

INTRODUCCIÓN

En el noreste de México, la hojarasca de la vegetación del matorral espinoso tamaulipeco está compuesta por las hojas, ramas, estructuras reproductivas y componentes diversos (González-Rodríguez *et al.* 2011, González-Rodríguez *et al.* 2019). La media anual de 5 600 kg ha⁻¹ de hojarasca producida en la región, puede ser una alternativa de alimento para los pequeños rumiantes, en los períodos secos y durante la escasez de forraje (Domínguez-Gómez *et al.* 2011, González-Rodríguez *et al.* 2019).

La caída de esta hojarasca actúa como un sistema de entrada y salida de nutrientes, es una fuente importante de materia orgánica y energía para el suelo, y su descomposición desempeña un papel importante en el mantenimiento de la fertilidad del suelo en los ecosistemas forestales (Wang *et al.* 2008, Paudel *et al.* 2015). No obstante, la caída de hojarasca varía entre ecosistemas forestales, dependiendo del clima, edad, composición de las especies, estructura del rodal, altitud y latitud, fertilidad del suelo, pendiente del terreno, exposición solar y disponibilidad de agua (Tang *et al.* 2010, Zhou *et al.* 2016, You *et al.* 2017), así como de eventos climáticos extremos (Martínez-Yrizar *et al.* 2018, Rowland *et al.* 2018). Además, la producción y calidad de la hojarasca es de vital importancia en la formación y mantenimiento de la fertilidad del suelo (Ge *et al.* 2013, León y Osorio 2014), ya que, mediante la descomposición de la materia orgánica aportada por la caída de la hojarasca, los árboles absorben más del 90% del nitrógeno y fósforo (Chapin *et al.* 2002).

Además de la caída de hojarasca, existen procesos de fuertes implicaciones en la dinámica de nutrientes, caso de la reabsorción de nutrientes foliares, que conduce a una mayor eficiencia en su uso. Según Chuyong *et al.* (2000) y Hagen-Thorn *et al.* (2006), la retranslocación o reabsorción es un proceso fisiológico mediante el cual las plantas movilizan los nutrientes de las hojas senescentes hacia otros tejidos recientes de la planta; se realiza con la finalidad de maximizar su uso cuando estos son escasos en el suelo evitando así su pérdida. Por

lo tanto, se considera a la retranslocación como un mecanismo eficaz para la conservación de nutrientes por aparte del árbol y es característico en un gran número de especies, siendo la retranslocación en árboles de el matorral espinoso tamaulipeco poco eficientes en relación a lo observado en bosques templados (González-Rodríguez *et al.* 2018, González-Rodríguez *et al.* 2019). Por lo que, la eficiencia del uso de nutrientes (EUN) [(kg de hojarasca ha⁻¹) / (kg nutrientes en la hojarasca ha⁻¹)], se puede utilizar como un índice de eficiencia de los nutrientes (N, P, K, Ca y Mg) aportados al suelo, principalmente vía hojarasca. La cual es definida como la biomasa total producida por la planta por unidad de nutrientes absorbidos (Gourley *et al.* 1994).

El Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET), está constituido, en su gran mayoría, por especies caducifolias que pierden sus hojas en períodos de sequía y algunas perennifolias (López-Hernández *et al.* 2013). Se distingue por tener una amplia diversidad de especies, intensa dinámica de crecimiento, variedad en su desarrollo fenológico y longevidad foliar (González-Rodríguez *et al.* 2011). Debido a su valor ecológico, se han realizados estudios sobre reciclaje de nutrientes contenidos en las hojas (González-Rodríguez *et al.* 2011, López-Hernández *et al.* 2015) y otros componentes secundarios de la hojarasca (Cantú-Silva *et al.* 2013). Pero no se ha documentado la producción y aporte de nutrientes de la hojarasca total en este tipo de ecosistema. Bajo la premisa anterior, el objetivo del presente estudio fue cuantificar la producción de hojarasca, depósito de nutrientes por la caída de la hojarasca, y la eficiencia en el uso de los macronutrientes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo de mayo de 2017 a abril 2018 en tres sitios sin disturbios antropogénicos aparentes, en el estado de Nuevo León, México. El Sitio 1, Linares, se localiza en la Campus Experimental de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en el municipio de Linares, Nuevo León; con ubicación

geográfica es 24° 46' LN; 99° 31' LO; con altitud de 370 msnm. La vegetación predominante es el Matorral Espinoso Tamaulipeco. El Sitio 2, Crucitas, se localiza en el Ejido Las Crucitas, en el municipio de Linares, Nuevo León; con ubicación geográfica es 24° 46' LN; 99° 41' LO; con una altitud de 550 msnm. La vegetación se compone de la transición del Bosque de Pino-Encino y el Matorral Alto Subinermé. El Sitio 3, Los Ramones, se localiza en el Rancho El Abuelo, en el municipio de Los Ramones, Nuevo León. La ubicación geográfica es 24° 45' LN; 99° 27' LO, con elevación de 200 msnm. La vegetación predominante es el Matorral Espinoso Tamaulipeco. Los suelos dominantes para los sitios Linares y Crucitas, son Vertisoles de color gris oscuro, limo-arcillosos, con Montmorillonita. En tanto, en el sitio Los Ramones, los tipos de suelo son Castañozem y Chernozem (INEGI 1986). El monitoreo de la precipitación y del clima (temperatura, humedad relativa del aire), se realizó con estaciones meteorológicas automáticas (Davis y HOBO Familia H8), instaladas en cada uno de los sitios de estudio (Tabla 1).

Colecta de hojarasca

Para la recolección de la hojarasca en cada sitio de estudio, se dispusieron 10 canastas o colectores de 1.0 m², consistentes en un marco de madera cuyo fondo se cubrió con malla plástica fina de 1.0 mm de apertura y ubicadas al azar en un área de aproximadamente 2 500 m². Todas las canastas se colocaron a 50 cm sobre el nivel del suelo. Para evitar subestimar el peso de la hojarasca y minimizar su pérdida durante el experimento, la colecta de hojarasca en cada sitio de estudio se realizó cada 15 días desde mayo de 2017 hasta abril de 2018; pero las dos recolectas de cada mes se mezclaron.

Análisis de laboratorio

La hojarasca fue colectada en bolsas de papel previamente etiquetadas con el número de colector y sitio de estudio. Luego se secaron en una estufa de aire forzado (Felisa, modelo FE-292AD) a 70 °C durante 72 h, para cuantificar posteriormente el peso seco (g m⁻²) depositado con una balanza digital (Sartorius, modelo Laboratory LC 620 S). Sumando todos

los muestreos realizados, por repetición, mes y sitio de estudio, se determinó el depósito anual (kg ha⁻¹ año⁻¹). Luego se molió la hojarasca en un molino Thomas Willey (Thomas Scientific Apparatus, Modelo 3383) usando una malla del número 60 (1 mm x 1 mm). El material molido se recolectó en bolsas tipo ziploc previamente etiquetadas para su análisis químico.

Determinación de minerales

La preparación de extractos para determinar macro- (Ca, K, Mg y P) y micro-nutrientes (Cu, Fe, Mn y Zn) en la hojarasca se realizó de acuerdo con las técnicas analíticas de digestión descritas en AOAC (2012). De cada canasta (repetición) proveniente de cada sitio y mes de colecta, se usó 1.0 g para determinar la concentración de minerales. Primero, se incineraron en una mufla (Felisa, modelo FE-340) a 550 °C durante 3.5 h. Las cenizas obtenidas fueron digeridas en una solución de HCl (10%, v/v) y HNO₃ (0.1%, v/v) utilizando la técnica de digestión húmeda (Cherney 2000). Las concentraciones de Ca (óxido nitroso/llama de acetileno), K, Mg, Cu, Mn, Fe y Zn (aire/llama de acetileno) se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica mediante un espectrofotómetro marca Perkin Elmer, modelo PINAACLE 900F, mientras que el P se cuantificó por el método de colorimetría utilizando un espectrofotómetro UV-Visible (Perkin-Elmer, modelo Lambda 1A) a 880 nm (AOAC 2012). El depósito de minerales se cuantificó multiplicando la producción de la hojarasca (g m⁻²) por la concentración de cada mineral (mg g⁻¹ peso seco), expresando los valores en mg del elemento m⁻². Los valores mensuales acumulados en cada sitio se utilizan como una estimación del depósito anual de minerales. El depósito anual de Ca, K, Mg y P se utilizó para determinar en cada sitio la eficiencia en el uso de nutrientes (EUN).

Análisis estadísticos

Para determinar si existen diferencias significativas en la producción de la hojarasca, así como la de nutrientes de la hojarasca entre los sitios de estudio para cada mes de muestreo, los datos fueron sometidos a pruebas estadísticas de distribución nor-

Tabla 1. Temperatura (°C) y humedad relativa (%) media mensual y precipitación mensual (mm) registrada durante el periodo del estudio (2017-2018).

Mes	Sitios								
	Linares			Crucitas			Los Ramones		
	(°C)	(%)	(mm)	(°C)	(%)	(mm)	(°C)	(%)	(mm)
Mayo-2017	26.2	74.9	124.6	24.5	74.4	97.8	27.2	67.6	64.0
Junio	27.7	70.4	112.4	26.3	71.5	129.0	29.9	60.0	94.3
Julio	27.1	73.7	15.6	25.3	76.1	129.5	29.4	63.3	54.0
Agosto	28.1	68.8	51.0	26.1	73.3	42.4	30.4	58.2	2.0
Septiembre	26.0	75.6	65.2	23.9	80.3	116.8	27.5	71.0	195.5
Octubre	22.3	87.3	88.2	20.7	85.4	154.1	23.8	76.2	92.5
Noviembre	20.0	85.8	3.2	17.1	85.9	4.6	20.4	78.1	13.5
Diciembre	13.9	88.1	16.6	12.4	90.1	30.0	13.7	85.8	15.5
Enero-2018	12.0	87.2	28.4	10.2	87.5	45.5	12.2	78.6	8.6
Febrero	19.7	80.5	14.0	17.9	85.4	16.3	18.5	78.6	18.5
Marzo	21.6	66.1	3.2	19.8	66.7	0.8	22.2	61.9	11.2
Abril	21.9	80.0	50.0	20.3	86.1	160.3	22.9	71.7	33.8
			572.4			927.1			603.4

mal y homogeneidad de varianzas (Steel y Torrie 1980). Los resultados demostraron que la mayoría de los datos no cumplieron los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y de homogeneidad de varianzas (prueba de Levene), por lo que se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis (Ott 1993) para detectar diferencias significativas entre los sitios en cada fecha de muestreo. Asimismo, se realizó un análisis de correlación de Spearman, para determinar el grado de asociación entre la producción de hojarasca y depósito de nutrientes en los sitios de estudio con las variables ambientales. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa SPSS versión 17.0 para Windows.

RESULTADOS

Producción de hojarasca

La caída anual de la hojarasca varió de 6 596 a 5 270 kg ha⁻¹ año⁻¹ para los sitios de Crucitas y Los Ramones, respectivamente (Tabla 2). El sitio de Crucitas promedió 20% más que el sitio de Los Ramones (Tabla 2). No se encontró diferencias significativas entre los tres sitios de estudio para la caída anual de la hojarasca ($p > 0.05$). La dinámica mensual de la caída de hojarasca durante el período de estudio mostró diferencias estadísticas entre los sitios en algunos meses como lo demuestran los análisis estadísticos indicados en la Figura 1. La mayor dinámica de producción de hojarasca se presentó en

Crucitas, seguido de Linares y Los Ramones. En Crucitas, las mayores contribuciones se presentaron en enero y marzo. En tanto, en Linares los mayores depósitos se registraron en agosto y enero. Mientras que, en Los Ramones los mayores aportes se presentaron en julio y agosto; sin embargo, este sitio presentó también la menor producción de hojarasca durante los meses de noviembre a febrero. Aunque no se observó una caída concentrada de la hojarasca en una determinada estación del año, la caída de la hojarasca ocurrió durante todo el periodo de investigación (Figura 1). Por otra parte, no se detectaron correlaciones significativas ($p > 0.05$) entre las variables ambientales y los patrones de producción de hojarasca (Tabla 3).

Retorno de nutrientes vía hojarasca

El retorno potencial de los macro-nutrientes (Figura 2a-d) fue significativamente diferente entre los sitios de estudio en la mayoría de los meses. El retorno mensual de Ca (Figura 2a) en Linares varió de 0.11 a 0.33 g m⁻²; Crucitas de 0.08 a 0.32; y en Los Ramones de 0.07 a 0.24 g m⁻². El retorno de Mg (Figura 2b) para Linares varió de 0.10 a 0.30 g m⁻²; Crucitas de 0.10 a 0.28; y para Los Ramones de 0.06 a 0.34. Como tendencia estacional general, Linares, Crucitas y Los Ramones adquirieron un retorno promedio mensual de K de 0.75, 0.67 y 0.78 g m⁻², respectivamente, durante el período experimental (Figura 2c). El retorno promedio mensual de P en

Tabla 2. Producción anual de hojarasca, depósito de nutrientes y su uso eficiente de los macrominerales. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los sitios se muestra en la columna derecha.

Depósito Anual	Sitios de Estudio			Estadístico	
	Linares	Crucitas	Los Ramones	χ^2	p
Hojarasca (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	5 800.8	6 596.4	5 270.3	4.421	.110
Macro-nutrientes (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)					
Ca	21.6	23.8	15.6	12.612	.002
Mg	21.2	20.6	14.4	4.668	.097
K	88.0	72.6	66.5	2.480	.289
P	3.9	5.4	4.5	7.001	.030
Total	134.7	122.4	101.0		
Micro-nutrientes (g ha ⁻¹ año ⁻¹)					
Cu	36.3	35.8	31.4	2.805	.246
Mn	203.3	234.0	191.1	1.556	.459
Fe	642.5	629.5	633.7	0.209	.901
Zn	114.0	128.8	102.1	2.372	.305
Total	996.1	1028.1	958.3		
Eficiencia de uso de nutrientes (EUN)					
Ca	268.9	277.2	337.3	19.192	<.001
Mg	274.2	320.8	366.1	2.253	.324
K	65.9	90.8	79.3	5.530	.063
P	1 492.0	1 214.0	1 181.5	11.868	.003

La eficiencia de uso de nutrientes de la hojarasca (EUN) se calculó como (kg de hojarasca ha⁻¹ año⁻¹) / (kg de nutrientes de la hojarasca ha⁻¹ año⁻¹).

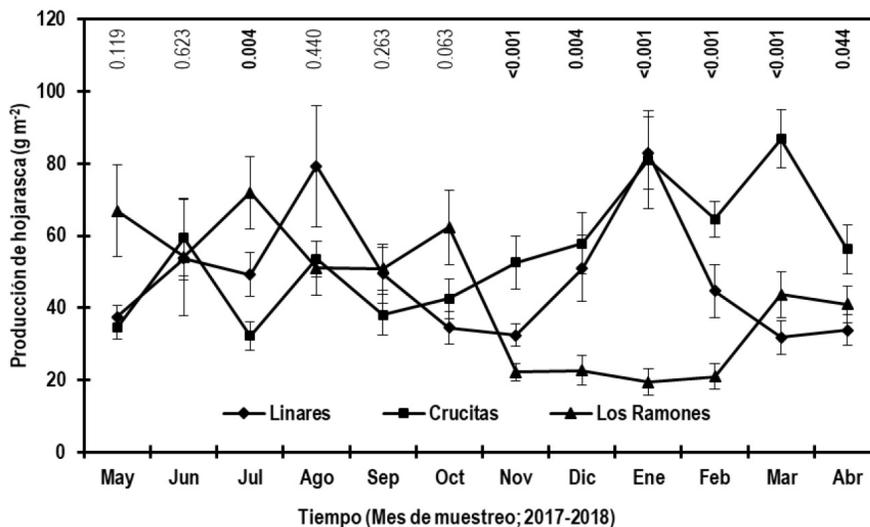


Figura 1. Producción de hojarasca en los tres sitios de estudio. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los sitios, se muestra en cada mes de muestreo dentro de la gráfica. Cada valor graficado representa la media (n = 10) ± error estándar.

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Spearman (n = 10) y valor p, para determinar el grado de asociación entre la producción de hojarasca con el depósito de nutriente y algunas variables ambientales.

Estadístico	Nutrientes								Variables ambientales		
	Ca	Mg	K	P	Cu	Mn	Fe	Zn	T °C	HR	pp
rho	.898***	.799***	.758***	.846***	.868***	.794***	.846***	.840***	.091 ^{NS}	-.073 ^{NS}	.072 ^{NS}
Valor p	<.001	<.001	<.001	<.001	<.001	<.001	<.001	<.001	.085	.170	.171

*** La correlación es significativa al nivel .001; NS La correlación no es significativa (p > .05)

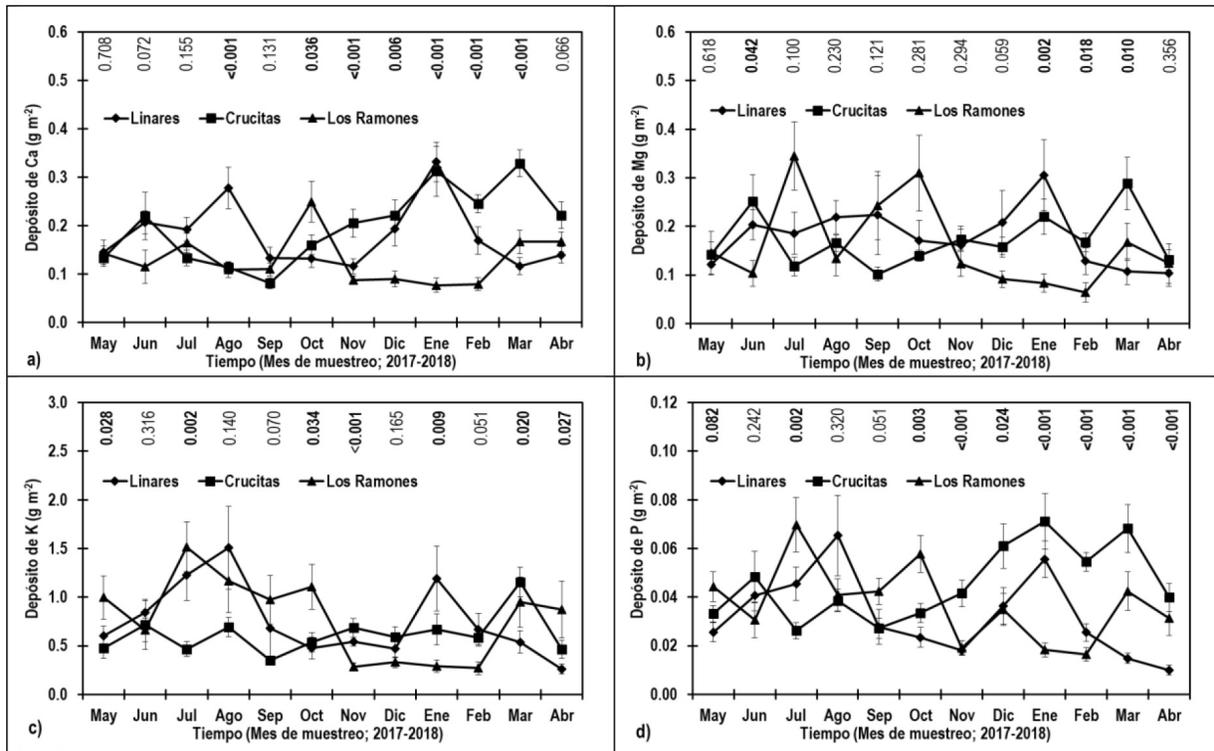


Figura 2. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de Ca (a), Mg (b), K (c) y P (d) en la hojarasca para los sitios de estudio. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre sitios se ilustra en cada mes de muestreo dentro de la gráfica.

la hojarasca en Linares, Crucitas y Los Ramones fue de 0.3, 0.4 y 0.3 g m⁻², respectivamente (Figura 2d). Independientemente del elemento, los retornos medios de los macro-nutrientes mostraron un patrón mensual marcado con picos mayores en los meses de julio, agosto, octubre, enero y marzo, lo cual corresponde a los mayores aportes de la hojarasca, siendo el sitio de Los Ramones el que presentó los mayores picos mensuales de los macro-nutrientes estudiados.

En cuanto al retorno anual de macro-nutrientes, los valores más altos se presentaron en Linares y los más bajos en Los Ramones, excepto en el caso de Ca y P que fueron mayores en Crucitas (Tabla 2). El mayor retorno de nutriente a partir de la hojarasca fue para el K; seguido por Ca y Mg, registrándose los valores más bajos en Los Ramones. En tanto que, el nutriente limitante fue el P. El retorno anual de Ca al suelo a través de la hojarasca en los tres sitios fue de 15.6 a 23.8 kg ha⁻¹ año⁻¹;

el Mg de 14.4 a 21.2 kg ha⁻¹ año⁻¹; para K, el rango fue de 66.5 a 88.0; y para P de 3.9 a 5.4 kg ha⁻¹ año⁻¹. La producción anual total de macro-nutrientes (Ca + Mg + K + P) fue de 134.7, 122.4 y 101.0 kg ha⁻¹ año⁻¹ para Linares, Crucitas y Los Ramones, respectivamente. En los tres sitios, la abundancia relativa de nutrientes en la hojarasca fue K > Ca > Mg > P.

Con respecto a los micro-nutrientes (Fe, Cu, Mn y Zn), siguió la misma tendencia que los macro-nutrientes. Más de la mitad de los meses analizados presentaron diferencias significativas entre los sitios de estudio (Figura 3a-d). En general, en julio, agosto, octubre y enero, cuando se registró la mayor cantidad de hojarasca (Figura 1), la producción de todos los micro-nutrientes fue mayor que en otros meses, siendo mayores en Los Ramones; sin embargo, este sitio presentó también los menores aportes en los meses de diciembre a marzo. El aporte potencial anual de Cu fue de 36.3, 35.8 y 31.4 g ha⁻¹ año⁻¹; para Mn fue de 203.3, 234.0 y 191.1; para

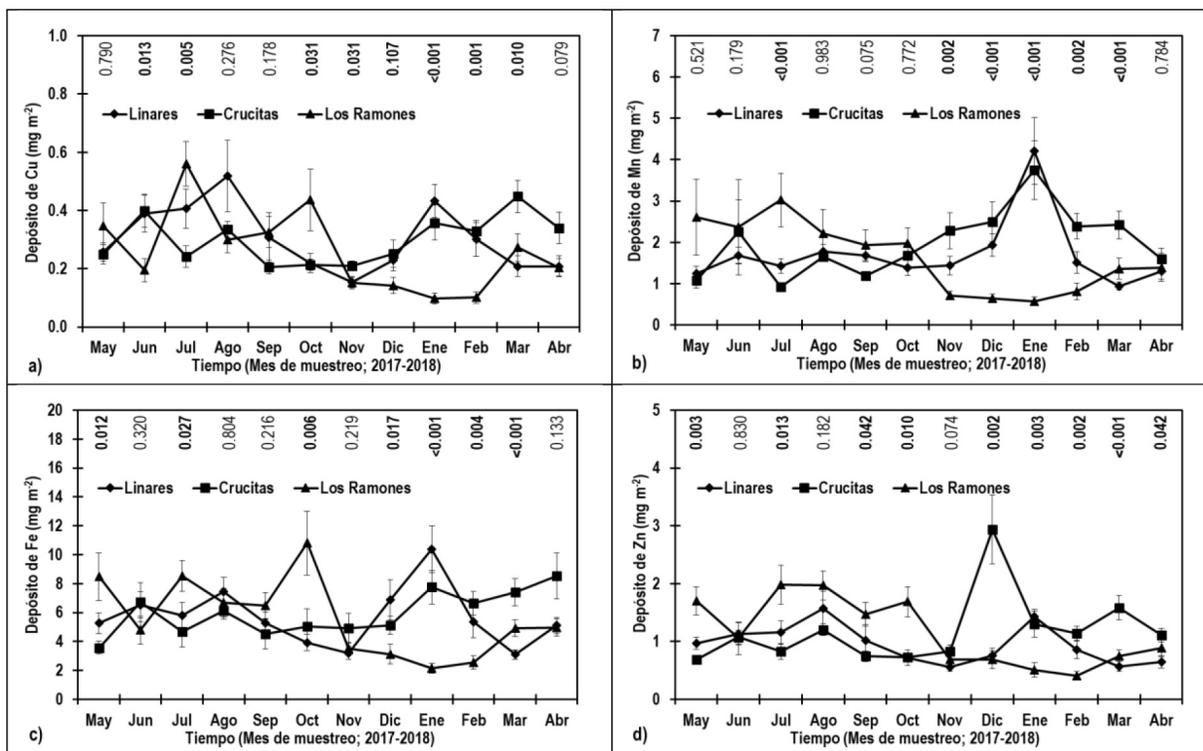


Figura 3. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de Cu (a), Mn (b), Fe (c) y Zn (d) en la hojarasca para los sitios de estudio. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre sitios se ilustra en cada mes de muestreo dentro de la gráfica.

Fe de 642.5, 629.5 y 633.7 y para Zn, fue de 114.0, 128.8 y 102.1, para los sitios de Linares, Crucitas y Los Ramones, respectivamente. Independientemente del sitio, la producción potencial anual de micro-nutrientes fue: Fe > Mn > Zn > Cu (Tabla 2). La producción anual total (Cu + Mn + Fe + Zn) fue de 996.1, 1 028.1 y 958.3 g ha⁻¹ año⁻¹ para Linares, Crucitas y Los Ramones, respectivamente.

No se encontró efecto estadísticamente significativo de correlación de las variables climáticas sobre el retorno de nutrientes vía hojarasca. En términos generales, para el conjunto de elementos estudiados, los resultados de la correlación para los tres sitios, mostraron un patrón relativamente similar en el retorno de nutrientes con respecto a la cantidad de hojarasca (Tabla 3), evidenciando cierta dependencia de ella.

Eficiencia en el uso de nutrientes (EUN)

Las respuestas de la EUN en cada sitio de es-

tudio siguieron el orden descendente: P > Mg > Ca > K (Tabla 2). Pero no se observó diferencia significativa en la EUN de Mg y K entre los tres sitios de estudio, mientras que la EUN de los otros elementos (Ca y P) fue significativamente diferente entre los sitios de estudio ($p < 0.05$). La mayor eficiencia en el uso de nutrientes la presentó el fósforo por ser el elemento limitante en los tres sitios de estudio. Mientras que el potasio tuvo la mayor eficiencia de uso.

DISCUSIÓN

Producción de hojarasca

La producción de hojarasca fue consistente con los hallazgos reportados para esta comunidad vegetal por González-Rodríguez *et al.* (2011) y López-Hernández *et al.* (2015), quienes reportan caídas de 4 080 a 7 397 kg ha⁻¹ año⁻¹. También coincide con lo reportado para diversos ecosistemas forestales en donde se documentan valores de 3

040 a 14 830 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Paudel *et al.* 2015, Zhou *et al.* 2016, Zhu *et al.* 2019). Pero cantidades menores (3 570, 1 574 y 595 kg ha⁻¹ año⁻¹) fueron reportadas por Martínez-Yrizar *et al.* (1999) en tres comunidades del desierto de Sonora en el norte de México. Mientras que, en el matorral desértico micrófilo se estimaron producciones de 1 417 a 3 904 kg ha⁻¹ año⁻¹ (González-Rodríguez *et al.* 2013). Las diferencias en la caída de la hojarasca entre los sitios Linares y Los Ramones podría estar relacionada con la arquitectura de la copa de los árboles y con el desprendimiento continuo de hojas de especies deciduas; característica distintiva en especies del matorral espinoso tamaulipeco, mecanismo adaptativo para hacer frente a los déficits hídricos y altas temperaturas para evitar la deshidratación del tejido y pérdida de agua a través de la transpiración (González-Rodríguez *et al.* 2004, López-Hernández *et al.* 2010). Por el contrario, la caída de la hojarasca observada en Crucitas podría estar influenciada por un dosel más denso, lo cual pudo haber aumentado la cantidad de hojarasca producida bajo la cubierta forestal. Aunque es probable también que la caída de la hojarasca dependa del desarrollo y edad del rodal, especialmente durante la fase de rápido crecimiento de los árboles (Trap *et al.* 2011). No obstante, la temperatura y la precipitación son los principales factores que controlan la producción de la hojarasca (Liang *et al.* 2015, You *et al.* 2017, Zhu *et al.* 2019). En este sentido, Martínez-Alonso *et al.* (2007) indican que el aumento de la temperatura y los períodos de sequía, pueden influir en la dinámica de la productividad en los ecosistemas cálidos y templados. En contraste con lo reportado por estos autores, en el presente estudio no se encontró correlación entre las variables ambientales y la caída de hojarasca (Tabla 3). Lo que se puede deber a que la caída de la hojarasca está relacionada con la morfología y fisiología de las hojas de las especies presentes en los sitios de estudio.

Retorno de nutriente vía hojarasca

Los retornos anuales de los macro-nutrientes al suelo a través de la hojarasca fueron ligeramente mayores en Linares que en Crucitas y Los Ramones, como resultado de una mayor calidad y depósitos de

nutrientes en la hojarasca. El rendimiento anual de Ca, Mg, K y P, en los tres sitios siguió el siguiente orden: K > Ca > Mg > P. Este orden no es consistente con los resultados reportados para otros ecosistemas forestales donde se ha encontrado que la abundancia relativa de nutrientes es Ca > K > Mg > P (Hansen *et al.* 2009, González-Rodríguez *et al.* 2018, Zhu *et al.* 2019). Lo cual indica que, el alto contenido de K encontrado puede deberse a que la hojarasca colectada en los sitios de estudio en su mayoría estaba compuesta por hojas jóvenes, ya que durante esta etapa de desarrollo las hojas pueden llegar a contener altos niveles de K (60%) en comparación con otros órganos de la planta. Esta caída temprana de las hojas evita que este elemento pueda ser translocado hacia otra parte de las plantas y pueda ser utilizado para otras funciones en la misma. Otro factor puede ser un exceso de este elemento, pero es muy difícil que las plantas lleguen a presentar síntomas por exceso de potasio, pero en caso de que los presenten, algunos de los síntomas que se pueden observar son: deficiencias de otros nutrientes como el magnesio o el calcio.

Los retornos de Ca en la hojarasca se ubicaron por debajo del intervalo reportado por López-Hernández *et al.* (2015) y González-Rodríguez *et al.* (2018), para Matorral Espinoso Tamaulipeco. También fueron inferiores a lo reportado por Yang *et al.* (2004), Paudel *et al.* (2015), Zhou *et al.* (2016) y Zhu *et al.* (2019) para otros tipos de ecosistemas forestales en su mayoría bosques tropicales. Mientras que, el aporte del K fue superior a lo reportado para el Matorral Espinoso Tamaulipeco (López-Hernández *et al.* 2013, González-Rodríguez *et al.* 2018), y bosques tropicales (Paudel *et al.* 2015). Por otro lado, se encuentra dentro del rango de lo reportado por López-Hernández *et al.* (2015) para esta misma comunidad vegetal.

Los bajos valores observados de Ca en los tres sitios de estudio, en contraste a los altos valores de K, sugieren la existencia de un desequilibrio nutricional Ca/K, poniendo de manifiesto el conocido antagonismo entre ambos elementos: altas concentraciones de K ocasionan inicialmente una deficiencia de Mg, y cuando el K está en mayor desequilibrio

provoca deficiencia del Ca (Rodríguez y Rodríguez 2015). Asimismo, estos bajos valores de Ca podrían estar asociados con mayor translocación del Ca en los tres sitios de estudios.

La contribución de Mg en la hojarasca fue muy similar entre los sitios (14 - 21 kg de Mg ha⁻¹ año⁻¹), ubicándose en los límites intermedios reportados por López-Hernández *et al.* (2015) y González-Rodríguez *et al.* (2018) para el Matorral Espinoso Tamaulipeco. Igualmente, concuerdan con los valores reportados para ecosistemas forestales tropicales (Yang *et al.* 2004, Paudel *et al.* 2015, Zhou *et al.* 2016), pero fueron superiores a los obtenidos por Rout y Gupta (1990) para matorrales subtropicales (9 kg de Mg ha⁻¹ año⁻¹). Por otra parte, el retorno de P al suelo forestal a través de la hojarasca fue superior en Crucitas (5.4 kg ha⁻¹ año⁻¹) e inferior en Linares (3.9 kg ha⁻¹ año⁻¹). Estos valores fueron superiores a los reportados en la literatura para Matorral Espinoso Tamaulipeco (González-Rodríguez *et al.* 2011, López-Hernández *et al.* 2015, González-Rodríguez *et al.* 2018) y bosques espinosos en Argentina (0.8 - 2.1 kg de P ha⁻¹ año⁻¹, Mendoza *et al.* 2014). Por otra parte, Paudel *et al.* (2015) en bosque tropical montano, reportaron valores en el rango 4.4 - 13.1 kg P ha⁻¹ año⁻¹, cantidades superiores a las alcanzadas para el sitio de Linares. Las variaciones estacionales en los contenidos de nutrientes en los distintos ecosistemas evaluados pueden estar influenciados por los mecanismos de movilidad y translocación de nutrientes para la formación de nuevo tejido foliar, a la disponibilidad edáfica y eficiencia de absorción de nutrientes por las distintas especies y microbiota asociada, a las propiedades físico-químicas del suelo, como el pH, y a los procesos ecofisiológicos en los que intervienen los nutrientes como lo son fotosíntesis, transpiración, activación de enzimas, y su función en la osmorregulación y adaptación de las plantas durante el estrés de sequía (León-Peláez *et al.* 2009).

En cuanto a los micro-nutrientes, los retornos encontrados para Cu y Zn en la hojarasca fueron altos (36 y 128 g ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente) comparados con lo reportado para el componente foliar

del Matorral Espinoso Tamaulipeco (López-Hernández *et al.* 2013, González-Rodríguez *et al.* 2018), obteniéndose para ambos elementos los mayores valores en Linares. En el caso del Cu, los valores encontrados en este estudio son ligeramente superiores a los reportados para bosques templadas en España (32 g ha⁻¹ año⁻¹, Santa-Regina *et al.* 1989) y muy inferiores a lo reportado por Del Valle-Arango (2003) en bosques húmedos del Pacífico Colombiano (70 g ha⁻¹ año⁻¹). Aunque no se detectaron diferencias ($p > .05$) en la caída anual de hojarasca (Tabla 2), las diferencias ($p < .05$) mensuales observadas entre los sitios de estudio (Figura 1) se pueden asociar a los periodos secos y húmedos de cada ecosistema bajo estudio. Además, las variaciones mensuales en la deposición de la hojarasca entre los sitios de estudio se pueden atribuir, en parte, a las diferencias en la composición florística y densidad de sus especies, a la dinámica de crecimiento y etapas fenológicas de las especies que constituyen cada comunidad y al patrón de caída de los diferentes componentes que conforman la hojarasca como se ha documentado por Domínguez-Gómez *et al.* (2013), González-Rodríguez *et al.* (2019), Shen *et al.* (2019) y Caliman *et al.* (2020).

En cuanto al retorno de Mn, fue superior a lo reportado por López-Hernández *et al.* (2013, 2015) en el Matorral Espinoso Tamaulipeco. Para el Fe, la situación es contraria ya que, en comparación con las referencias encontradas, los retornos fueron superiores a los reportados para esta misma comunidad vegetal por López-Hernández *et al.* (2013). Mientras que, estos mismos valores se encuentran dentro del rango a lo reportado por López-Hernández *et al.* (2015) pero son inferiores a los registrados por González-Rodríguez *et al.* (2018) para este mismo ecosistema. A pesar de que se trata del mismo tipo de comunidad vegetal, se observan diferencias. Hipotéticamente estas diferencias podrían atribuirse a diferencias en las producciones de hojarasca, su calidad, a variables ambientales y a la diversidad de plantas tanto caducifolias como perennifolias presentes o ausentes en los diferentes sitios estudiados (Domínguez Gómez *et al.* 2013, Shen *et al.* 2019).

Eficiencia en el uso de nutrientes (EUN)

La EUN para el Ca fue muy inferior a lo reportado por López-Hernández *et al.* (2013) para el matorral espinoso tamaulipeco pero similar a la obtenida por González-Rodríguez *et al.* (2011), para el sitio de Linares. Mientras que, el valor de la EUN obtenido para Mg (274 - 366) para los tres sitios de estudio, está dentro del rango reportado por González-Rodríguez *et al.* (2018) y López-Hernández *et al.* (2015). Sin embargo, está muy por debajo de lo obtenido para bosques de pino-encino por González-Rodríguez *et al.* (2018). Para el K, los valores obtenidos en los sitios estudiados, fueron muy bajos con respecto a lo reportado por González-Rodríguez *et al.* (2011), pero próximos a lo obtenido por López-Hernández *et al.* (2013). Aun cuando el retorno de P fue bajo, su EUN fue más alto en comparación con los otros nutrientes (León-Peláez *et al.* 2009, González-Rodríguez *et al.* 2018, Zhu *et al.* 2019). Los altos valores de la producción de hojarasca y del retorno potencial de nutrientes determinados en este estudio (Tabla 2), muestran que las especies que constituyen cada comunidad vegetal (Domínguez Gómez *et al.* 2013, González-Rodríguez *et al.* 2019) presentan un gran potencial para la recuperación de áreas degradadas y fuente de nutrientes para la fauna silvestre durante las épocas secas (Ramírez-Lozano *et al.* 2018) a partir de la caída y degradación de la hojarasca y el reciclaje biogeoquímico de los nutrientes. En los ecosistemas semiáridos del noreste de México, el bajo contenido de nutrientes de la hojarasca puede estar relacionado a la baja fertilidad edáfica, lo cual se refleja en bajos contenidos foliares de nutrientes (Chávez Espinoza *et al.* 2020), a los procesos de retranslocación de nutrientes el cual se evidencia en altos valores en el uso eficiente de nutrientes como se a observado para el caso de P y Mg (González-Rodríguez *et al.* 2019).

Al parecer el P ejerce un papel limitante en los ecosistemas estudiados. En cambio, para los nutrientes Ca, K y Mg su alta disponibilidad en el suelo y movilidad en el tejido foliar permite que estos nutrientes estén más disponibles en las plantas para sus diferentes funciones, por lo tanto presentan bajos niveles en su uso eficiente. Aparentemente,

los bajos niveles de P en la hojarasca sugieren que este nutriente está disponible en niveles bajos dentro de la solución del suelo o, más bien, que es fácilmente retranslocado a otras estructuras de las plantas antes de la senescencia de las hojas para contribuir a la generación de nuevas estructuras o procesos fisiológicos (Palma *et al.* 2000). Pero a pesar del gran valor de esta adaptación, lo cierto es que no todas las especies tienen la misma eficiencia en la reabsorción de nutrientes. Además, en contra de lo que se pudiera esperar, no siempre las especies de hábitats pobres en nutrientes son las más eficientes en la reubicación de los nutrientes (Aerts 1997). Quizá, estas diferencias en el retorno de nutrientes y la eficiencia en su uso se deban al efecto de otros factores, como la precipitación, la fertilidad del suelo, la composición botánica, la calidad de la hojarasca y el estrés hídrico, que podrían influir con la eficiencia en el uso de nutriente (Zhu *et al.* 2019).

CONCLUSIONES

Los resultados muestran variación espacial y temporal en la producción de la hojarasca entre los sitios estudiados. No se detectaron diferencias significativas en la producción total entre los sitios de estudio, esta misma tendencia se observó en el retorno de nutrientes. Se puede inferir que el limitado retorno de nutrientes en Los Ramones, puede ser el resultado de la baja riqueza de especies, diferencias edáficas, calidad de la hojarasca y fenología de las diferentes especies. Lo que implica que tienda a presentar una mayor eficiencia en el uso de nutrientes. El P, a pesar de que fue el elemento más limitante, tuvo mayor eficiencia en el uso de nutrientes que Ca, K y Mg. La mayor caída de hojarasca no necesariamente aporta más nutrientes al suelo, ya que su aporte está en función de la calidad de la hojarasca caída. Las diferencias encontradas en los patrones de entrada de nutrientes fueron impulsadas por la dinámica de la caída de la hojarasca. Desde el enfoque de los servicios ecosistémicos que el suelo proporciona, se infiere que la calidad de la hojarasca en el sitio de Linares es ligeramente superior a la de las Crucitas y Los Ramones en términos de la provisión de

nutrientes y de la regulación de los ciclos biogeoquímicos.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el fi-

nanciamiento otorgado a través del Fondo Sectorial de Investigación para la Educación, de los proyectos con clave A1-S-44878 y 250732. También a los revisores anónimos por enriquecer y hacer observaciones críticas al presente estudio. A Elsa Dolores González Serna, Jonathan Lazcano Cortez y a Manuel Hernández Charles por su participación en el trabajo de campo y las actividades en el laboratorio.

LITERATURA CITADA

- Aerts R (1997) Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos* 79: 439-449.
- AOAC (2012) Official methods of analysis, 19th Edition. Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg, Maryland, USA. 2200p.
- Binkley D, Stape JL, Ryan MG (2004) Thinking about efficiency of resource use in forests. *Forest Ecology and Management* 193: 5-16.
- Caliman JP, Godinho TO, Caldeira MVW, Rocha JHT, Drury ML, Castro KC (2020) Seasonal pattern of nutrient cycling in the Atlantic Forest across a topographic gradient. *Scientia Forestalis* 48: e3200. DOI: 10.18671/scifor.v48n125.23.
- Cantú-Silva I, Sánchez-Castillo LRM, González-Rodríguez H, Kubota T, Gómez-Meza MV, Domínguez-Gómez TG (2013) Retorno potencial de nutrimentos por componentes secundarios de la hojarasca en comunidades vegetales de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4: 138-155.
- Chapin FS, Matson PA, Monney HA (2002) Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer-Verlag. New York, USA. 423p.
- Chávez-Espinoza M, González-Rodríguez H, Cantú-Silva I, Cotera-Correa M, Estrada-Castillón AE, Bernal-Barragán H, Gómez-Meza MV (2020) Foliar mineral content of five shrub species with nutritional potential for small ruminants in semiarid regions in northeastern Mexico. *Ciencia Rural* 50: e20200202. DOI: 10.1590/0103-8478cr20200202.
- Cherney DJR (2000) Characterization of forages by chemical analysis. In: Givens DI, Owen E, Axford RFE, Omed HM (ed). *Forage evaluation in ruminant nutrition*. CAB International. Wallingford, UK. pp: 281-300.
- Chuyong GB, Newbery DM, Songwe NC (2000) Litter nutrients and retranslocation in a central African rain forest dominated by ectomycorrhizal trees. *New Phytologist* 148: 493-510.
- Del Valle-Arango JI (2003) Cantidad, calidad y nutrientes reciclados por la hojarasca fina de bosques pantanosos del pacífico sur colombiano. *Interciencia* 28: 443-449.
- Domínguez-Gómez TG, González-Rodríguez H, Guerrero-Cervantes M, Cerrillo-Soto MA, Juárez-Reyes AS, Alvarado MS, Ramírez-Lozano RL (2011) Influencia del polietilén glicol sobre los parámetros de producción de gas in vitro en cuatro forrajeras nativas consumidas por el venado cola blanca. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17: 21-32.
- Domínguez-Gómez TG, González-Rodríguez H, Ramírez-Lozano RG, Estrada-Castillón AE, Cantú-Silva I, Gómez-Meza MV, Villarreal-Quintanilla JA, Alvarado MS, Alanís-Flores G. (2013) Diversidad estructural del ma-

- torral espinoso tamaulipeco durante las épocas seca y húmeda. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4: 106-123.
- Ge X, Zeng L, Xiao W, Huang Z, Geng X, Tan B (2013) Effect of litter substrate quality and soil nutrients on forest litter decomposition: A review. *Acta Ecologica Sinica* 33: 102-108.
- González-Rodríguez H, Cantú-Silva I, Gómez-Meza MV, Ramírez-Lozano RG (2004) Plant water relations of thornscrub shrub species, northeastern Mexico. *Journal of Arid Environments* 58: 483-503.
- González-Rodríguez H, Domínguez-Gómez TG, Cantú-Silva I, Gómez-Meza MV, Ramírez-Lozano RG, Pando-Moreno M, Fernández CJ (2011) Litterfall deposition and leaf litter nutrient return in different locations at Northeastern Mexico. *Plant Ecology* 212: 1747-1757.
- González-Rodríguez H, López-Hernández JM, Ramírez-Lozano RG, Gómez-Meza MV, Cantú-Silva I, Sarquís-Ramírez JI, Mora-Olivo A (2019) Litterfall deposition and nutrient return in pine-oak forests and scrublands in northeastern Mexico. *Madera y Bosques* 25: e2531514. DOI: 10.21829/myb.2019.2531514.
- González-Rodríguez H, Ramírez-Lozano RG, Cantú-Silva I, Gómez-Meza MV, Cotera-Correa M, Carrillo-Parra A, Marroquín-Castillo JJ (2013) Producción de hojarasca y retorno de nutrientes vía foliar en un matorral desértico micrófilo en el noreste de México. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19: 249-262.
- González-Rodríguez H, Ramírez-Lozano RG, Cantú-Silva I, Gómez-Meza MV, Estrada-Castillón E, Arévalo JR (2018) Deposition of litter and nutrients in leaves and twigs in different plant communities of northeastern Mexico. *Journal of Forestry Research* 29: 1307-1314.
- Gourley CJP, Alla DL, Russelle MP (1994) Plant nutrient efficiency: A comparison of definitions and suggested improvement. *Plant Soil* 158: 29-37.
- Hagen-Thorn A, Varnagiryte I, Nihlgård B, Armolaitis K (2006) Autumn nutrient resorption and losses in four deciduous forest tree species. *Forest Ecology and Management* 228: 33-39.
- Hansen K, Vesterdal L, Schmidt IK, Gundersen P, Sevel L, Bastrup-Birk A, Lars-Bo P, Bille-Hansen, J (2009) Litterfall and nutrient return in five tree species in a common garden experiment. *Forest Ecology and Management* 257: 2133-2144.
- INEGI (1986) Síntesis geográfica del Estado de Nuevo León. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática. México. México. 171p.
- León JD, Osorio NW (2014) Role of litter turnover in soil quality in tropical degraded lands of Colombia. *The Scientific World Journal* 2014: 693981. DOI: 10.1155/2014/693981.
- León-Peláez JD, Hernández MG, Lancho JG (2009) Retranslocación y eficiencia en el uso de nutrientes en bosques del centro de Antioquia. *Colombia Forestal* 12: 119-140.
- Liang W, Yang Y, Fan D, Guan H, Zhang T, Long D, Zhou Y, Bai D (2015) Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010. *Agricultural and Forest Meteorology* 204: 22-36.
- López-Hernández JM, González-Rodríguez H, Ramírez-Lozano RG, Cantú-Silva I, Gómez-Meza MV, Pando-Moreno M, Estrada-Castillón AE (2013) Producción de hojarasca y retorno potencial de nutrientes en tres sitios del Estado de Nuevo León, México. *Polibotánica* 35: 65-78.
- López-Hernández JM, González-Rodríguez H, Ramírez-Lozano RG, Del Valle-Arango JI, Cantú-Silva I, Pando-Moreno M, Estrada-Castillón AE, Gómez-Meza MV (2015) Producción de hojarasca y depósito potencial de

- nutrientes de las hojas en el Matorral Espinoso Tamaulipeco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6: 74-89.
- Martínez-Alonso C, Valladares-Ros F, Camarero JJ, López-Arias M, Serrano M, Rodríguez JA (2007) The uncoupling of secondary growth, cone and litter production by intradecadal climatic variability in a mediterranean scots pine forest. *Forest Ecology and Management* 253: 19-29.
- Martínez-Yrizar A, Jaramillo VJ, Maass M, Búrquez A, Parker G, Álvarez-Yépiz JC, 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.
- Martínez-Yrizar A, Nuñez S, Miranda H, Búrquez A (1999) Temporal and spatial variation of litter production in Sonora Desert communities. *Plant Ecology* 145: 37-48.
- Mendoza CA, Gallardo-Lancho JF, Aceñolaza PG, Turrion MB, Pando V (2014) Temporal evolution of litterfall and potential bio-element return in a successional forest sequence of the Espinal Ecorregion, Argentina. *Forest Systems* 23: 411-424.
- Ott L (1993) *An introduction to statistical methods and data analysis*. 2nd Edition. Duxbury Press. Boston, USA. 775p.
- Palma RM, Defrieri RL, Tortarolo MF, Prause J, Gallardo JF (2000) Seasonal changes of bioelements in the litter and their potential return to green leaves in four species of the Argentine subtropical forest. *Annals of Botany* 85: 181-186.
- Paudel E, Dossa GG, Xu J, Harrison RD (2015) Litterfall and nutrient return along a disturbance gradient in a tropical montane forest. *Forest Ecology and Management* 353: 97-106.
- Ramírez-Lozano RG, Cantú-Silva I, Gómez-Meza MV, González-Rodríguez H (2018) Contenido mineral en hojas de la hojarasca del matorral espinoso Tamaulipeco. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 5: 119-125.
- Rodríguez FH, Rodríguez AJ (2015) *Métodos de análisis de suelos y plantas: Criterios de interpretación*. Editorial Trillas, México. 168p.
- Rout SK, Gupta SR (1990) Forest floor, litterfall and nutrient return in subtropical forest ecosystems of Siwaliks in Northern India II. Litterfall pattern and nutrient turnover rates. *Flora* 184: 405-421.
- Rowland L, Da Costa ACL, Oliveira AAR, Almeida SS, Ferreira LV Malhi Y, Metcalfe DB, 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: 1673-1682.
- Santa-Regina I, Gallardo JF, San Miguel C (1989) Ciclos biogeoquímicos en bosques de la Sierra de Béjar (Salamanca, España): 2. Retorno potencial de bioelementos por medio de la hojarasca. *Revue d'écologie et de biologie du sol* 26: 155-170.
- Shen G, Chen D, Wu Y, Liu L, Liu C (2019) Spatial patterns and estimates of global forest litterfall. *Ecosphere* 10: e02587. DOI: 10.1002/ecs2.2587.
- Steel RGD, Torrie JH (1980) *Principles and procedures of statistics. A biometrical approach*, 2nd ed. McGraw-Hill Book Co. New York, USA. 633p.
- Tang J, Cao M, Zhang J, Li M (2010) Litterfall production, decomposition and nutrient use efficiency varies with tropical forest types in Xishuangbanna, SW China: a 10-year study. *Plant and Soil* 335: 271-288.
- Trap J, Bureau F, Brethes A, Jabiol B, Ponge JF, Chauvat M, Decaëns T, Aubert M (2011) Does moder development along a pure beech (*Fagus sylvatica* L.) chronosequence result from changes in litter production or in decomposition rates? *Soil Biology and Biochemistry* 43: 1490-1497.

- Wang Q, Wang S, Huang Y (2008) Comparisons of litterfall, litter decomposition and nutrient return in a monoculture *Cunninghamia lanceolata* and a mixed stand in southern China. *Forest Ecology and Management* 255: 1210-1218.
- Yang YS, Guo JF, Chen GS, Xie JS, Cai LP, Lin P (2004) Litterfall, nutrient return, and leaf-litter decomposition in four plantations compared with a natural forest in subtropical China. *Annals of Forest Science* 61: 465-476.
- 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.
- 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 broadleaved forest in China. *European Journal of Forest Research* 135: 77-86.
- Zhu X, Liu W, Chen H, Deng Y, Chen C, Zeng H (2019) Effects of forest transition on litterfall, standing litter and related nutrient returns: Implications for forest management in tropical China. *Geoderma* 333: 123-134.