

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



**CAÍDA DE HOJARASCA Y DEPÓSITO DE NUTRIENTES EN TRES
ECOSISTEMAS FORESTALES DEL NORESTE DE MÉXICO**

TESIS DE MAESTRÍA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA

ING. VERÓNICA HERNÁNDEZ MERINO

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

FEBRERO DE 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO

**CAÍDA DE HOJARASCA Y DEPÓSITO DE NUTRIENTES EN TRES
ECOSISTEMAS FORESTALES DEL NORESTE DE MÉXICO**

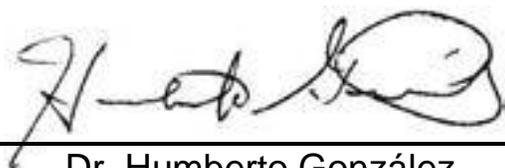
TESIS DE MAESTRÍA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA:

ING. VERÓNICA HERNÁNDEZ MERINO

COMITÉ DE TESIS



Dr. Humberto González
Rodríguez
Director



Dr. Israel Cantú Silva
Asesor



Dr. Mauricio Cotera Correa
Asesor



Dr. Nelson Manzanares Miranda
Co-Director externo

DEDICATORIA

A **mi Dios**: por permitir que mi familia se esforzara para darme el estudio que ellos nunca pudieron tomar, por darme el regalo más grande, la vida. Por estar siempre en mí camino, por ser mi guía y mi luz. Gracias por darme la oportunidad de lograr una de mis más grandes metas.

A **mi padre**: Esteban Hernández Merino por darme la vida, por sus enseñanzas, sus consejos y sobre todo por su apoyo incondicional y permitirme llegar hasta donde me encuentro hoy en día.

A **mi madre**: Juana Merino Quiroz por brindarme todo su apoyo incondicional y por depositar su confianza en mí. Por todos los incansables sacrificios que hacía día a día para que yo cumpliera uno de mis metas, por su gran comprensión y ejemplo de seguir adelante a pesar de las adversidades que se presentan en la vida.

A **mis hermanos**: Fidel David, Faviola, Juvenal y Liliana por su inigualable cariño y ánimo, por el gran amor que les tengo y que comprendan que nada es fácil pero que con esfuerzo y dedicación todo es posible.

Con cariño a **mis primos**: Kasi, Flavia, Josefina, Martita, Ara, Ernesto, Paulino, Maribel, Fidelia, Alba, Martha, Héctor, Esmeralda, Israel, Joel, Yadira, Imelda, Aida, Abisair, Ariel, Chuchin, Neri, Ade, Mileidi, Hipólito, Macedonio, Alma y Martina, mil palabras no bastan para agradecerles su apoyo incondicional, su comprensión y sus consejos en los momentos difíciles, a todos espero no defraudarlos y contar siempre con su valioso apoyo, sincero e incondicional.

A **mis tíos**: Margarito, Tomasa, Paula, Marcelina, Rosa, Rita, Hipólito, Regulo, Victorio, Catalina, Rafaela y Miguel por sus confianzas, consejos, apoyo incondicional y cariño durante el plazo de mi estudio.

A **mi tía**: Justina (†) que siempre me apoyo, quien fue mi motivación en toda mi carrera al igual que en la maestría, aunque ya no está físicamente a mi lado creo que donde quiera que este estará orgulloso de mis logros hasta hoy en día y cada triunfo, porque es mi ángel que me cuida desde el cielo y sé que está muy feliz por verme cumplir uno de mis más grandes sueños y porque la quiero mucho y siempre la llevare en mi mente y en mi corazón en cada uno de mis logros.

A **mis sobrinos**: Alex (Bichin), Danna, Mayte, Elsi y Joss, por sacarme siempre una sonrisa con sus travesuras inocencias, quienes llenan mi vida de alegría y amor con cada risa y abrazos. ¡Siempre estaré aquí para ellos, apoyándolos y amándolos incondicionalmente!

A **mis abuelos**: Luis Hernández, Emilia Merino, José Merino (†) y Cirila Quiroz (†) por su amor de padres y sus deseos de que siempre siga adelante, por apoyarme incondicionalmente, y compartir mi sueño de hacer una maestría gracias por su amor.

A **mis amigas**: un verdadero amigo es alguien quien entiende tu pasado, cree en tu futuro y te acepta en tu presente tal y como eres, es aquel que te comprende, que te cuida, que te quiere, ese que sabe siempre que decir o que hacer para que te sientas mejor es ese que está en los buenos y malos momentos, le doy mil gracias por todos los momentos que pasamos juntos, en especial a Reyna (Japonesita), Adri (Chaparra), Ángela (Bombón), María (Gatita), Lety, Obdu, Oswaldo, Dolores, Alejandro, Alicia, Digna, Adela Paola, Cesar, Alejandra, Karely, Yaz y Alondra.

AGRADECIMIENTO

A la **Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad autónoma de Nuevo León** por abrirme las puertas y haberme dado la oportunidad de estudiar la Maestría en Ciencias Forestales.

Al Dr. **Humberto González Rodríguez** por ser mi Director de la Tesis, por siempre brindarme su amistad, cariño y consejo que me ayudaron a salir adelante y por todo el tiempo que me dedico, por sus conocimientos aportados y sugerencias durante todo este proceso.

Al Dr. **Israel Cantú Silva** por formar parte de mi comité por su cometarios, sugerencias y su valioso tiempo dedicado que me sirvió para concluir esta investigación.

Al Dr. **Mauricio Cotera Correa** por su contribución como miembro del comité de tesis, así como por sus valiosos comentarios y sugerencias durante los seminarios y en la redacción del trabajo, los cuales han contribuido significativamente a mejorar esta investigación. También agradezco el tiempo dedicado a revisar el contenido de esta.

Al Dr. **Nelson Manzanares Miranda**, por formar parte de mi comité de tesis, y por todos los conocimientos aportados y su contribución para mejorar este presente trabajo.

Al Dr. **Juan Manuel López Hernández**, Profesor investigador de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, por su valioso tiempo dedicado a la revisión de este trabajo de investigación.

Al Dr. **Juan Diego León Peláez**, de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín por su invaluable apoyo y orientación durante mi estancia internacional. Su dedicación y compromiso han sido fundamentales para mi desarrollo académico y profesional. Por sus conocimientos aportados y su disposición para ayudarme a mejorar esta investigación.

A la Dra. **Perla Cecilia Rodríguez Balboa** por su amistad y apoyo incondicional.

A **Elsa Dolores Gonzales Serna** con quien estoy eternamente agradecida por todo su apoyo incondicionalmente en todos los análisis de laboratorio por su amistad y su conocimiento que me brindo.

A **Néstor Alejandro Villarreal**, por la ayuda brinda en la recolección de las muestras de campo.

A **todos los profesores de la Facultad de Ciencias Forestales** por haberme brindado cada uno de sus conocimientos, por su paciencia y dedicación a lo largo de mi Posgrado para lograr mi formación profesional, así como a todo personal que labora en esta institución.

En especial al **CIPA** por su generosidad y apoyo excepcional, quienes me abrieron las puertas de su casa sin tener ninguna obligación, la verdad no tengo como agradecerles, pero le doy mil gracias a dios por haberlos puestos en mi camino.

Al **Consejo Nacional de la Humanidades Ciencias y Tecnologías** (CONAHCYT) por el financiamiento otorgado a través del Fondo Sectorial de Investigación para la Educación, de los proyectos con clave A1-S-44878 y 250732 de los cuales deriva la presente investigación y por el apoyo para llevar a cabo mis estudios de maestría.

ONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
2	HIPÓTESIS	3
3	OBJETIVOS	3
3.1	Objetivo general	3
3.1.1	Objetivos específicos	3
4	REVISIÓN DE LITERATURA	4
4.1	Producción de Hojarasca	4
4.2	Importancia de la hojarasca	6
4.3	Descomposición de la hojarasca.....	8
5	MATERIALES Y MÉTODOS	10
5.1	Descripción y localización del área de estudio.....	10
5.2	Clima	11
5.3	Topografía.....	11
5.4	Hidrología.....	12
5.5	Suelo	12
5.6	Vegetación	13
5.7	Frecuencia de la colecta y muestreo de la caída de hojarasca.....	14
5.8	Preparación de muestras	14
5.9	Determinación de macro y micro-nutrientes.....	15
5.10	Análisis estadísticos	17
6	RESULTADOS	19
6.1	Producción anual de hojarasca, macro- y micro-nutrientes y Uso Eficiente de Nutrientes.....	19
6.2	Producción mensual de hojarasca	20
6.2.1	Depósito de hojarasca	22
6.3	Contenido de nutrientes en la hojarasca.....	23
6.4	Dinámica del depósito mensual de macronutrientes	25
6.4.1	Depósito de Calcio (Ca).....	25
6.4.2	Depósito de Magnesio (Mg).....	26
6.4.3	Depósito de Potasio (K).....	27
6.4.4	Depósito de Fósforo (P).....	28

6.5	Dinámica del depósito mensual de micronutrientes	29
6.5.1	Depósito de Cobre (Cu).....	29
6.5.2	Depósito de Manganeseo (Mn)	30
6.6	Depósito de Fierro (Fe)	31
6.6.1	Depósito de Cinc (Zn).....	32
7	DISCUSIÓN.....	33
7.1	Producción de hojarasca y depósito de micronutrientes	33
7.2	Depósito de macro-nutrientes	34
7.3	Depósito de micro-nutrientes	37
7.3.1	Uso eficiente de nutrientes (UEN)	38
8	CONCLUSIONES.....	39
9	LITERATURA CITADA	40

Índice de Figuras

Figura 1. Localización de área de estudio.	10
Figura 2. Producción mensual de hojarasca ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) en los tres ecosistemas de estudio. Cada valor graficado representa la media \pm error estándar ($n = 10$). Y el valor P de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los ecosistemas para el depósito mensual de hojarasca durante los meses de estudios dentro de la gráfica.	23
Figura 3. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de Ca en la hojarasca para los ecosistemas de estudio.	25
Figura 4. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de Mg en la hojarasca para los ecosistemas de estudio.	26
Figura 5. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de K en la hojarasca para los ecosistemas de estudio.	27
Figura 6. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de P en la hojarasca para los ecosistemas de estudio.	28
Figura 7. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de Cu en la hojarasca para los ecosistemas de estudio.	29
Figura 8. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de Mn en la hojarasca para los ecosistemas de estudio.	30
Figura 9. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de Fe en la hojarasca para los ecosistemas de estudio.	31

Figura 10. Depósito mensual (media \pm error estándar, n = 10) de Zn en la hojarasca para los ecosistemas de estudio. 32

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Producción anual de hojarasca y depósito de macro y micronutrientes en cada ecosistema de estudio y Uso Eficiente de Nutrientes. Los valores de producción de hojarasca, y de nutrientes representan la media \pm error estándar de la media (n=10). En la columna derecha, se presenta el valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los ecosistemas de estudio. Las Medias con letras distintas señalan que existen diferencias estadísticamente significativas (prueba de Tukey, $p < 0.05$)..... 20

Cuadro 2. Resumen del análisis de la prueba de Kruskal-Wallis, para detectar significativas entre los ecosistemas de estudio en el depósito mensual de la hojarasca. Valores P en negritas muestran diferencias significativas entre los ecosistemas de estudio..... 21

Cuadro 3. Resumen de los análisis de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los ecosistemas para el depósito mensual de hojarasca, macro- y micro-nutrientes. Los valores p en negritas ($p < .05$), representan diferencias significativas entre ecosistemas para el depósito de nutrientes..... 24

Resumen

La caída de la hojarasca en los bosques es crucial para enriquecer el suelo, ya que este proceso conduce a la liberación de los nutrientes contenidos en ella, favoreciendo así su desarrollo. Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue evaluar la producción de hojarasca y el depósito de macro (K, Mg, Ca, y P) y micronutrientes (Fe, Zn, Cu, y Mn) y el uso eficiente de nutrientes (UEN) en la hojarasca en tres ecosistemas forestales del Noreste de México. La colecta de hojarasca llevó a cabo cada 15 días durante un periodo de 15 meses de enero 2020 a marzo del 2021, en los siguientes ecosistemas forestales: 1) Matorral Espinoso Tamaulipeco, 2) Matorral Submontano y 3) Pino-Encino. Para determinar la producción de hojarasca, se establecieron colectores permanentes de 1.0 m². El estudio se basó en colocar 10 recolectores de manera aleatoria por ecosistema, mismos que fueron considerados como repeticiones. Respecto a la producción promedio de hojarasca (g•m⁻²•año⁻¹), el Matorral Submontano fue el que acumuló la mayor producción (728.1) mientras que la menor fue en el ecosistema de Pino-Encino (574.9). El depósito de macronutrientes (g•m⁻²•año⁻¹) varió de la siguiente forma: Ca de 10.5 (Pino-Encino) a 32.5 (Matorral Submontano), K de 2.08 (Pino-Encino) a 10.9 (Matorral Espinoso Tamaulipeco), Mg de 1.5 (Pino-Encino) a 4.3 (Matorral Espinoso Tamaulipeco) y P de 0.02 (Pino-Encino) a 0.6 (Matorral Espinoso Tamaulipeco y Matorral Submontano). Respecto al depósito de micronutrientes (mg•m⁻²•año⁻¹) varió del siguiente modo: Cu de 1.6 (Pino-Encino) a 6.1 (Matorral Espinoso Tamaulipeco); Mn de 32.0 (Matorral Espinoso Tamaulipeco) a 105.1 (Pino-Encino), Fe de 97.2 (Pino-Encino) a 179.0 (Matorral Espinoso Tamaulipeco) y Zn de 16.8 (Matorral Submontano) a 18.8 (Matorral Espinoso Tamaulipeco). En relación al Uso Eficiente de Nutrientes (g hojarasca•g⁻¹ nutriente), varió de la siguiente manera: Ca de 22.3 (Matorral Submontano) a 54.7 (Pino-Encino), K de 63.8 (Matorral Espinoso Tamaulipeco) a 276.8 (Pino-Encino), Mg de 164.7 (Matorral Espinoso Tamaulipeco) a 386.7 (Pino-Encino) y P de 1122.5 (Matorral Espinoso Tamaulipeco) a 2513.2 (Pino-Encino). Las diferencias entre la producción de hojarasca y depósito de nutrientes se deben, en gran parte, a la estructura y diversidad, la fenología de las

especies y a las condiciones ambientales prevalecientes en cada ecosistema estudiado.

Palabras clave: Depósito, Ecosistemas forestales, Hojarasca, Matorral, Nutrientes, Pino-Encino.

Abstract

The fall of leaf litter in forests is crucial to enrich the soil, since this process leads to the release of the nutrients contained in it, thus favoring its development. Therefore, the objective of this study was to evaluate the litterfall production and the deposition of macro (K, Mg, Ca and P) and micronutrients (Fe, Zn, Cu, and Mn) and the nutrient use efficiency (NUE) in litterfall in three forest ecosystems, northeastern Mexico. Litterfall collection was conducted over a period of 15 months from January 2020 to March 2021 at the following forest ecosystems: 1) Tamaulipan Thornscrub, 2) Submontane Scrub and 3) Pine-Oak. To determine the litterfall production, permanent 1.0 m² collectors were established. The study was based on randomly placing 10 collectors per ecosystem, which were considered as replicates. Regarding the average litter production (g•m⁻²•year⁻¹), the Submontane Scrub was the one that accumulated the highest production (728.1) while the lowest was in the Pine-Oak ecosystem (574.9). Macronutrient deposition (g•m⁻²•year⁻¹) varied as follows: Ca from 10.5 (Pine-Oak) to 32.5 (Submontane Scrub), K from 2.08 (Pine-Oak) to 10.9 (Tamaulipan Thornscrub), Mg from 1.5 (Pine-Oak) to 4.3 (Tamaulipan Thornscrub) and P from 0.02 (Pine-Oak) to 0.6 (Tamaulipan Thornscrub and Submontane Scrubland). With respect to the micronutrient deposition (mg•m⁻²•year⁻¹) varied as follows: Cu from 1.6 (Pine-Oak) to 6.1 (Tamaulipan Thornscrub), Mn from 32.0 (Tamaulipan Thornscrub) to 105.1 (Pine-Oak), Fe from 97.2 (Pine-Oak) to 179.0 (Tamaulipan Thornscrub) and Zn from 16.8 (Submontane Scrub) to 18.8 (Tamaulipan Thornscrub). Regarding the Nutrient Use Efficiency (g litterfall•g⁻¹ nutrient) varied as follows: Ca from 22.3 (Submontane Scrub) to 54.7 (Pine-Oak), K from 63.8 (Tamaulipan Thornscrub) to 276.8 (Pine-Oak), Mg from 164.7 (Tamaulipan Thornscrub) to 386.7 (Pine-Oak) and P from 1122.5 (Tamaulipan Thornscrub) to 2513.2 (Pine-Oak). The differences between litterfall production and nutrient deposition are largely due, in part, to the structure and diversity, the phenology of the species and the prevailing environmental conditions in each ecosystem studied.

Key words: Deposition, Forest ecosystems, Litterfall, Shrubland, Nutrients, Pine-Oak.

1 INTRODUCCIÓN

La producción y la dinámica de la caída de la hojarasca fina en los ecosistemas forestales, y su posterior descomposición, representan procesos primordiales en el ciclaje de nutrientes, ya que de ellos se deriva la principal transferencia de materia orgánica y nutrientes al suelo (Castellanos-Barliza *et al.*, 2022; López-Hernández *et al.*, 2013). Además, soportan diversos procesos los cuales garantizan el adecuado funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos al nivel ecosistémico, y contribuyen a mejorar las condiciones fisicoquímicas, y biológicas del suelo forestal (León-Peláez *et al.*, 2021; López-Hernández *et al.*, 2013; León *et al.*, 2008). Esto último deriva de la descomposición de los diversos compuestos orgánicos que componen la hojarasca, que favorece la incorporación gradual de materiales orgánicos de diferente naturaleza al suelo (Sayer *et al.*, 2020), de potencial incidencia en diversos procesos de relevancia para el funcionamiento ecosistémico, tales como: el ciclaje de nutrientes en el corto y largo plazo (Arce, 2007), la productividad primaria, el almacenamiento de carbono, y el mantenimiento de la fertilidad y de la actividad microbiana del suelo (Williams-Linera *et al.*, 2021). La contribución de la hojarasca a través de su descomposición por la actividad microbiana y condiciones ambientales del suelo forestal es un proceso importante, ya que los nutrientes estarán a disposición para las plantas y ésta los absorberá a través de las raíces y posteriormente transportarlos a los diferentes tejidos de la planta. Por tanto, el depósito de nutrientes al suelo ayudará a valorar la capacidad que tienen las especies en un ecosistema dado para aportar los nutrientes al suelo y explicar al desempeño de estas para contribuir al contenido de materia orgánica en el suelo forestal (Castellano y León, 2010).

La acumulación de material vegetal en el suelo y su posterior descomposición desempeñan un papel fundamental para mantener la productividad primaria de los ecosistemas terrestres (Swamy *et al.*, 2004) ya que constituyen la principal fuente de retorno de la materia orgánica al suelo (Landsberg y Gower, 1997). Gran parte de este material proviene de la caída de los diversos compuestos orgánicos que componen a la hojarasca (Carnevale y Lewis, 2001). Una vez que se descompone,

libera diferentes elementos minerales que las plantas pueden volver a absorber, manteniendo un adecuado funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos (Zamboni y Aceñolaza, 2004). La velocidad a la cual estos nutrientes se liberan depende de factores morfológicos y fisiológicos de las especies vegetales, las pautas relacionadas con los patrones estacionales de la caída de la hojarasca y las condiciones ambientales. Estos factores determinan el tiempo durante el cual se producirá la liberación de nutrientes (Aceñolaza *et al.*, 2006; Polyakova y Billor, 2007; Wang *et al.*, 2008). El estudio del ciclaje de nutrientes a través de la dinámica de la hojarasca es una valiosa aproximación para comprender el funcionamiento de los ecosistemas forestales.

La cantidad de materia orgánica depositada anualmente está principalmente vinculada a las condiciones climáticas, siendo más abundante en regiones cálidas y húmedas en contraste con las áreas de climas más fríos (Alves *et al.*, 2013). En bosques tropicales, la caída de hojarasca suele disminuir con el incremento de altitud, pero, por otro lado, las concentraciones y reservas de carbono y nitrógeno en el suelo tienden a aumentar a mayor altitud (Rodrigues *et al.*, 2017). Además, la cantidad de hojarasca está influida por características de la vegetación, como la estructura del bosque y composición de especies, que son influenciadas por la edad del bosque. Durante el proceso de regeneración, los elementos que conforman la estructura del bosque, como la altura de las plantas, la densidad y el área basal, tienden a aumentar, lo que tiene un impacto positivo en la producción de hojarasca (Souza *et al.*, 2019). Por otra parte, la altitud tiene un efecto significativo en las condiciones de precipitación y temperatura, lo que a su vez ejerce una fuerte influencia en la composición de especies, la diversidad, la cantidad y el ciclo de vida del ecosistema forestal (Tesfaye *et al.*, 2019). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue cuantificar la producción de hojarasca y el depósito de macro- (Ca, K, Mg y P), micro-nutrientes (Fe, Mn, Cu y Zn) y el Uso Eficiente de Nutrientes (Ca, K, Mg y P) en tres ecosistemas forestales del Noreste de México.

2 HIPÓTESIS

- I. En los tres ecosistemas de estudio se producen cantidades diferentes de hojarasca debido a la influencia del tipo de ecosistema forestal.
- II. Existen diferencias en el depósito de nutrientes en tres diferentes ecosistemas forestales.
- III. El Uso eficiente de macronutrientes (K, Mg, Ca, y P) varía por ecosistema forestal.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar la dinámica anual de caída de hojarasca y depósito de nutrientes en tres ecosistemas forestales (1.- Matorral Espinoso Tamaulipeco, 2.- Matorral Submontano y 3.- Pino-Encino) del Noreste de México.

3.1.1 Objetivos específicos

1. Cuantificar la caída de hojarasca en cada ecosistema forestal.
2. Determinar el contenido y depósito de macro- (K, Mg, Ca, y P)) y micro-nutrientes (Fe, Zn, Cu, y Mn) en la hojarasca en los tres ecosistemas forestales.
3. Evaluar el uso eficiente de macronutrientes en cada ecosistema forestal.

4 REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Producción de Hojarasca

González-Rodríguez *et al.* (2008) destacan que la producción de la hojarasca no solo es importante en el ciclo de nutrientes, sino que también tiene fuertes implicaciones en términos relacionados con los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas forestales, además, juegan un papel fundamental en el mantenimiento de los procesos ecológicos asociados a estos ecosistemas. Estos procesos incluyen la formación del suelo, el mantenimiento de la fertilidad del suelo, la prevención de la erosión, y los sustratos para las especies vegetales y microbianas, así como la preservación de la vida de la fauna de invertebrados. A su vez, estos procesos contribuyen a mejorar la mineralización de la materia orgánica del suelo y en el mejoramiento de las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo, así como la disponibilidad de agua y la capacidad de infiltración, lo cual es crucial para el mantenimiento de la absorción de nutrientes, el desarrollo de plantas y el crecimiento y elongación de las raíces. Todos estos aspectos están interconectados e integrados de manera que sostienen la productividad primaria neta de los ecosistemas y la diversidad biológica.

González-Rodríguez *et al.* (2006) señalan que la cantidad de materia orgánica proveniente del dosel vegetal que se deposita sobre el suelo en forma de hojarasca en ciertas especies se encuentra influenciada por sus características físicas y los grupos funcionales. Esto implica que estas especies pueden aprovechar y absorber los nutrientes de manera distinta en términos de, reabsorción, almacenamiento y pérdida, lo que puede llegar a afectar la calidad de la hojarasca y, finalmente, a la calidad del suelo. En tanto, González-Díaz (2019) estimó el depósito de la hojarasca en tres ecosistemas forestales en el noreste de México, encontrando que fue de 138.9 g m⁻² para Pino, 364.7 g m⁻² para Encino y 325.5 g m⁻² para un ecosistema de Pino-Encino.

Por otra parte, Carmona-Pequeño (2020) evaluó la producción de hojarasca y reciclado de nutrientes en tres ecosistemas forestales del Noreste de México, en cual se estimó y cuantificó la dinámica anual del depósito de hojarasca. El depósito

total anual de hojarasca fue de 441.7, 437.7 y 529.0 g m⁻² año⁻¹ para bosques de Pino, Encino y Pino-Encino, respectivamente.

Además, Colín-Vargas (2019) examinó la composición de nutrientes minerales en la capa de hojarasca de diferentes tipos de bosques, incluyendo pino, encino y pino-encino, durante la fase de la degradación de la hojarasca. Los resultados revelaron que, en el bosque de pino, se registró una transferencia de nutrientes al suelo de 16.6 mg g⁻¹ para el calcio, 1.64 mg g⁻¹ para el magnesio y 0.704 mg g⁻¹ para el potasio, mientras que los micronutrientes cobre, manganeso, hierro y zinc mostraron una tendencia hacia la acumulación. Por otro lado, en los bosques de encino, se observó una transferencia de nutrientes al suelo de 14.75 mg g⁻¹ para el calcio, 2.45 mg g⁻¹ para el magnesio y 7.61 mg g⁻¹ para el potasio.

De acuerdo con Kimmins (1997), de manera general, la cantidad de materia orgánica que cae al suelo en forma de hojarasca tiende a ser mayor en áreas con climas cálidos y húmedos, así como en suelos fértiles. Por otro lado, este proceso es menor en zonas secas y frías, donde hay una menor cantidad de nutrientes disponibles. Las variaciones en la cantidad de hojarasca generada durante la caída de las hojas también están influenciadas por las condiciones ambientales (precipitación y temperatura), lo que a su vez afecta la cantidad de nutrientes que se devuelven al suelo.

Oliver *et al.* (2002) determinaron la descomposición de diferentes tipos de hojarasca en un pastizal mediterráneo de la Península Ibérica. Se estudiaron gramíneas, leguminosas herbáceas y leguminosas arbustivas durante un año. Los resultados mostraron que la hojarasca de leguminosas arbustivas se descompuso más rápidamente que las otras formas de hojarasca, mientras que la hojarasca de gramíneas presentó mayor resistencia a la descomposición. En las zonas bajas, las leguminosas liberaron más nitrógeno, mientras que, en las zonas altas, donde eran más abundantes, las gramíneas tuvieron una mayor contribución.

4.2 Importancia de la hojarasca

La deposición de hojarasca al suelo forestal en algunas especies está determinada principalmente por características fisiológicas, morfológicas y sus grupos funcionales, así como también estas mismas pueden absorber los nutrientes de formas diferentes al suelo, esto en términos relacionados con la asimilación, acumulación y pérdida de la materia orgánica; perjudicando la calidad de la hojarasca y por consiguiente del suelo (González *et al.*, 2006).

El proceso de descomposición de las hojas en el suelo forestal es un crucial para facilitar la transferencia de nutrientes y materia orgánica desde las partes aéreas de las plantas (Vitousek, 1984) y representa una contribución significativa al enriquecimiento del suelo. La capa de hojarasca en descomposición, conocida como mantillo, actúa como un escudo protector que cubre el suelo, resguardándolo de los cambios de humedad y temperatura. Así mismo, este mantillo favorece la reintegración de nutrientes al suelo en cantidades considerablemente importantes (Schlatter, 2006). De hecho, la aportación de elemento minerales provenientes de la hojarasca es fundamental lo que constituye la principal fuente de recursos vitales para el ecosistema forestal (Vitousek y Sanford, 1986).

Los ecosistemas forestales son un importante sumidero de carbono y representan aproximadamente dos tercios de la fotosíntesis total de la Tierra. Aproximadamente el 80% del carbono del ecosistema terrestre y el 40% del carbono del suelo se almacenan en forma de biomasa aérea y subterránea, que incluye, árboles muertos, capa de hojarasca y materia orgánica del suelo (Hu y Wang, 2008). Los bosques brindan funciones de utilidad como la conservación de la biodiversidad, la preservación del paisaje y los servicios ecosistémicos. Por tanto, la cantidad de material orgánico depositado en el suelo, conocido como hojarasca, juegan un papel crucial en el desarrollo de las especies y en el mantenimiento de la fertilidad del suelo. Es fundamental cuantificar tanto la producción de hojarasca como su descomposición para entender de mejor manera el ciclo de nutrientes en los ecosistemas forestales (Facelli y Pickett, 2008). Además, dado que las hojas, flores, ramas y frutos se renuevan gradualmente, la medición de la hojarasca es esencial

para comprender la relación entre factores bióticos y abióticos en los ecosistemas forestales (Aryal, 2014).

La competitividad que poseen los ecosistemas terrestres para funcionar como depósitos de carbono dependen principalmente de un fenómeno denominado "efecto de fertilización". Este fenómeno se produce debido al incremento del dióxido de carbono en la atmósfera y a la deposición de nitrógeno atmosférico, que se libera en exceso debido a diferentes actividades antrópicas. La presencia actual de niveles elevados de dióxido de carbono en la atmósfera limita el óptimo desarrollo y crecimiento de las plantas, y se ha encontrado evidencia de que este fenómeno de fertilización puede aumentar el crecimiento de la vegetación en condiciones naturales. Sin embargo, los estudios fisiológicos llevados a cabo en plantas individuales y en ambientes controlados han indicado incrementos en magnitudes que no se han observado en la misma medida en la naturaleza (Mooney *et al.*, 1999). Por otro lado, el fenómeno de fertilización está relacionado con la disponibilidad de nitrógeno provocando que este elemento sea un factor que restringe la capacidad de producción primaria en numerosos ecosistemas terrestres (Schlesinger, 1997).

La descomposición los restos orgánicos aportado por la hojarasca se considera como un proceso primordial en mantenimiento de la vida en los ecosistemas forestales, permitiendo el ciclaje de los nutrientes (Sánchez y Palm, 2006). En este proceso se pueden determinar tres fases fundamentales; la primera es que es de fácil descomposición o degradación, solubles o labiales; la segunda fase es insoluble pero también se considera de fácil degradación y principalmente está compuesta de hemicelulosa y celulosa; y la fase tres se caracteriza por ser más lento el proceso de descomposición debido a la presencia de carbohidratos, lípidos, lignificados, ligninas, y ceras (Heal *et al.*, 1997).

Se ha informado que la tasa de descomposición de la hojarasca en los desiertos de México presento una fluctuación entre 0.001 a 0.44 g año⁻¹, en contraste con los ecosistemas húmedos y subhúmedos (como los bosques tropicales estacionales o

tropicales subhúmedos), donde se registraron valores de 0.45 y 2.0 g año⁻¹, respectivamente (García-Oliva *et al.*, 2006; Montaña *et al.*, 2016).

La cantidad de hojarasca producida está determinada por diferentes factores ambientales, como la temperatura, la humedad, el tipo de vegetación y la época del año. Según Aceñolaza *et al.* (2009), se ha observado que los principales aportes de hojarasca se presentan durante el verano y primavera, llegando a aportar hasta un 40% del promedio anual de hojarasca en bosques caducifolios y semi caducifolios. Por su parte, Belmonte *et al.* (1998), señalan que la mayor producción de hojarasca para el *Pinus halepensis*, ocurre durante el verano, y en los ecosistemas tropicales, la caída interanual de hojarasca es similar. Esto demuestra que tanto las condiciones ambientales como la especie vegetal influyen en la cantidad de hojarasca que se acumula a lo largo del año.

4.3 Descomposición de la hojarasca

Los diferentes compuestos orgánicos que componen las hojarascas (hojas, ramas, flores y frutos), representan la principal fuente de materia orgánica. Los cuales después de experimentar un proceso de descomposición, liberan nutrientes que se integran nuevamente al suelo y están disponibles para ser aprovechados por las plantas (Bonilla *et al.*, 2008). Diversos estudios relacionados con la descomposición de la hojarasca han proporcionado información relevante sobre la velocidad y el patrón de descomposición, así como la liberación de nutrientes en diversos ecosistemas. También han identificado los principales factores que actúan sobre la velocidad en la descomposición de la hojarasca de diferentes especies (Negrete *et al.*, 2008; Vivanco y Austin, 2008).

Existen diversos elementos que inciden en el proceso de descomposición de la hojarasca, y estos incluyen aspectos como la calidad de los nutrientes presentes en el lecho, tales como su contenido de nitrógeno y lignina (Aerts, 1997). Además, factores climáticos como la temperatura y la cantidad de precipitación también juegan un papel importante en este proceso (Karberg *et al.*, 2008). Además, no se puede pasar por alto la influencia de los microorganismos, cuya actividad es fundamental en la descomposición de la hojarasca. Un aspecto interesante para

resaltar es que los factores que controlan la descomposición en las etapas tempranas y la liberación de nutrientes difieren significativamente de aquellos que rigen la descomposición más lenta de la materia orgánica y la acumulación subsiguiente en el suelo. Esto subraya la complejidad de este proceso e ilustra la necesidad de comprender y considerar múltiples variables al abordar la dinámica de la hojarasca y su contribución al ciclo de nutrientes en los ecosistemas naturales (Aponte *et al.*, 2012).

5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Descripción y localización del área de estudio

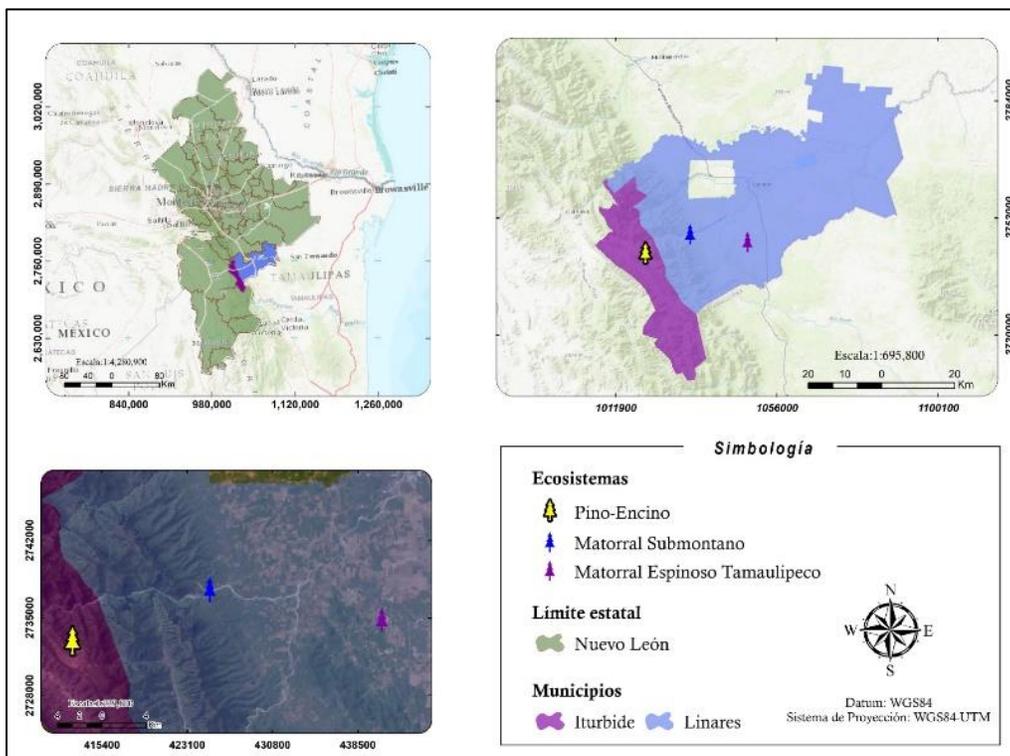


Figura 1. Localización de área de estudio.

La investigación se realizó en tres ecosistemas forestales del Noreste de Nuevo León, México (Figura 1). Ecosistema 1: Matorral Espinoso Tamaulipeco ubicado en el Ejido Jesús María; Ecosistema 2: Matorral Submontano ubicado en el Ejido Crucitas, ambos localizados en el municipio de Linares, Nuevo León y el Ecosistema 3: Bosque de Pino-Encino, localizado en el Campus Ecológico “Bosque Escuela” de la UANL “Universidad Autónoma de Nuevo León”, el cual se encuentra ubicado en el municipio de Iturbide. La ubicación geográfica del ecosistema Matorral Espinoso Tamaulipeco es 24°43'37.2" N; 99°35'11.6" W; con una altitud de 380 msnm. En tanto, el ecosistema de Matorral Submontano se localiza en las coordenadas a 24°45'03.7" N; 99°44'25.6" O; con una altitud de 560 msnm, mientras que el ecosistema de Pino-Encino se ubica en las coordenadas 24°42'30.6" N 99°51'45.8" O; con una altitud de 1600 msnm (García, 1988; INEGI, 2001).

5.2 Clima

Según la clasificación climática de Köeppen, adaptada para México por García (1964), los tipos de clima presentes en los sitios de estudio son:

Ecosistema 1 (Matorral Espinoso Tamaulipeco). Se caracteriza por un clima semiárido y cálido clasificado como BS1(h')(x'), con una temperatura media anual de 22°C alcanzando mayores temperaturas de 40°C durante el verano y la precipitación pluvial oscila entre 400 y 750 mm al año, con un valor de precipitación promedio de 705 mm. Es relevante destacar que esta lluvia se presenta en dos períodos (marzo-junio y septiembre-octubre), mientras que existen un periodo seco y extremadamente caluroso, conocido como “canícula” y se presenta en los meses de julio y agosto.

Ecosistema 2 (Matorral Submontano). Se caracteriza por un clima semicálido de tipo BS1hw, que exhibe características de, templado subhúmedo, con temperatura promedio anual que alcanza a los 21°C, con el mes más frío registrando temperaturas inferiores a 18°C, y el mes más cálido superando los 22°C. La precipitación anual se sitúa en torno a los 755 mm, mostrando una distribución particular con lluvias durante el verano, presentando entre 5% y el 10% del total anual (Bravo, 1999).

Ecosistema 3 (Bosque de Pino-Encino). se caracteriza por un clima predominante del tipo BS1hw, clasificado como templado subhúmedo con precipitaciones en verano. La cantidad anual de lluvia alcanza los 620 mm, siendo los meses de junio y septiembre los de mayor precipitación. Durante el invierno por lo general se experimentan condiciones secas, aunque pueden presentarse tormentas y frentes fríos ocasionales del Norte, con temperaturas descendiendo hasta -10°C. La temperatura promedio anual es de 18°C, sin embargo, durante el periodo más cálido la temperatura puede llegar hasta los 35°C en verano (Cantú y González, 2002).

5.3 Topografía

En Linares, el municipio es atravesado por la Sierra Madre Oriental por el oeste y en su gran parte por la Sierra Madre occidental, mientras que el resto del territorio

es generalmente plano con algunos lomeríos. Las zonas planas representan el 55% de la superficie total de Linares. Las zonas de relieves abruptas se encuentran localizadas en las proximidades de la Sierra Madre Oriental, a una distancia de 28 kilómetros se encuentra el cañón de Santa Rosa (Yañez-García, 2021).

La topografía del municipio de Iturbide está delineada por la presencia de la Sierra Madre Oriental que cruza casi todo el municipio formando valles y cañones como el de Peña Colorada, Las Alazanas y La Muralla (Yañez-García, 2021).

5.4 Hidrología

Los ríos importantes en el municipio de Linares son el Hualahuises y el Pablillo, los cuales confluyen antes de llegar a la presa Cerro Prieto; el río Potosí, que forma parte de la cuenca del Conchos también a traviesa la región. Las presas Cerro Prieto, la Estrella, el Petríl, Reforma y el Cinco, entre otras, contribuyen lo principal recursos hídricos disponibles en el municipio (Yañez-García, 2021).

Los recursos hidrológicos del municipio de Iturbide, donde se ubica el Ecosistema de Bosque de Pino-Encino, están compuesto por varis cuerpos de agua. Entre ellos se encuentran el río San Antonio, cuyo origen es en el rancho La Tinaja, y atraviesa el municipio de sur a norte. Además, están presentes los ríos Pablillo y Hualahuises, que a traviesan en el territorio de este a oeste, mientras que, al norte del municipio se localiza el río La Muralla. Estos ríos mantienen un caudal constante, al igual que los arroyos de Camarones, Orejas de la Purísima, Boquillas, El Alamar, San Francisco, El Jarro y un arroyo que cruza la cabecera municipal de este a oeste. La Laguna de Santa Rosa solo retiene agua durante la temporada de lluvias (Yañez-García, 2021).

5.5 Suelo

Los suelos encontrados en los Ecosistemas de estudio son diversos. En el Bosque Escuela que se localiza en el área de la Sierra Madre Oriental, los tipos más frecuentes son Castañozem y Chernozem. Los Castañozem se distingue por tener una textura limosa en la capa superficiales y arcilloso limosa en la capa más profunda, con altos niveles de nutrientes minerales tales como Cu, Mn, K y Fe, pero

bajos contenidos de P y Zn. El pH se sitúa en un rango moderadamente alcalino de 7.5 a 8.5), con bajos niveles de materia orgánica y nitrógeno (Cantú y González, 2002). Por otro lado, los suelos Chernozem se caracterizan por presentar una alta porosidad del 55 al 60% y baja densidad aparente. En lo términos referente a propiedades químicas, destacan por su elevado contenido de materia orgánica (10 a 16%), un pH que oscila entre 6.6 a 8.5, tienen una relación C/N de 10 y un contenido total de nitrógeno total varía de 0.2 a 0.5%. En Matorral Espinoso Tamaulipeco, particularmente en las planicies y lomeríos, los suelos más comunes son del tipo Vertisol. Estos se caracterizan por un alto contenido de arcillas expansivas, con un horizonte A profundo y sin horizonte B. estos suelos son utilizados para actividades agrícolas, ganaderas y para el desarrollo de, asentamientos humanos (Cantú y González, 2002).

5.6 Vegetación

Ecosistema 1 (Matorral Espinoso Tamaulipeco): El tipo de la vegetación presente en la zona es el Matorral Espinoso Tamaulipeco. Se distingue por la presencia predominante de arbustos leguminosas que alcanzan alturas entre 1 y 5 m. Entre las especies que dominan fisonómicamente en el ecosistema de estudio se encuentran *Celtis pallida*, *Prosopis glandulosa*, *Zanthoxylum fagara*, *Ebenopsis ebano*, *Havardia pallens*, y *Acacia rigidula*, (García y Jurado, 2008).

Ecosistema 2 (Matorral Submontano): Este ecosistema se encuentra en una region de transición entre dos tipos de vegetación: Bosque de Encino y Matorral Submontano. su vegetación principal está compuesta por diferentes especies de *Quercus* que oscila entre los 5 y los 20 m de altura. Entre los tipos de especies de encino que se pueden incluir son los siguientes: *Quercus graciliformis*, *Quercus affinis*, *Quercus polymorpha*, *Quercus rysophylla* y *Quercus grisea*. Además, en relación con el matorral submontano, se pueden encontrar especies como *Neopringlea integrifolia*, *Helietta parvifolia* y *Diospyros texana* (García y Jurado, 2008).

Ecosistema 3 (Bosque de Pino-Encino): La vegetación predominante es el Bosque de Pino-Encino. Se caracteriza por la presencia predominante de una vegetación

que comprende especies de árboles con alturas que superan a los 4 metros. Estos árboles suelen tener hojas esclerófilas o aciculares. Entre las especies comúnmente encontradas en este ecosistema se incluye *Quercus polymorpha*, *Quercus fusiformis*, *Quercus lacey*, *Quercus affinis*, *Pinus pseudostrobus* y *Pinus cembroides* (García y Jurado, 2008).

5.7 Frecuencia de la colecta y muestreo de la caída de hojarasca

Al fin de determinar la cantidad de la hojarasca depositada se estableció un sitio de estudio con dimensiones de 50 m x 50 m (2,500 m²), en el cuales se colocaron diez recolectores de hojarasca (canastas), los cuales fueron considerados como repeticiones dentro de cada Ecosistema, con medidas de 1 m x 1 m, con un marco biselado de 10 cm de altura, el cual recubrió con una malla plástica fina a fin de evitar la acumulación de agua. Los recolectores se colocaron a 50 cm sobre el suelo.

La hojarasca se recolectó durante 15 meses y la recolección se llevó a cabo en un intervalo de cada 15 días; iniciando con la primera recolecta el día 15 de enero del 2020, concluyendo el 30 de marzo del 2021. Los recolectores se colocaron de manera aleatoria en cada parcela de cada ecosistema de estudio y se mantuvieron en el mismo lugar durante todo el periodo que se llevó a cabo la presente investigación.

5.8 Preparación de muestras

El material depositado de manera natural en los recolectores en los tres ecosistemas de estudio fue trasladado al Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL en bolsas de Kraft, las cuales se etiquetaron con fecha de la recolecta, número de colector y ecosistema de estudio. Posteriormente, el material recolectado se secó en una estufa (Marca Felisa, Modelo FE-292AD) de aire forzado por un periodo de 72 horas a una temperatura de 70°C hasta obtener peso constante cuantificando posteriormente el peso seco (g·m⁻²). A través de la sumatoria de todas las muestras que se realizó durante el periodo de estudio, es decir por número de repeticiones, mes y ecosistema estudiado, se cuantifico el

depósito total de hojarasca ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$). Los pesos secos de cada muestra de hojarasca fueron determinados con el uso de una balanza digital (Marca Sartorius Laboratory LC 620 S) con resolución de 0.001g.

5.9 Determinación de macro y micro-nutrientes

Después de obtener la cuantificación de la hojarasca, se procedió a moler la hojarasca recolectada de cada ecosistema de estudio, por ella las muestras fueron procesadas en un molino Thomas Willey (Thomas Scientific Apparatus, Modelo 3383) usando una malla de 2.0 mm. Cabe mencionar que se molieron de manera individual, es decir por cada una de las repeticiones. El material molido fue recolectando en bolsas de plástico tipo Ziploc previamente etiquetadas por fecha, ecosistema y número de repetición. Las muestras resultantes se guardaron en frascos etiquetados.

El proceso de determinación de macro-nutrientes (Ca, Mg, P y K) y micro-nutrientes (Fe, Zn, Cu, y Mn) en la hojarasca se realizó de acuerdo a técnicas analíticas de digestión descritas en AOAC (1997), lo cual consiste en lo siguiente: de cada una de las bolsas de material molido se tomó 1.0 g de cada muestra, la cual se colocó en crisoles previamente etiquetados. Posteriormente, los crisoles fueron colocados en una estufa de aire forzando para secar la muestra a una temperatura 105°C durante 24 h. Transcurrido ese tiempo, se sacaron las muestras de la estufa y permanecieron por 20 minutos en un desecador para su enfriamiento a temperatura ambiente. Se pesaron nuevamente para la determinar el contenido de materia seca (g). Para realizar la digestión de las muestras, los crisoles fueron colocados en una mufla a una temperatura de 550°C por un tiempo de 3.5 horas. Una vez que se obtuvo la ceniza, se dejaron enfriar en un desecador por 30 minutos, para volver a pesar (g). Bajo una campana de extracción de vapores, las cenizas fueron colocadas en un vaso de precipitado de 50 ml, al cual se le agregó 5 ml de HCl concentrado, 20 ml de agua destilada y 0.5 ml de HNO_3 . Los vasos fueron colocados en la parrilla de calentamiento de 100°C hasta reducir a un volumen de 10 ml. Al llegar a dicho volumen, se retiraron los vasos para agregarles 10 ml de agua destilada y se colocaron en la parrilla de calentamiento por 3 minutos.

Posteriormente, se retiró el vaso de la parrilla y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Una vez que la solución llegó a la temperatura ambiente, se pesó a través de un papel filtro Walthman No. 40, utilizando un embudo de espiga larga para recolectar el filtrado en un matraz volumétrico de 25 ml. Luego, se lavó tanto el vaso de precipitado como el papel filtro veces con pequeñas cantidades de agua destilada, repitiendo este proceso de 2 a 3 veces. Después el volumen de la solución filtrada se ajustó a 25 ml con agua destilada hasta alcanzar el punto de aforación.

Una vez concluido este procedimiento, las muestras (previamente etiquetadas) se guardaron en un refrigerador a una temperatura de 4°C hasta que se realizaron los análisis cuantitativos de cada nutriente.

Para determinar la concentración de Ca, Mg, K, Fe, Mn, Zn y Cu se realizó a través de un espectrofotómetro de Absorción Atómica (Marca PerkinElmer, Modelo PinAAcle 900F). A partir de estándares comerciales para cada elemento, se generó una curva estándar para calcular la concentración de cada elemento en la solución de cada muestra. En el caso de los estándares de Ca, se empleó KCl como agente supresor a una concentración de 2,000 ppm de K. Para el Mg, se utilizó LaCl_3 a una concentración final de 1,000 ppm. Mientras que, para el K, se usó CsCl a una concentración de 1,000 ppm.

La cuantificación de P se llevó a cabo mediante el método de colorimetría (AOAC, 1997). Se utilizó un Espectrofotómetro UV-Visible (marca Perkin-Elmer, modelo Lambda 25). La concentración de Fosforo (P) en los extractos de las muestras se determinó utilizando una curva estándar previamente preparada con diversas concentraciones, partes por millón (ppm) de P.

Los contenidos de nutrientes para el caso de macro-nutrientes (Ca, K, Mg, N y P) y micro-nutrientes (Cu, Fe, Mn y Zn) fueron expresados en términos de mg g^{-1} peso seco de hojarasca. Los procesos de digestión y análisis de nutrientes de la hojarasca se llevaron a cabo en el laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

El depósito de cada nutriente se determinó multiplicando la cantidad de hojarasca depositada (g m^{-2}) por el contenido del nutriente en la hojarasca (mg g^{-1} peso seco), expresando los valores en mg del elemento por metro cuadrado ($\text{mg Elemento m}^{-2}$). El depósito de cada elemento en una base anual, este se calculó mediante la sumatoria de cada mes por repetición, expresando en $\text{mg m}^{-2} \text{año}^{-1}$ para macro y micro-nutrientes. Respecto al Uso Eficientes de Nutrientes, se utilizó el índice de Vitousek (IEV) (Vitousek, 1984), este índice se define como la proporción entre el peso seco de la hojarasca y el contenido de nutrientes, o la inversa de la concentración de nutrientes en la misma, como medida para la evaluación de la eficiencia nutricional en el ecosistema.

5.10 Análisis estadísticos

A fin de detectar si existen diferencias estadísticas significativas en la producción anual de hojarasca, depósito macro y micro-nutrientes y UEN en cada uno de los ecosistemas estudiados, los datos se sometieron a pruebas estadísticas de homogeneidad de varianza y de distribución normal (Steel y Torrie, 1980). Los resultados del depósito anual de hojarasca mostraron que sí cumplen ambos supuestos (Normalidad; pruebas de Kolmogorov-Smirnov con la corrección de Lilliefors y la prueba de Shapiro-Wilk) y de homogeneidad de varianzas (prueba de Levene), siendo analizados mediante un diseño completamente al azar y la prueba de Tukey para la comparación de las medias entre los ecosistemas con un nivel de significancia (α) de .05. Por el contrario, para los datos de depósito mensual de hojarasca y de macro y micro-nutrientes no se cumplieron los dos supuestos, es decir los datos no presentaron normalidad ni homogeneidad de varianza, por lo que se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis (No paramétrica) (Ott, 1993) para detectar si los ecosistemas presentan diferencias significativas entre sí. Las diferencias entre los parámetros de centralidad del depósito de nutrientes fueron validadas mediante la prueba de Mann-Whitney U con corrección de Bonferroni a un nivel de .05 (Ott, 1993). Respecto al Uso Eficientes de Nutrientes, se utilizó el índice de Vitousek (IEV) (Vitousek, 1984), este índice se define como la proporción entre el peso seco de la hojarasca y el contenido de nutrientes, o la inversa de la concentración de nutrientes en la misma, como medida para la evaluación de la eficiencia nutricional

en el ecosistema. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa estadístico SPSS, versión 17.0 para Windows.

6 RESULTADOS

6.1 Producción anual de hojarasca, macro- y micro-nutrientes y Uso Eficiente de Nutrientes

La mayor productividad anual de la hojarasca se presentó en el ecosistema de Matorral Submontano con un valor medio de $728.1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ mientras que el menor fue en el ecosistema de Pino-Encino con un valor de $574.9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, respectivamente (Cuadro 1). El Matorral Submontano promedió 26% más que el ecosistema de Pino-Encino (Cuadro 1). Donde se mostró diferencias notables entre los tres ecosistemas de estudio para la producción anual de la hojarasca ($p=.036$).

El depósito anual de macronutrientes ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) de Ca fluctuó de 10.52 (Pino-Encino) a 32.54 (Matorral Submontano), K de 2.08 (Pino-Encino) a 10.99 (Matorral Espinoso Tamaulipeco), Mg de 1.49 (Pino-Encino) a 4.26 (Matorral Espinoso Tamaulipeco) y P de 0.23 (Pino-Encino) a 0.62 (Matorral Espinoso Tamaulipeco) (Cuadro 1). Dichas deposiciones fueron estadísticamente diferentes entre los ecosistemas.

El depósito anual de micronutrientes ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) de Cu varió de 1.6 (Pino-Encino) a 6.0 (Matorral Espinoso Tamaulipeco), Mn de 32.0 (Matorral Espinoso Tamaulipeco) a 105.0 (Pino-Encino), Fe de 97.2 (Pino-Encino) a 179.0 (Matorral Espinoso Tamaulipeco) y Zn de 16.8 (Matorral Submontano) a 18.8 (Matorral Espinoso Tamaulipeco) (Cuadro 1). Dichas deposiciones fueron estadísticamente diferentes entre los ecosistemas.

El depósito anual de Uso Eficiente de Nutrientes ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) de Ca varió de 22.3 (Matorral Submontano) a 54.7 (Pino-Encino), K de 63.8 (Matorral Espinoso Tamaulipeco) a 276.8 (Pino-Encino), Mg de 164.7 (Matorral Espinoso Tamaulipeco) a 386.7 (Pino-Encino) y P de 1122.5 (Matorral Espinoso Tamaulipeco) a 2513.2 (Pino-Encino) (Cuadro 1). Dichas deposiciones fueron estadísticamente diferentes entre los ecosistemas.

Cuadro 1. Producción anual de hojarasca y depósito de macro y micronutrientes en cada ecosistema de estudio y Uso Eficiente de Nutrientes. Los valores de producción de hojarasca, y de nutrientes representan la media \pm error estándar de la media (n=10). En la columna derecha, se presenta el valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los ecosistemas de estudio. Las Medias con letras distintas señalan que existen diferencias estadísticamente significativas (prueba de Tukey, $p < 0.05$).

Depósito Anual	Ecosistemas de Estudio			Estadístico		
	MET	MS	PE	F	χ^2	P
Hojarasca ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$)						
	701.5 \pm 78.9 ^{ab}	728.1 \pm 83.1 ^a	574.9 \pm 64.6 ^b	3.767		0.036
Macro-Nutrientes ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$)						
Ca	27.54 \pm 5.2	32.54 \pm 4.2	10.52 \pm 1.7		20.387	<0.001
K	10.99 \pm 1.8	6.93 \pm 1.1	2.08 \pm 0.3		22.338	<0.001
Mg	4.26 \pm 0.7	3.29 \pm 0.5	1.49 \pm 0.2		20.101	<0.001
P	0.62 \pm 0.07	0.60 \pm 0.07	0.23 \pm 0.02		19.396	<0.001
Micro-Nutrientes ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$)						
Cu	6.05 \pm 1.03	4.59 \pm 0.63	1.60 \pm 0.82		19.334	<0.001
Mn	32.04 \pm 4.29	73.56 \pm 14.13	105.05 \pm 16.77		18.405	<0.001
Fe	179.03 \pm 28.12	174 \pm 39.69	97.2 \pm 15.16		17.125	<0.001
Zn	18.84 \pm 2.67	16.77 \pm 2.89	18.11 \pm 2.42		1.866	0.393
Uso Eficiente de Nutrientes						
Ca	25.5	22.3	54.7		20.023	<0.001
K	63.8	105.1	276.8		24.351	<0.001
Mg	164.7	221.0	386.7		20.720	<0.001
P	1122.5	1213.2	2513.2		19.791	<0.001

MET=Matorral Espinoso Tamaulipeco; MS=Matorral Submontano; PE=Pino-Encino.

6.2 Producción mensual de hojarasca

El resumen de la prueba No paramétrica de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas en la producción de hojarasca entre los tres ecosistemas de estudios, durante los diferentes meses de estudios, se muestra en el Cuadro 2. Como se puede observar, durante los 15 meses de estudios, solo en cuatro (febrero, marzo, junio y septiembre 2020) no se detectó diferencias significativas ($P > .05$) entre los ecosistemas.

Cuadro 2. Resumen del análisis de la prueba de Kruskal-Wallis, para detectar significativas entre los ecosistemas de estudio en el depósito mensual de la hojarasca. Valores P en negritas muestran diferencias significativas entre los ecosistemas de estudio.

Mes	Estadístico	Hojarasca
Enero 2020	χ^2	15.197
	Valor p	0.001
Febrero	χ^2	2.331
	Valor p	0.312
Marzo	χ^2	2.075
	Valor p	0.354
Abril	χ^2	18.165
	Valor p	<0.001
Mayo	χ^2	10.911
	Valor p	0.004
Junio	χ^2	4.717
	Valor p	0.095
Julio	χ^2	11.84
	Valor p	0.003
Agosto	χ^2	20.101
	Valor p	<0.001
Septiembre	χ^2	5.825
	Valor p	0.054
Octubre	χ^2	18.705
	Valor p	<0.001
Noviembre	χ^2	17.892
	Valor p	<0.001
Diciembre	χ^2	15.742
	Valor p	<0.001
Enero 2021	χ^2	10.733
	Valor p	0.005
Febrero	χ^2	21.75
	Valor p	<0.001
Marzo	χ^2	9.484
	Valor p	0.009

6.2.1 Depósito de hojarasca

En los tres ecosistemas de estudio, se detectaron incrementos en la producción de hojarasca en distintos meses del año (Figura 2). Para el Matorral Espinoso Tamaulipeco, se registraron las mayores producciones en los meses de enero de 2020, enero y febrero de 2021. En el caso de Matorral Submontano, las mayores producciones se observaron en los meses de noviembre y diciembre de 2020 y enero de 2021. Por otro lado, en el Bosque de Pino-Encino, la producción máxima ocurrió en el mes de febrero, marzo y abril de 2020, representando el 37, 32 y 31% de la producción total de hojarasca para cada ecosistema, respectivamente.

Durante el período de estudio se observaron diferencias estadísticas en la dinámica de la caída de hojarasca entre los ecosistemas en algunos meses como lo demuestran los análisis estadísticos presentados en el Cuadro 2. Para el Matorral Espinoso Tamaulipeco los depósitos oscilaron entre 17.32 (julio 2020) a 78.04 (febrero 2021) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, en el Matorral Submontano fluctuó de 21.08 (junio 2020) a 80.15 (enero 2021) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ y en el Bosque de Pino-Encino, fue de 11.51 (octubre 2020) a 92.55 (abril 2020) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$. meses de muestreo, solo cuatro (febrero, marzo, junio y septiembre) no se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p>.05$).

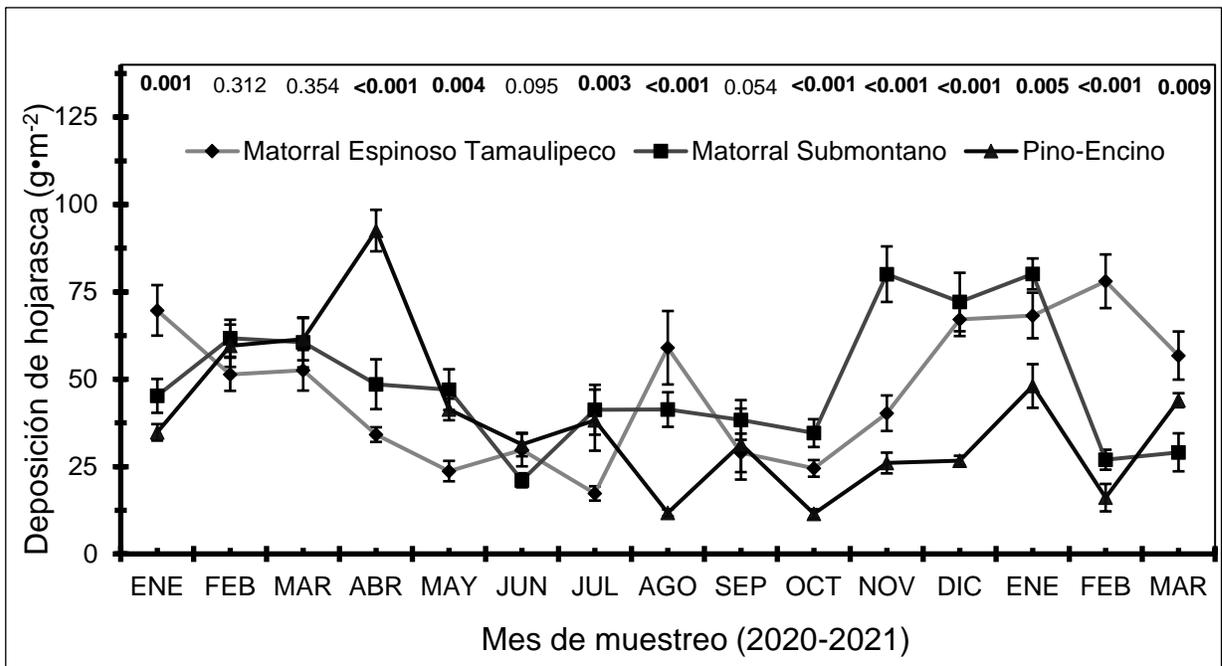


Figura 2. Producción mensual de hojarasca ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) en los tres ecosistemas de estudio. Cada valor graficado representa la media \pm error estándar ($n = 10$). Y el valor P de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los ecosistemas para el depósito mensual de hojarasca durante los meses de estudios dentro de la gráfica.

6.3 Contenido de nutrientes en la hojarasca

El resumen de los análisis de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los ecosistemas para el depósito mensual de macro- y micro-nutrientes en los tres ecosistemas de estudio, para los quince meses de muestreo se ilustra en el cuadro 3.

Para los macro-nutrientes, se puede observar que los elementos Ca, K, Mg y P presentan diferencias significativas ($P < 0.05$), en los 14 meses de muestreo, excepto en el mes de marzo 2020, donde no hubo diferencias significativas entre los tres ecosistemas de estudio para Ca y Mg, mientras, para el K y P solo en el mes de abril 2020 no se encontró diferencias significativas ($P < 0.05$).

En cuanto a los micro-nutrientes, Cu y Mn se detectaron diferencia significativa ($P < 0.05$) durante los 15 de meses de muestreo en los tres ecosistemas de estudio.

En cambio, para el Fe, se detectó diferencia significativa ($P < 0.05$) en diez meses de muestreo (Enero, Abril, Mayo, Agosto, Octubre, Noviembre y Diciembre 2020, Enero, Febrero y Marzo 2021) y en cuanto al Zn, solo en los meses de Abril, Mayo, Agosto, Octubre, Noviembre y Diciembre de 2020, Febrero y Marzo de 2021, Marzo, Junio, Julio, Septiembre 2020 y Enero 2021 se encontró diferencia significativa ($P > 0.05$), mientras que en los meses restantes no se detectaron diferencias.

Cuadro 3. Resumen de los análisis de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los ecosistemas para el depósito mensual de hojarasca, macro- y micro-nutrientes. Los valores p en negritas ($p < .05$), representan diferencias significativas entre ecosistemas para el depósito de nutrientes.

Mes	Estadístico	Macro-Nutrientes				Micro-Nutrientes			
		Ca	K	Mg	P	Cu	Mn	Fe	Zn
Enero-20	χ^2	17.538	23.081	14.524	19.272	19.404	15.734	17.360	5.902
	Valor p	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.052
Febrero	χ^2	10.415	20.101	13.659	13.783	7.450	16.524	0.73	1.68
	Valor p	0.005	<0.001	0.001	0.001	0.024	<0.001	0.694	0.432
Marzo	χ^2	5.048	13.822	4.199	12.356	12.111	21.283	4.446	5.461
	Valor p	0.080	0.001	0.123	0.002	0.002	<0.001	0.108	0.065
Abril	χ^2	6.093	0.932	1.443	4.292	7.061	17.427	6.604	13.412
	Valor p	0.048	0.628	0.486	0.117	0.029	<0.001	0.037	0.001
Mayo	χ^2	13.079	12.356	8.124	16.114	21.138	16.880	8.805	11.817
	Valor p	0.001	0.002	0.017	<0.001	<0.001	<0.001	0.012	0.003
Junio	χ^2	6.328	10.114	7.017	15.533	18.320	9.298	1.868	3.912
	Valor p	0.042	0.006	0.030	<0.001	<0.001	0.010	0.393	0.141
Julio	χ^2	19.564	15.533	13.822	19.466	15.843	12.057	2.005	2.821
	Valor p	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	0.002	0.367	0.244
Agosto	χ^2	19.791	22.338	21.677	22.888	21.835	16.911	20.841	18.705
	Valor p	<0.001							
Septiembre	χ^2	17.221	19.192	9.159	14.152	10.911	11.708	5.234	1.726
	Valor p	<0.001	<0.001	0.010	0.001	0.004	0.003	0.073	0.422
Octubre	χ^2	17.868	18.769	19.311	21.066	16.756	13.969	9.484	14.356
	Valor p	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.009	0.001
Noviembre	χ^2	23.783	18.986	19.099	21.912	16.815	19.28	20.999	14.459
	Valor p	<0.001	0.001						
Diciembre	χ^2	21.525	21.835	20.191	19.481	21.835	10.083	15.734	13.079
	Valor p	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.006	<0.001	0.001
Enero-21	χ^2	17.868	19.324	18.653	17.613	18.914	20.472	13.412	0.472
	Valor p	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.79
Febrero	χ^2	23.094	23.907	24.351	24.792	24.126	7.628	23.484	16.772
	Valor p	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.022	<0.001	<0.001
Marzo	χ^2	7.388	19.357	18.320	19.249	17.159	18.289	10.870	10.694
	Valor p	0.025	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.004	0.005

6.4 Dinámica del depósito mensual de macronutrientes

6.4.1 Depósito de Calcio (Ca)

El depósito de Ca para el Matorral Espinoso Tamaulipeco fluctuó de 0.88 (mayo, junio y julio 2020) a 3.13 (enero 2020) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; en el Matorral Submontano de 0.78 (junio 2020) a 3.80 (noviembre 2020) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ y en el ecosistema de Pino-Encino de 0.13 (agosto 2020) a 2.05 (abril 2020) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$. El Bosque Pino-Encino presentó un depósito de Ca menor en todos los meses de muestreo respecto a los otros dos ecosistemas (Figura 3).

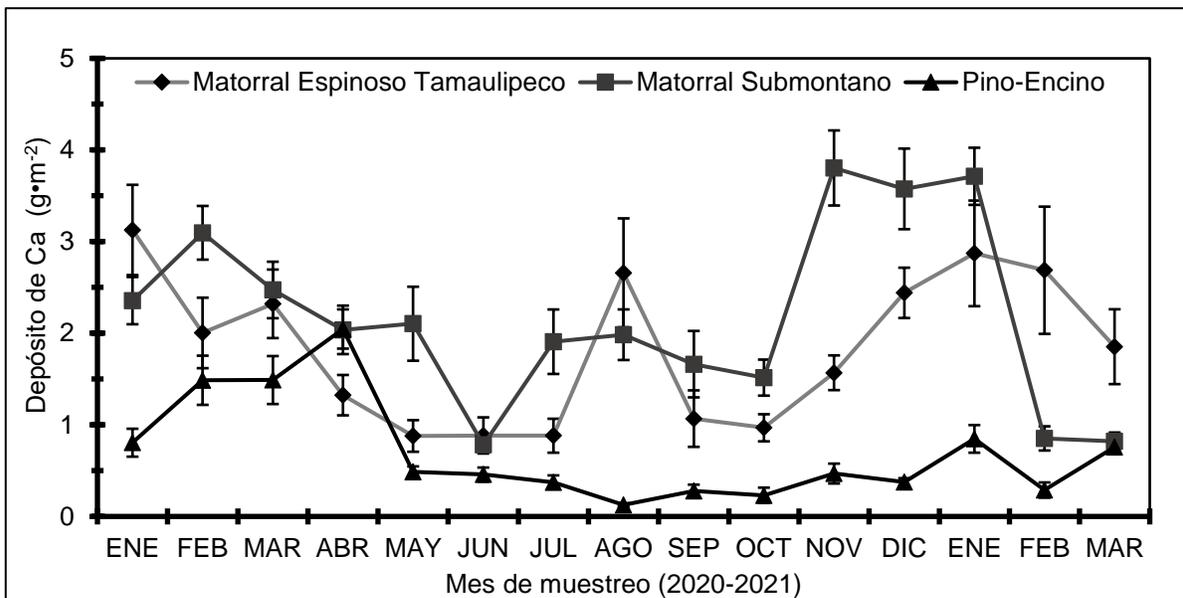


Figura 3. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de Ca en la hojarasca para los ecosistemas de estudio.

6.4.2 Depósito de Magnesio (Mg)

El depósito de Mg para el Matorral Espinoso Tamaulipeco fluctuó de 0.12 (junio 2020) a 0.45 (marzo 2020) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; en el Matorral Submontano de 0.07 (febrero 2021) a 0.34 (febrero 2020) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ y en el ecosistema de Pino-Encino de 0.03 (agosto 2020 y febrero 2021) a 0.27 (abril 2020) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$. El Bosque Pino-Encino presentó un depósito de Mg menor en todos los meses de muestreo respecto a los otros dos ecosistemas (Figura 4).

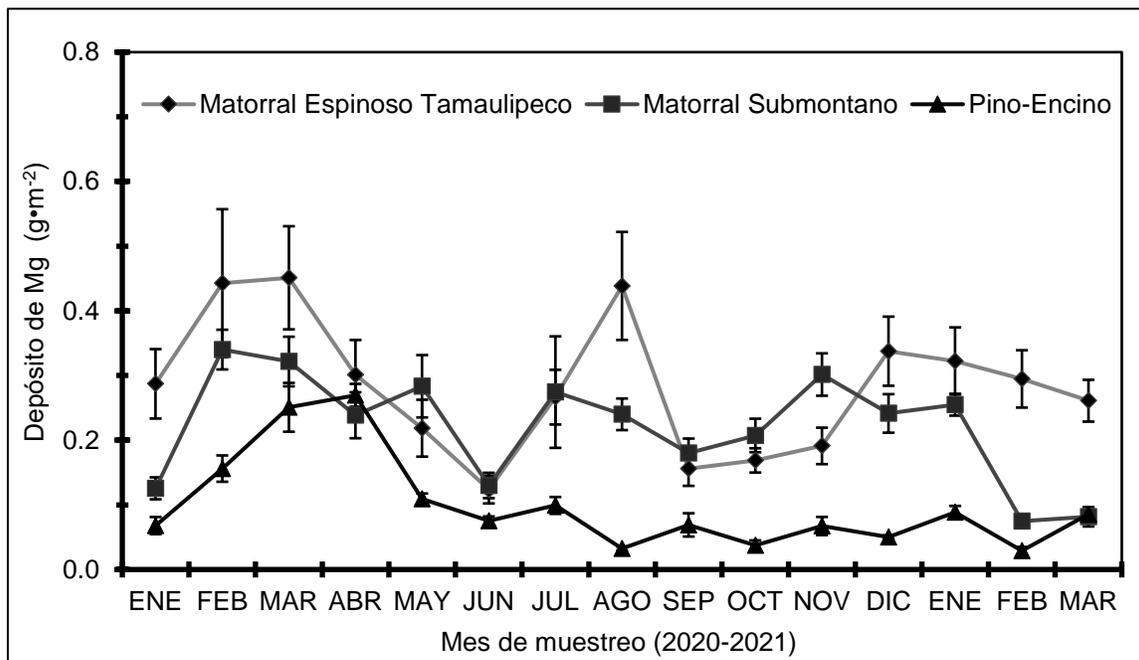


Figura 4. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de Mg en la hojarasca para los ecosistemas de estudio.

6.4.3 Depósito de Potasio (K)

El depósito de K para el Matorral Espinoso Tamaulipeco fluctuó de 0.21 (junio y septiembre 2020) a 1.18 (marzo 2020) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; en el Matorral Submontano de 0.12 (junio 2020) a 0.90 (noviembre 2020) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ y en el ecosistema de Pino-Encino de 0.04 (agosto y septiembre 2020) a 0.47 (abril 2020) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$. El Bosque Pino-Encino presentó un depósito de K menor en todos los meses de muestreo respecto a los otros dos ecosistemas (Figura 5).

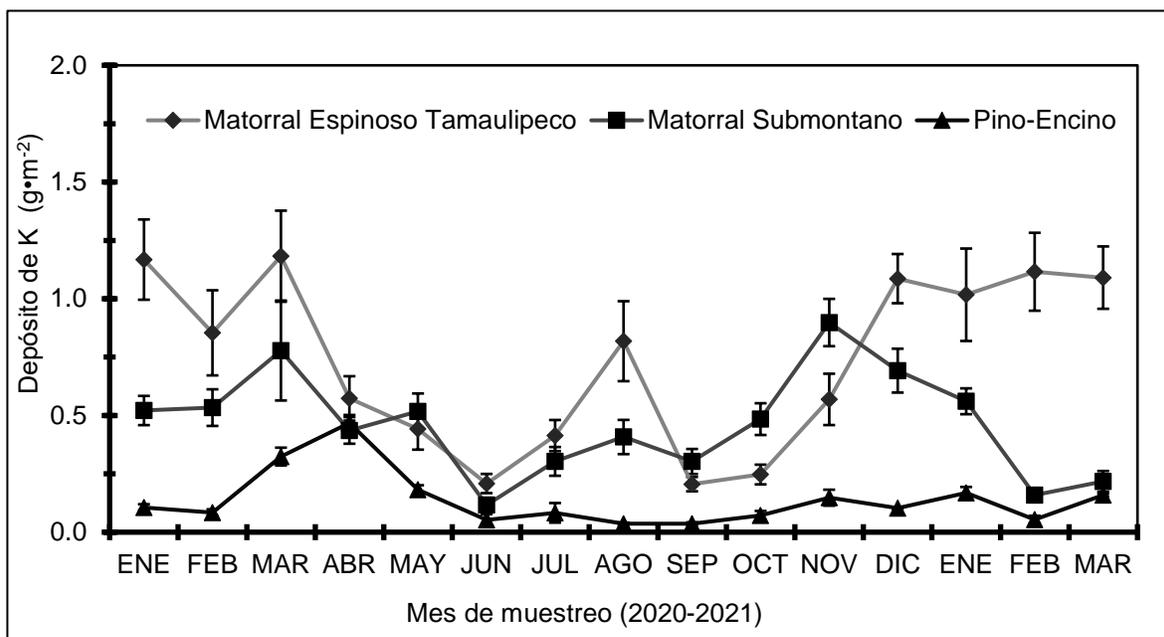


Figura 5. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de K en la hojarasca para los ecosistemas de estudio.

6.4.4 Depósito de Fósforo (P)

El depósito de P para el Matorral Espinoso Tamaulipeco fluctuó de 0.019 (julio 2020) a 0.064 (diciembre 2020) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; en el Matorral Submontano de 0.016 (febrero 2021) a 0.075 (noviembre 2020) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ y en el ecosistema de Pino-Encino de 0.004 (febrero 2021) a 0.045 (abril 2020) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$. El Bosque Pino-Encino presentó un depósito de P menor en todos los meses de muestreo respecto a los otros dos ecosistemas (Figura 6).

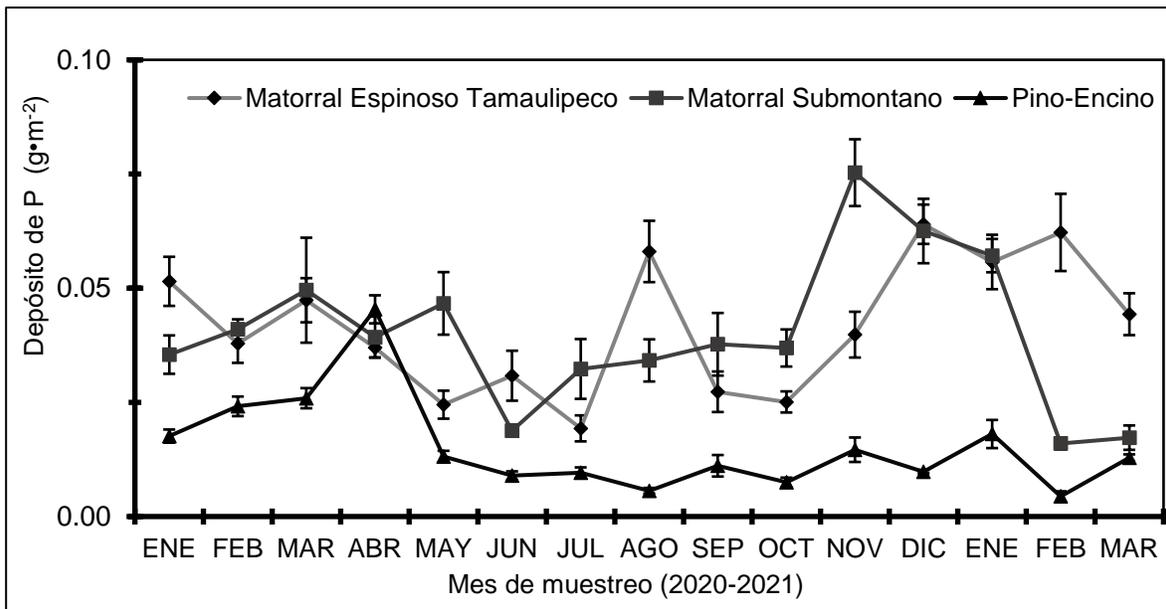


Figura 6. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de P en la hojarasca para los ecosistemas de estudio.

6.5 Dinámica del depósito mensual de micronutrientes

6.5.1 Depósito de Cobre (Cu)

El depósito de Cu para el Matorral Espinoso Tamaulipeco fluctuó de 0.17 (mayo 2020) a 0.74 (enero 2020) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$; en el Matorral Submontano de 0.09 (febrero 2021) a 0.48 (febrero y noviembre 2020) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ y en el ecosistema de Pino-Encino de 0.02 (agosto 2020) a 0.27 (febrero 2020) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$. El Bosque Pino-Encino presentó un depósito de Cu menor en todos los meses de muestreo respecto a los otros dos ecosistemas (Figura 7).

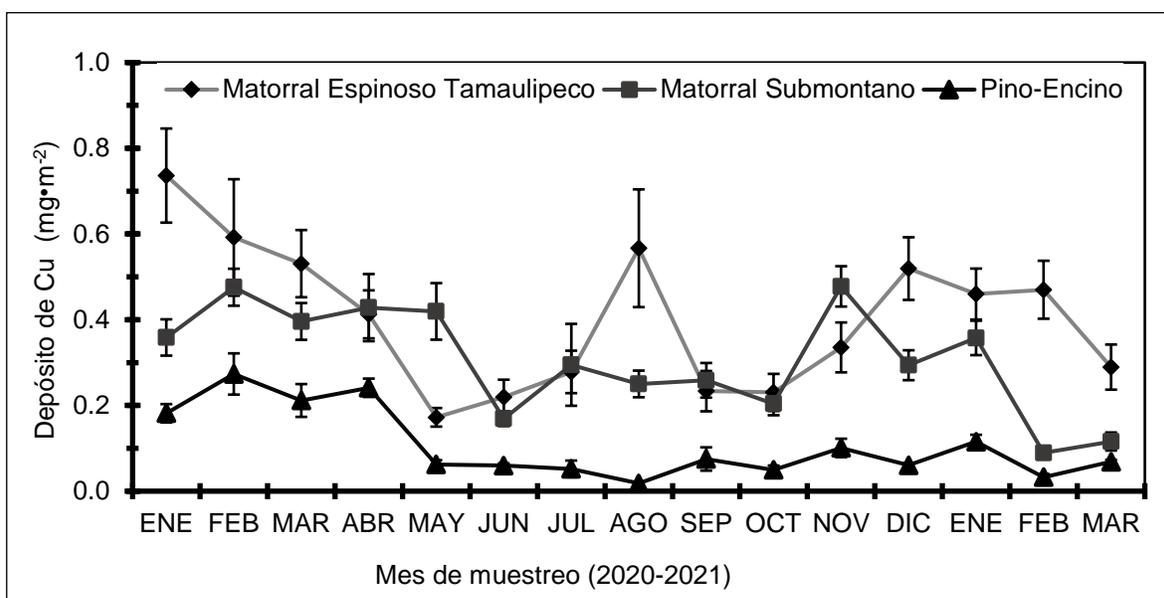


Figura 7. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de Cu en la hojarasca para los ecosistemas de estudio.

6.5.2 Depósito de Manganeso (Mn)

El depósito de Mn para el Matorral Espinoso Tamaulipeco fluctuó de 0.93 (junio 2020) a 3.37 (febrero 2021) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$; en el Matorral Submontano de 2.05 (junio 2020) a 8.34 (noviembre 2020) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ y en el ecosistema de Pino-Encino de 0.85 (agosto 2020) a 26.67 (marzo 2020) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$. En el Matorral Espinoso Tamaulipeco presentó un depósito de Mn menor casi en todos los meses de muestreo respecto a los otros dos ecosistemas (Figura 8).

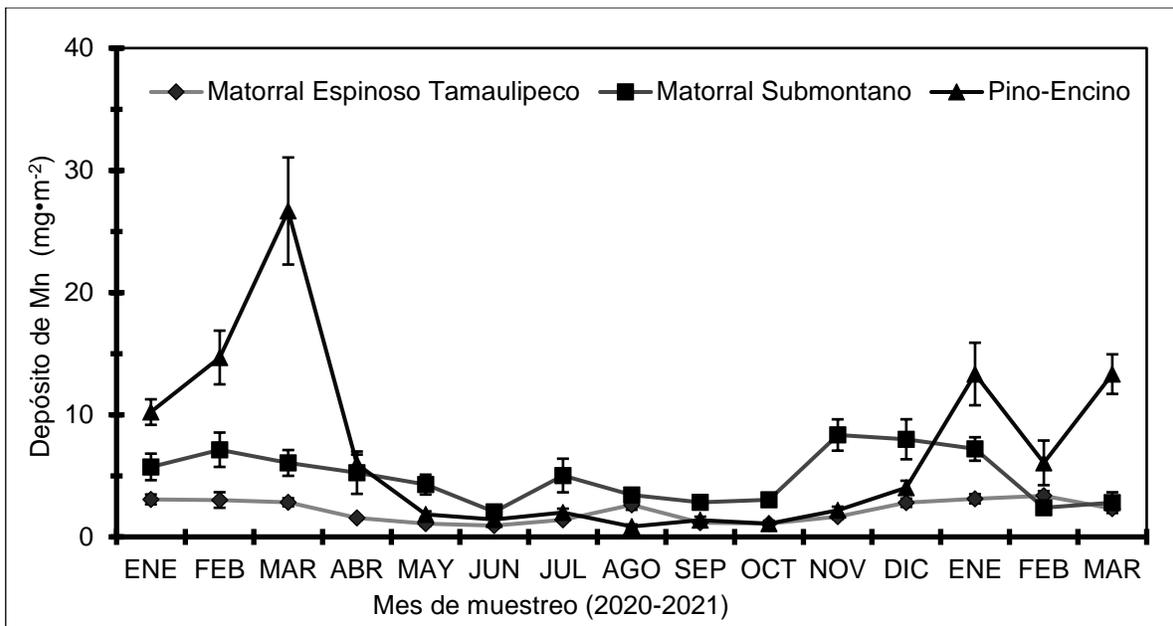


Figura 8. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de Mn en la hojarasca para los ecosistemas de estudio.

6.6 Depósito de Hierro (Fe)

El depósito de Fe para el Matorral Espinoso Tamaulipeco fluctuó de 4.86 (octubre 2020) a 25.54 (enero 2020) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$; en el Matorral Submontano de 5.41 (febrero 2021) a 36.02 (noviembre 2020) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ y en el ecosistema de Pino-Encino de 1.83 (agosto 2020) a 14.95 (abril 2020) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$. El Bosque de Pino-Encino presentó un depósito de Fe menor en casi en todos los meses de muestreo respecto a los otros dos ecosistemas (Figura 9).

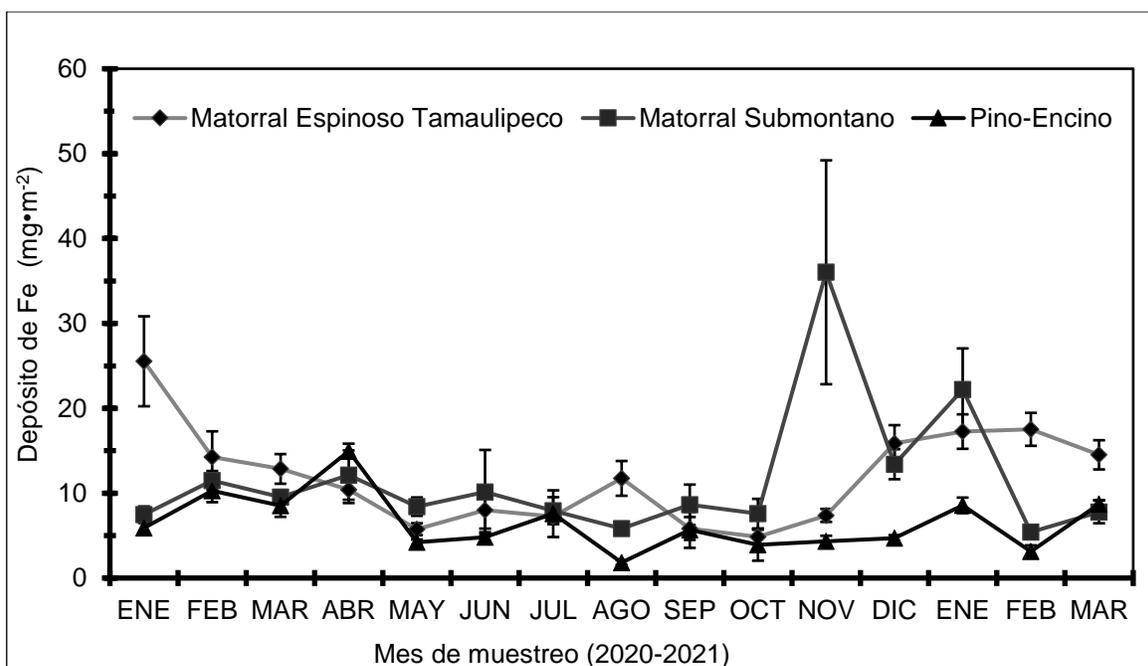


Figura 9. Depósito mensual (media \pm error estándar, n = 10) de Fe en la hojarasca para los ecosistemas de estudio.

6.6.1 Depósito de Cinc (Zn)

El depósito de Zn para el Matorral Espinoso Tamaulipeco fluctuó de 0.64 (mayo 2020) a 2.04 (enero 2020) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$; en el Matorral Submontano de 0.41 (febrero 2021) a 1.66 (noviembre 2020) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ y en el ecosistema de Pino-Encino de 0.27 (octubre 2020) a 2.84 (abril 2020) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$. El Bosque de Pino-Encino presentó un depósito de Zn menor en casi en todos los meses de muestreo respecto a los otros dos ecosistemas (Figura 10).

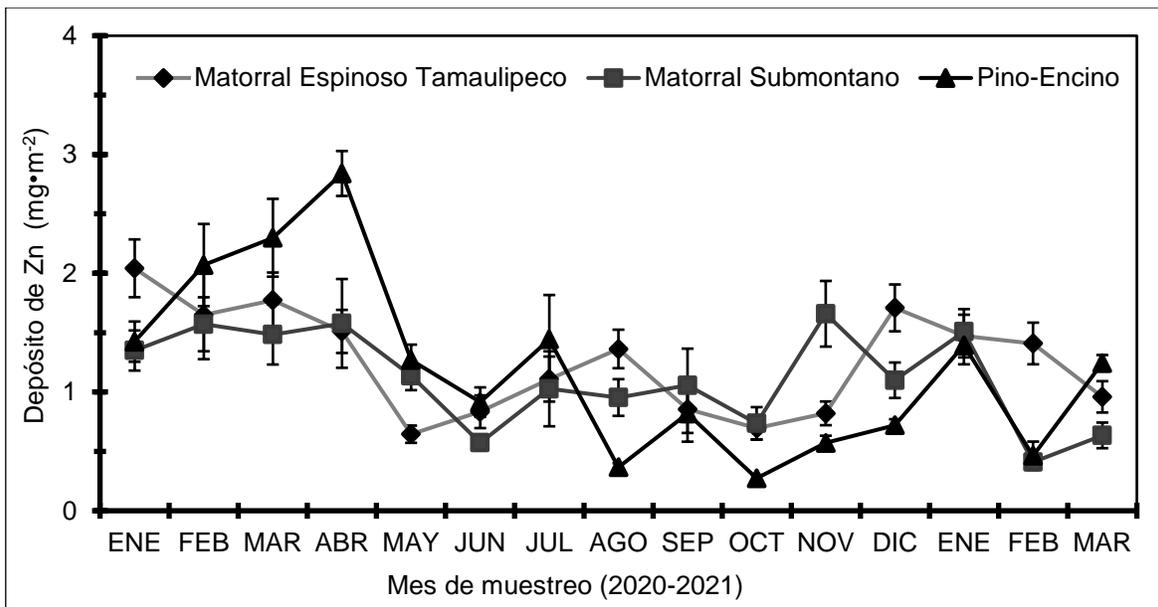


Figura 10. Depósito mensual (media \pm error estándar, $n = 10$) de Zn en la hojarasca para los ecosistemas de estudio.

7 DISCUSIÓN

7.1 Producción de hojarasca y depósito de micronutrientes

La cantidad de hojarasca depositada es muy importante para determinar la cantidad de nutrientes que aportan al suelo. El orden ascendente del depósito anual total de hojarasca para los tres ecosistemas de estudio fue de la siguiente manera: Matorral Submontano > Matorral Espinoso Tamaulipeco > Pino-Encino. La producción de hojarasca encontrado en el Matorral Submontano ($728.1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) fue mayor en este estudio al documentado por González-Rodríguez *et al.* (2018) en una zona de transición (ecotono) entre un bosque de pino-encino y matorral submontano, donde obteniendo un valor de $594.742 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$. Respecto a la producción anual de hojarasca en el ecosistema de Pino-Encino de la presente investigación es mayor al documentado por Domínguez-Gómez (2009) quien reporto una producción de $440.7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ en el mismo ecosistema de estudio. Sin embargo, fue menor que lo encontrado por Ramos Hernández *et al.* (2022) ($706.55 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) en el mismo tipo de vegetación, pero en diferentes áreas de estudio. El MET ostentó una productividad anual de hojarasca de $701.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, un valor superior al registrado por González-Rodríguez *et al.* (2019) en el mismo ecosistema de estudio ($495.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$). Sin embargo, la cantidad depositada en este ecosistema (Matorral Espinoso Tamaulipeco) del presente estudio, fue similar a lo reportado por López-Hernández *et al.* (2015) (613.7 y $703.3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) en el mismo tipo de vegetación, pero en diferentes sitios de estudio. Estas discrepancias en la caída de hojarasca entre los ecosistemas pueden atribuirse a varios factores como la cobertura, la fenología, las condiciones ambientales prevalecientes entre ellos (Ramírez-Lozano *et al.*, 2013). López- Hernández *et al.* (2013), al examinar la caída de hojarasca en tres ecosistemas dentro del mismo entorno, se determinó que el depósito de hojarasca osciló de 321.5 a $462.9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$.

El depósito potencial de micronutrientes en la hojarasca fue significativamente diferente entre los ecosistemas, excepto para el Zn (Cuadro 1). En general, se presentó el mayor depósito ($269 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) de micronutrientes (Cu+Mn+Fe+Zn), en el ecosistema de Matorral Submontano y la mayor cantidad ($728 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) de

hojarasca producida respecto a los ecosistemas de Matorral Espinoso Tamaulipeco y el Bosque de Pino-Encino. López-Hernández *et al.* (2013, 2015) encontraron que, en el ecosistema de Matorral Espinoso Tamaulipeco, a medida que la producción de hojarasca aumenta, también lo hacen los depósitos de nutrientes. En términos generales, las diferencias estadísticas identificadas entre los distintos ecosistemas estudiados se relacionan con la composición de la estructura vegetal y a las condiciones ambientales.

7.2 Depósito de macro-nutrientes

En la investigación actual, se observó que el orden de contribución anual de macronutrientes fue: Matorral Espinoso Tamaulipeco > Matorral Submontano > Pino-Encino, con depósitos totales de macronutrientes de 43.41, 43.36 y 14.32 g·m⁻²·año⁻¹, respectivamente. El rendimiento anual de los macronutrientes, incluyendo Ca, K, Mg y P, mostró una secuencia en los tres sitios estudiados: Ca > K > Mg > P. Se constató que el depósito anual de macronutrientes al suelo a través de la hojarasca fue superior en los ecosistemas de Matorral Espinoso Tamaulipeco y Matorral Submontano en comparación con el ecosistema de Pino-Encino. Este resultado se atribuye a una mayor producción de hojarasca y mayores depósitos de nutrientes en dicha capa.

Es interesante señalar que el orden de depósito de macronutrientes en este estudio coincide con los hallazgos previos en varios ecosistemas forestales. En particular, se ha observado que la abundancia relativa de nutrientes sigue la secuencia Ca > K > Mg > P, lo cual está respaldado por investigaciones anteriores (Rodríguez-Balboa, 2014; López-Hernández *et al.*, 2015; González-Rodríguez *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2019). Este patrón subraya la consistencia en la distribución de macronutrientes en diferentes contextos forestales, proporcionando una valiosa perspectiva sobre la dinámica nutricional en estos ecosistemas.

El depósito anual de calcio (Ca) en los ecosistemas de estudio se presenta en un orden jerárquico, siendo mayor en el ecosistema de Matorral Submontano > Matorral Espinoso Tamaulipeco > Pino-Encino. La cantidad de Ca depositada para bosques de Pino-Encino en la hojarasca se encuentra fuera de los límites

establecidos para esta comunidad vegetal, según lo señalado por investigadores previos como Domínguez-Gómez (2009), Rodríguez-Hernández (2010), Rodríguez-Balboa (2014), González-Rodríguez *et al.* (2018; 2019), que indican valores más bajos y que van desde 3.03 hasta 4.1 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$.

De la misma manera, las mediciones obtenidas en este estudio superan los valores informados por Yang *et al.* (2004) en bosques tropicales en China, quienes registraron depósitos de Ca en el rango de 3.2 a 6.2 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$. Además, los resultados obtenidos son mayores que los reportados por Zhu *et al.* (2019) para bosques tropicales secundarios, mientras que, en contraste, se observan valores inferiores a los documentados por Hansen *et al.* (2009) en bosques templados en Noruega. Estas variaciones subrayan la importancia de considerar la diversidad geográfica y climática al interpretar los patrones de depósito de Ca en los ecosistemas forestales.

El depósito anual del potasio (K) en los ecosistemas de estudio se presentó de la siguiente manera: Matorral Espinoso Tamaulipeco > Matorral Submontano > Pino-Encino. La variabilidad en el depósito de K osciló entre 2.08 y 10.99 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, respectivamente. Este valor es superior a lo documentado por Rodríguez-Hernández (2010), González-Rodríguez *et al.* (2018; 2019) y Erkan *et al.* (2020), quienes también informaron valores comparables en bosques de Pino-Encino. Cabe señalar que López-Hernández *et al.* (2015), en un Matorral Espinoso Tamaulipeco, documentaron intervalos de depósitos de K similares al de este estudio, variando entre 2.0 y 8.7 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$. Por otro lado, estudios de Jaimez y Franco (1999) en sistemas agroforestales revelaron depósitos de K en el orden de 2.4 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$. Estas divergencias en los valores observados podrían deberse a las diferencias en las características específicas de los ecosistemas estudiados y sus respectivas dinámicas ambientales.

En relación con el depósito de magnesio (Mg), la contribución se observó en el siguiente orden: Matorral Espinoso Tamaulipeco > Matorral Submontano > Pino-Encino. La variación en el depósito de Mg entre los ecosistemas evaluados osciló entre 1.49 y 4.26 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, respectivamente. Resultados superiores a lo

documentado por Hansen *et al.* (2009), Rodríguez-Hernández (2010), González-Rodríguez *et al.* (2018; 2019) y Erkan *et al.* (2020), llevados a cabo en diversas comunidades de bosques templados. Por otro lado, estos valores se situaron por encima de los obtenidos por López-López (2010) para *Pinus greggi* ($0.15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) y por debajo a lo documentados para bosques tropicales ($2.4 - 4.7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$; Zhu *et al.*, 2019). En un contexto diferente, González-Rodríguez *et al.* (2006) señaló depósitos de Mg de $0.4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ en el Matorral Espinoso Tamaulipeco. Los hallazgos resaltan la importancia de considerar la heterogeneidad de las comunidades forestales al analizar los ciclos biogeoquímicos, con implicaciones potenciales para la gestión y conservación de estos ecosistemas. Estas observaciones, respaldadas por investigaciones anteriores, contribuyen a nuestra comprensión integral de los procesos que afectan la distribución y disponibilidad de nutrientes en los bosques, lo que a su vez puede tener implicaciones significativas para la salud general de los ecosistemas forestales.

En cuanto el depósito anual de fósforo (P) al suelo forestal a través de la hojarasca, se observó que el orden de contribución fue el siguiente: Matorral Espinoso Tamaulipeco > Matorral Submontano > Pino-Encino, el depósito de P varió de 0.23 a $0.62 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, respectivamente. Estos valores son superiores a lo documentado por Hansen *et al.* (2009), González-Rodríguez *et al.* (2018; 2019), Koray y Tolmay (2020), Novák *et al.* (2020) y Erkan *et al.* (2020), quienes informaron valores en el rango de 0.14 a $0.33 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$. Sin embargo, es relevante destacar que los valores registrados en esta investigación se sitúan dentro de los límites reportados en la literatura científica. En particular, investigaciones llevadas a cabo por Yang *et al.* (2004), Paudel *et al.* (2015) y Zhu *et al.* (2019) en bosques tropicales indicaron depósitos de P en el rango de 0.44 a $1.74 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, cantidades considerablemente superiores a las observadas en bosques templados. Esta discrepancia subraya la importancia de considerar las variaciones regionales en los ciclos de nutrientes, resaltando la diversidad y complejidad de los ecosistemas forestales a nivel global.

7.3 Depósito de micro-nutrientes

En relación a los micronutrientes, los depósitos encontrados para cobre y zinc se consideraron valores elevados (4.59 y $16.77 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, respectivamente) es mayor comparados a lo documentado para el componente foliar en el MET (López-Hernández *et al.*, 2013; Gonzalez-Rodriguez *et al.*, 2018), obtuvieron los valores más altos para ambos elementos. Por otro lado, los valores de Cu reportados en este estudio son mayores que los encontrados para el Matorral Espinoso Tamaulipeco (0.8 , 1.24 y $2.79 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, López-Hernández *et al.*, 2013). Se observaron diferencias significativas ($p < .05$) en la caída anual de hojarasca (Cuadro 1). Las diferencias ($p < .05$) mensuales observadas entre los ecosistemas de estudio (Cuadro 2) pueden atribuirse a las estaciones secas y húmedas prevalecientes en dichas comunidades vegetales, así como también a temperaturas extremas (heladas) registradas entre Diciembre de 2020 y Febrero de 2021. Además, las variaciones mensuales en el depósito de la hojarasca entre los ecosistemas de estudio pueden ser resultado, en parte, de la dinámica de crecimiento, la densidad y diversidad florística, fenología y distribución de las especies presentes en dichos ecosistemas de estudio, así como al patrón de caída de los diversos componentes que conforman la hojarasca como se ha reportado por Domínguez-Gómez *et al.* (2013), Shen *et al.* (2019) y Ramos Hernández *et al.* (2022).

En lo que respecta al manganeso, fue mayor a lo documentado por López-Hernández *et al.* (2015) en el MET. Para el Fe, la situación es igual ya que, en comparación con las referencias documentadas, los depósitos fueron mayores a lo observado para el mismo sitio de estudio por López-Hernández *et al.* (2015). Mientras que, estos valores son similares a lo documentado por López-Hernández *et al.* (2013) pero son menores a los documentados por Gonzalez-Rodriguez *et al.* (2018) para este mismo sitio de estudio. A pesar de que se trata del mismo ecosistema de estudio, se observan diferencias significativas. Hipotéticamente estas desigualdades podrían atribuirse a diferencias en la producción de la hojarasca de cada ecosistema, a la calidad de la hojarasca en términos del contenido de nutrientes, la diversidad de plantas presentes en los diferentes ecosistemas y a las variables ambientales (Domínguez-Gómez *et al.*, 2013; Shen *et*

al., 2019). En cuanto al depósito de Zn, fue similar a lo documentado por Ramos Hernández *et al.* (2022) en el pino-encino y mayor a lo registrado por López-Hernández *et al.* (2015) en el MET.

7.3.1 Uso eficiente de nutrientes (UEN)

En la actual investigación, se observó que el UEN para el calcio (Ca) es menor a los valores documentados por López-Hernández *et al.* (2013) en el MET, aunque se asemeja a las cantidades observadas por González-Rodríguez *et al.* (2011). Las concentraciones de Ca en la UEN, registradas en este estudio (21.68 – 54.10) para los tres ecosistemas de estudio, se encuentran en el intervalo reportado por González-Rodríguez *et al.* (2019), aunque son inferiores a las obtenidas para bosques de pino-encino según López-Hernández *et al.* (2022). En relación con el UEN de potasio y magnesio, los valores encontrados en este estudio están dentro de los rangos observados por López-Hernández *et al.* (2022) para el MET. Los valores elevados de UEN registrados en el Bosque de Pino-Encino para Mg, K y Ca en comparación con el Matorral Espinoso Tamaulipeco y Matorral Submontano podrían estar vinculados a una escasa disponibilidad de estos nutrientes en la solución del suelo, lo que sugiere una fácil translocación a otras estructuras de las plantas antes que las hojas se vuelvan senescentes. Este fenómeno contribuiría a la generación de nuevas estructuras o procesos fisiológicos, como señala Palma *et al.* (2000). Quizá, estas diferencias en el retorno de nutrientes y la eficiencia en su utilización se deban a la influencia de diversos factores, como la precipitación, la fertilidad del suelo, la composición florística, la calidad de la hojarasca y el estrés hídrico. Dichos factores, como señalan Zhu *et al.* (2019), podrían desempeñar un papel crucial en la eficiencia general en la utilización de nutrientes.

8 CONCLUSIONES

La producción y acumulación de hojarasca mostraron unas variaciones entre ecosistemas en los diferentes meses de estudio, principalmente debido a las especies vegetales presentes y su distribución. El ecosistema de Matorral Submontano mostró la mayor caída de hojarasca, seguido por el ecosistema de MET y Bosques de Pino-Encino. Los análisis de micronutrientes mostraron una variación espacial y temporal entre ecosistemas. Para un ecosistema dado, el orden del depósito anual de micronutrientes fue el siguiente: $Fe > Mn > Zn > Cu$. La producción de hojarasca durante los quince meses de estudio fue de 728.1 (Matorral Submontano), 701.5 (Matorral Espinoso Tamaulipeco) y 574.9 $g \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$ (Pino-Encino). Los resultados de la presente investigación cumplen con la primera hipótesis planteada. Respecto al contenido de macro-nutrientes independientemente de los ecosistemas de estudio, el orden del depósito anual fue de la siguiente manera: $Ca > K > Mg > P$, mientras que para los micro-nutrientes fue: $Fe > Mn > Zn > Cu$, los resultados respecto a los contenidos de macronutrientes y micronutrientes mostraron una variación espacial y temporal entre ecosistemas. Además, los hallazgos de este estudio muestran la importancia del depósito de macro y micronutrientes y Uso Eficiente de Nutrientes a través de la caída de hojarasca, como un medio crucial para mantener la productividad primaria de los ecosistemas forestales. Sin embargo, se necesitan la realización de futuros estudios relacionados con la disposición de nutrientes para comprender mejor la contribución de la hojarasca y sus elementos en la dinámica de los ciclos biogeoquímicos en los bosques forestales. Respecto al Uso Eficiente de Nutrientes los resultados indican que el P es el elemento más limitante en los tres ecosistemas de estudio lo cual se encuentra poca disponibilidad para las plantas y el mayor UEN se observó en el ecosistema de Pino-Encino. Los resultados encontrados están asociados principalmente a la diversidad y estructura vegetal de cada ecosistema de estudio.

9 LITERATURA CITADA

- Aceñolaza, P. G., Zamboni, L. P. y Gallardo, J. F. 2006. Ciclos biogeoquímicos de bosques de la llanura de inundación del río Paraná (Argentina): Aporte de hojarasca. In: Gallardo, J. F. (ed.). Medioambiente en Iberoamérica. Visión desde la Física y la Química en los albores del siglo XXI. *Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental*. Badajoz, España. pp. 529-536.
- Aceñolaza, P.G., Zamboni, L.P., Gallardo, J.F. 2009. Aporte de hojarasca en bosques del Predelta del río Paraná, Argentina. *Bosque*, 303:135-145.
- Aerts, R. 1997. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos*. 79: 439-449.
- Alves, B., Lima, D., Paes, T. & de Souza, A. 2013. Dynamics of the production and decomposition of litterfall in a brazilian northeastern tropical forest (Sierra de Itabaiana National Park, Sergipe State). *Acta Scientiarum Biological Sciences*, 35(2): 195-201. Doi: 10.4025/actascibiolsoci.v35i2.11920.
- AOAC. 1997. Official Methods of Analysis (16 ed.). Association of official analytical chemists, Washington, DC.
- Aponte, C., L. Garcia y T. Marañón. 2012. Tree species effect on Litter decomposition and nutrient release in Mediterranean Oak forests changes over time. *Ecosystems*. 15: 1204-1218.
- Arce, U. C. 2007. Dinámica de descomposición y mineralización de macro nutrientes en hojarasca de plantaciones de *Ormosia coccinea* (Aubl.) Jscckson, "Huayruro" y *Vochysia lomatophylla* Standl. "Quillosa", Iquitos, Loreto, Perú. *Folia Amazónica*, 16(1-2):101-106. Doi.org/10.24841/fa.v16i1-2.293.
- Aryal, D. 2014. Dinámica de carbono en diferentes etapas sucesionales de la selva mediana sub-perennifolia en Calakmul, Campeche. Tesis de Doctorado. El Colegio de la Frontera Sur, Campeche, México. pp. 52-78.

- Belmonte-Serrato, F., Romero-Díaz, A. y López-Bermúdez, F. 1998. Producción de hojarasca en especies de Matorral Mediterráneo y su relación con algunos factores ambientales. *Nimbus*. 1(2): 5-16.
- Bonilla, R., B. Roncallo, J. Jimeno y T. García. 2008. Producción y descomposición de la hojarasca en bosques nativos y de *Leucaena* sp., en Codazzi, Cesar. *Corpoica: Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 9(2): 5-11.
- Bravo-Garza, M. R. 1999. Distribución de la materia orgánica del suelo en ecosistemas naturales e inducidos en el Estado de Nuevo León. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Forestales, UANL. Linares, Nuevo León. 84 pp.
- Cantú, I., González, H. 2002. Propiedades hidrológicas del dosel de los bosques de Pino-encino en el Noreste de México. *Ciencia UANL*, 5(1):72-77.
- Carmona-Pequeño, J.N. 2020. Producción de hojarasca y reciclado de nutrientes en tres ecosistemas forestales del Noreste de México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Linares, Nuevo León, México. 68 p.
- Carnevale, N. & Lewis, J. P. 2001. Litterfall and organic matter decomposition in a seasonal forest of the eastern Chaco (Argentina). *Revista Biología Tropical*, 49(1): 203-212. Recuperado el 1 de Enero de 2024 de http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442001000100019&lng=en&tlng=en.
- Castellano Barliza, J., León Peláez, J.D. 2010. Caída de hojarasca y dinámica de nutrientes en plantaciones de *Acacia mangium* (mimosaceae) de Antioquia, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 15(2):289-308. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=319027885020>. (9 de febrero de 2023).
- Castellanos-Barliza, J., Carmona-Escobar, V., Linero-Cueto, J., Ropain-Hernández, E., y León-Peláez, J. D. 2022. Fine Litter Dynamics in Tropical Dry Forests Located in Two Contrasting Landscapes of the Colombian Caribbean. *Forests*, 13, 660. <https://doi.org/10.3390/f13050660>.

- Colín-Vargas, C.I. 2019. Contenido de nutrimentos minerales en la hojarasca de bosques de Pino, Encino y Pino-Encino durante el proceso de descomposición. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Linares, Nuevo León, México. 51 p.
- Domínguez-Gómez, T.G. 2009. Deposición de hojarasca y retorno potencial de nutrimentos en diferentes comunidades de vegetación. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales, Linares, Nuevo León, México. 132 pp.
- Domínguez-Gómez, T.G., González-Rodríguez, H., Ramírez-Lozano, R.G., Estrada-Castillón, A.E., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M.V., Villarreal-Quintanilla, J.A., Alvarado, M.S., Alanís-Flores, G. 2013. Diversidad estructural del matorral espinoso tamaulipeco durante las épocas seca y húmeda. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17):106-123. Doi.org/10.29298/rmcf.v4i17.425.
- Erkan, N., Comez, A., Aydin, A. C. 2020. Litterfall production, carbon and nutrient return to the forest floor in *Pinus brutia* forests in Turkey. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 35(7): 341-350.
- Facelli, J., Pickett, S. 2008. Plant litter: its dynamics and effects on plant community. *Botanical Review*, 57:1-32.
- García, J., Jurado, E. 2008. Caracterización del matorral con condiciones prístinas en Linares, N.L., México. *Ra Ximhai*, 4(1):1-21.
- García, M. E. 1973. Modificación de sistema de clasificación climática de Köeppen; para adaptarlos a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía. UNAM. México, D.F. 243 p.
- García, M.E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. UNAM. México, D.F. Instituto de Geografía.

- García-Oliva, F., Hernández, G., Gallardo, J.F. 2006. Comparison of ecosystem C pools in three forests in Spain and Latin America. *Annals of Forest Science*, 63:519-523.
- Gonzales-Díaz, J.C. 2019. Contenido, uso eficiente de micro-elementos y depósito de hojarasca en tres ecosistemas forestales en el Noreste de México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Linares, Nuevo León, México. 48 p.
- González-Rodríguez, H., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M. V., Ramírez-Lozano, R. G., Uvalle-Saucedo, J. I. 2006. Producción de hojarasca y reciclado de nutrientes en el Matorral Espinoso Tamaulipeco en el Noreste de México. Memoria 2do. Congreso Latinoamericano IUFRO. La Serena, Chile. 296 p.
- González-Rodríguez, H., Cantú-Silva, I., Ramírez-Lozano, R.G., Gómez-Meza, M.V., Domínguez-Gómez, T.G., Bravo-Garza, J., Maiti, R.K. 2008. Spatial and seasonal litterfall deposition pattern in the Tamaulipan thorscrub, northeastern Mexico. *International Journal of Agriculture Environment & Biotechnology*, 1(4):177-181.
- 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. Litterfall deposition and nutrient return in pine-oak forests and scrublands in northeastern Mexico. *Madera y Bosques*, 25(3):e2531514. Doi: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*, 29:1307-1314. Doi:10.1007/s11676-017-0553-x.
- Hansen, K., Vesterdal, L., Kapper, I., Schmidt, I. K., Gundersen, P., Sevel, L., Bastrup-Birk, A., Pedersen, L. B., Bille-Hansen, J. 2009. Litterfall and nutrient

- return in five tree species in a common garden experiment. *Forest Ecology and Management*, 257(10): 2133-2144.
- Heal, O. W., Anderson, J. M. y Swift, M. J. 1997. Plant litter quality and decomposition. Cadisch, G. and Giller, K. E., eds. Wallingford, Oxon: CAB international, pp. 3-30.
- Hu, H., Wang, G. 2008. Cambios en el almacenamiento de carbono de la biomasa forestal en Carolina del Sur Piamonte entre 1936 y 2005. *Ecología y Ordenación Forestal*, 255(5-6):1400-1408.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2001. Diccionario de datos edafológicos (Alfanumérico). México. 33 p.
- Jaimez, R. E. y Franco, W. 1999. Producción de hojarasca, aporte en nutrientes y descomposición en sistemas agroforestales de cacao y frutales. *Agrotropica*, 11(1): 1-8.
- Karberg, N., N. Scott & C. Giardina. 2008. Methods for estimating litter decomposition. In: Hoover CM, editor. *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring*. New York: Springer Science Business Media B.V. pp. 103-111.
- Kimmins, J.P. 1997. *Forest ecology. A foundation for sustainable management*. Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Landsberg, J. J. & Gower, S. T. 1997. *Applications of physiological ecology to forest management*. Academic Press Co. New York, NY, USA. 345 p.
- León, J.D., Díez, M.C., Castellanos, J., Osorio, L.F., Marín, N. 2008. Grupos funcionales de microorganismos en suelos degradados por minería de aluvión plantados con *Acacia mangium*. *Suelos Ecuatoriales*, 38(1):75-80. <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbW FpbnxzdWVsb3NIY3VhdG9yaWFsZXN8Z3g6MjNjNjNkZjlhYjgyNzYzNA>. (10 de febrero de 2023).
- León-Peláez, J. D., Caicedo-Ruiz, W., & Castellanos-Barliza, J. 2021. Reactivation of nutrient cycling in an urban tropical dry forest after abandonment of

agricultural activities. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(3), 355–365. doi: 10.5154/r.rchscfa.2020.11.068

León-Peláez, J.D., Caicedo-Ruiz, W., Castellanos-Barliza, J. 2021. Reactivation of nutrient cycling in an urban tropical dry forest after abandonment of agricultural activities. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(3):355–365. doi: 10.5154/r.rchscfa.2020.11.068

López-Hernández, J.M., González-Rodríguez, H., Ramírez-Lozano, R.G., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M.V., Pando-Moreno, M., Estrada-Castillón, A.E. 2013. Producción de hojarasca y retorno potencial de nutrientes en tres ecosistemas del Estado de Nuevo León, México. *Polibotánica*, 35:41-64. <https://core.ac.uk/download/pdf/76596438.pdf>. (10 de febrero de 2023).

López-Hernández, J.M., González-Rodríguez, H., Ramírez-Lozano, R.G., Del Valle-Arango, J.I., Cantú-Silva, I., Pando-Moreno, M., Estrada-Castillón, A.E., Gómez-Meza, M.V. 2015. Producción de hojarasca y depósito potencial de nutrientes de las hojas en el Matorral Espinoso Tamaulipeco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(30):74-89. Doi:10.29298/rmcf.v6i30.209.

López-López, B. 2010. Cuantificación de nutrientes via hojarasca en el componente hojas, de dos especies de pinos plantados en Arteaga, Coahuila. Tesis de Licenciatura. División Agronomía, Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 62 pp.

Montaño, N.M., Ayala, F., Bullock, S.H., Briones, O., García Oliva, F., García Sánchez, R. Yépez, E. 2016. Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34(1):39-59.

Mooney, H.A., Canadell, J., Chapin III, F.S., Ehleringer, J.R., Körner, Ch., McMurtrie, M.R., Parton, W.J., Pitelka, L.F., Schulze, E.-D. 1999. Ecosystem physiology responses to global change. Pp. 141-189. In: B. Walker, W. Steffen, J. Canadell, & J. Ingram (eds.). *The Terrestrial Biosphere and Global Change*:

Implications for Natural and Managed Ecosystems. Cambridge. Cambridge University Press.

Negrete, S., C. Fragoso, A. Newton, G. Russell & O. Heal. 2008. Species specific characteristics of trees can determine the litter macro-invertebrate community and decomposition process below their canopies. *Plant and Soil*. 307: 83-97.

Oliver, L., Pérez-Corona, M.E., de Castro, F.B. 2002. Degradación de la hojarasca en un pastizal oligotrófico mediterráneo del centro de la Península Ibérica. *Anales de Biología*, 24:21-32.

Ott, L. 1993. An introduction to statistical methods and data analysis. 2nd Edition. Duxbury Press. Boston, USA. 775 p.

Polyakova, O. & Billor, N. 2007. Impact of deciduous tree species on litterfall quality, decomposition rates and nutrient circulation in pine stands. *Forest Ecology and Management*, 253: 11-18. DOI:10.1016/j.foreco.2007.06.049.

Ramírez-Lozano, R., Domínguez-Gómez, T.G., González-Rodríguez, H., Cantú-Silva, I., Gómez Meza, M.V., Sarquís-Ramírez, J.I., Jurado, E. 2013. Composición y diversidad de la vegetación en cuatro ecosistemas del noreste de México. *Madera y Bosques*, 19(2):59-72. Doi:10.21829/myb.2013.192340.

Ramos Hernández, C.G., López Hernández, J.M., Cantú Silva, I., Yáñez Díaz, M.I., Himmelsbash, W., González Rodríguez, H. 2022. Producción de hojarasca y depósito potencial de micronutrientes de la hojarasca en bosque de pino, encino y pino-encino, en el noreste de México. *e-CUCBA*, 19:72-80. Doi.org/10.32870/ecucba.vi19.265.

Rodrigues, E., Machado, S., Martins, S., Piccolo, M., Lamano, M., Barbosa, P., Braga, J., Mazzi, E., Houlton B. & Martinelli, L. 2017. Masa de basura y flujos de nutrientes sobre un gradiente altitudinal en la Mata Atlántica costera, Brasil. *Revista de Ecología Tropical*, 33: 261-269.

Rodríguez-Balboa, P. C. 2014. Deposición de hojarasca y nutrientes vía hojas, en tres sitios del Noreste de México. Tesis de Licenciatura. Universidad

Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Linares, Nuevo León, México. 75 p.

Rodríguez-Hernández, E. J. S. 2010. Producción de hojarasca y retorno potencial de nutrimentos, vía hojas en diferentes tipos de vegetación, Noreste de México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Linares, Nuevo León, México. 60 p.

Sánchez, P., Palm, C.A. 2006. Reciclaje de nutrientes y agrosilvicultura en África. *Agroforestry Systems*, 30(1):5-55. Verificar cita

Sayer, E.J., Rodtassana, C., Sheldrake, M., Bréchet, L.M., Ashford, O.S., Lopez-Sangil, L., Kerdraon-Byrne, D., Castro, B., Turner, B.L., Wright, S.J., *et al.* 2020. Revisiting nutrient cycling by litterfall-Insights from 15 years of litter manipulation in old-growth lowland tropical forest. In: *Advances in Ecological Research*. Academic Press, Cambridge, MA, USA; Volume 62, pp. 173–223.

Schlatter, J.E, Gerding, V., Calderón, S. 2006. Aporte de la hojarasca al ciclo biogeoquímico en plantaciones de *Eucalyptus nitens*, X Región, Chile. *Bosque*, 27(2):115-125. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002006000200006>.

Schlesinger, W.H. 1997. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. New York. National Academic Press.

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.

Souza, S., Veloso, M., Espírito, M., Silva, J., Sánchez, A., Brito B. E. & G. Wilson. 2019. Litterfall dynamics along a successional gradient in a Brazilian tropical dry forest. *Forest Ecosystems*, 6: 35. DOI:10.1186/s40663-019-0194-y.

Steel R. y J. Torrie. 1980. *Principles and procedures of statistics. A biometrical approach*. 2nd Edn. McGraw-Hill Book Company. New York. 633 p.

Swamy, S. L., Kushwaha, S. K. & Puri, S. 2004. Tree growth, biomass, allometry and nutrient distribution in *Gmelina arborea* stands grown in red lateritic soils

- of central India. *Biomass and Bioenergy*, 26: 305-317. DOI:10.1016/j.biombioe.2003.08.007.
- Tesfaye, M., Gardi, O., Bekele, T. & Blaser, J. 2019. Temporal variation of ecosystem carbon pools along altitudinal gradient and slope: the case of Chilimo dry afro-montane natural forest, Central Highlands of Ethiopia. *Journal of Ecology and Environment*, 43(17): 2. DOI:10.1186/s41610-019-0112-9.
- Vitousek, P. 1984. Litterfall, nutrient cycling and nutrient limitation in tropical forest. *Ecology*, 65: 285-298.
- Vitousek, P.M., Sanford, R.L. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forest. *Annual Review Ecology and Systematics*, 17:137-167. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.17.110186.001033>.
- Vivanco, L. & A. Austin. 2008. Tree species identity alters forest litter decomposition through long-term plant and soil interactions in Patagonia, Argentina. *Journal of Ecology*. 96: 727-36.
- 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. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.10.026.
- Williams-Linera, G., Bonilla-Moheno, M., López-Barrera, F., Tolome, J. 2021. Litterfall, vegetation structure and tree composition as indicators of functional recovery in passive and active tropical cloud forest restoration. *Forest Ecology and Management*, 493:119260. doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119260.
- Williams-Linera, G., Bonilla-Moheno, M., López-Barrera, F., Tolome, J. 2021. Litterfall, vegetation structure and tree composition as indicators of functional recovery in passive and active tropical cloud forest restoration. *Forest Ecology and Management*, 493, 119260. doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119260.

- Yang, Y. S., Guo, J. F., Chen, G. S., Xie, J. S., Cai, L. P., 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(5): 465-476.
- Yañez-García, L.G. 2021. Productividad de hojarasca en tres ecosistemas forestales del noreste de México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Linares, Nuevo León, México. 54 p.
- Zamboni, P. y Aceñolaza, P. 2004. Aporte al conocimiento de ciclos de materia orgánica en formaciones boscosas de la llanura de inundación del río Paraná. *Serie Miscelánea INSUGEO-CONICET*, 12: 5-12.
- 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.