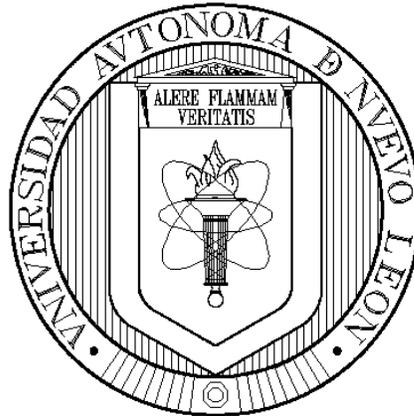


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO



**DEGRADACIÓN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA HOJARASCA
EN BOSQUES DE PINO, PINO-ENCINO Y ENCINO EN NUEVO
LEÓN, MÉXICO**

PRESENTA:

PERLA CECILIA RODRÍGUEZ BALBOA

Como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES**

FEBRERO DEL 2020

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



**DEGRADACIÓN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA HOJARASCA
EN BOSQUES DE PINO, PINO-ENCINO Y ENCINO EN NUEVO
LEÓN, MÉXICO**

Por:

PERLA CECILIA RODRÍGUEZ BALBOA

Como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES**

FEBRERO DEL 2020

DEGRADACIÓN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA HOJARASCA EN BOSQUES DE PINO, PINO-ENCINO Y ENCINO EN NUEVO LEÓN, MÉXICO

Aprobación de Tesis



Dr. Humberto González Rodríguez
Director



Dr. Israel Cantú Silva
Co- Director



Dra. Marisela Pando Moreno
Asesor



Dr. José Guadalupe Marmolejo Monsiváis
Asesor



Dr. Marco Vinicio Gómez Meza
Asesor Externo

FEBRERO DE 2020

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para la realización del Posgrado y por el financiamiento del proyecto clave 250732 para llevar a cabo la presente investigación.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León pero principalmente a la Facultad de Ciencias Forestales, por todas las atenciones brindadas para la realización de mi Posgrado, gracias a todo el personal docente por transmitir conocimientos a lo largo de mi preparación profesional y personal no docente por todo el apoyo y palabras de motivación para culminar mis estudios.

Al Dr. Humberto González Rodríguez, por aceptarme para la realización de la presente investigación desde licenciatura ha sido mi director de tesis y eso me llena de satisfacción, por todo el tiempo destinado para asesorías de la presente investigación y por compartir cada una de sus experiencias, por toda su confianza y paciencia, pero sobre todo por forjar en mi persona el interés de la investigación.

Al Dr. Israel Cantú Silva, por su tiempo destinado para la revisión de la presente investigación y por cada uno de los consejos para mejorar la investigación.

A la Dra. Marisela Pando Moreno, por sus acertadas sugerencias para mejorar el desarrollo del trabajo de investigación.

Al Dr. José Guadalupe Marmolejo Monsiváis, por formar parte de mi comité de tesis y por dedicar tiempo para la revisión de la presente investigación.

Al Dr. Roque Gonzalo Ramírez Lozano (†), por todo el apoyo que me brindó desde licenciatura, me hubiera gustado que estuviera presente en el último escalón profesional, más sin embargo le agradezco todo su apoyo y dedicación en la revisión del presente trabajo y las asesorías brindadas.

Al Dr. Marco Vinicio Gómez Meza, por formar parte del comité de tesis y por cada asesoría brindada en los análisis estadísticos, por tener disponibilidad para atender mis dudas.

Al Dr. Jorge Ignacio del Valle Arango, por recibirme en la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, por todo su apoyo en el tiempo que realicé la estancia de investigación, infinitas gracias por apoyar desinteresadamente en las dudas surgidas de la presente investigación.

A todo el personal de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, por abrirme las puertas para realizar la estancia de investigación, por apoyarme en cada día que pase en la Universidad. A los alumnos de maestría y doctorado que ayudaron a llevar más amena la estancia.

Al Dr. Juan Manuel López Hernández, por su tiempo en asesorías y compartir sus conocimientos para mejorar la presente investigación.

A la señora Elsa González Serna, por todo su apoyo en los análisis realizados en el laboratorio, por su tiempo destinado en la revisión de los datos, por todos sus consejos para mejorar el trabajo de laboratorio.

A Don Manuel Hernández Charles, por todo su apoyo en campo, por tener el tiempo disponible para apoyarme en recolectar muestras, por cada consejo brindado durante todo este tiempo, por todo su apoyo desinteresadamente.

A mis compañeros de laboratorio: Jonathan, Miguel, Junco, Vero, Claudia, Anita, Filio, Carmona, Blanca, Norma, Azael, por brindarme su amistad a lo largo de mi estancia en el laboratorio, muchas gracias.

A Karina Concepción Briseño, por todo su apoyo en los análisis de laboratorio, por su amistad desinteresadamente.

A mis compañeros de generación, con los cuales viví experiencias inolvidables: Richi, Dora, Ulises, Papo y Rigo, gracias por su amistad!

Al resto de alumnos del programa de doctorado y maestría, con los cuales compartí ratos agradables de sana convivencia, la lista es larga pero les agradezco todo su apoyo y amistad.

DEDICATORIA

Principámente a Díos por la vida y por permitir llegar a concluir esta etapa profesional y un nuevo reto en mí vida, el cual creí imposible.

A mí papá Ramón Rodríguez donde quiera que esté por todo su esfuerzo por brindarme la oportunidad de superarme, ya que sin él no estaría en este punto de mí vida, por nunca dejarme sola y espero no haberlo defraudado y sobre todo por todo su amor y apoyo. A mí mamá Rosaura Balboa por todo su apoyo a lo largo de todo este tiempo y por nunca desanimarme en mí etapa profesional.

A mis hermanos Rafael, Irma y Lizeth, por todo su cariño y apoyo incondicional, a pesar de las adversidades.

A mí esposo Jonathan por todo su amor, comprensión y todo su apoyo en la realización del presente trabajo, por estar siempre a mí lado cuando más lo necesito, te amo tanto. Le agradezco infinitamente a Díos el ponerte en mí camino y espero que siempre estemos así.

Al amor más grande que puedo tener mí hija Aylín Monserrat que llegó a nuestras vidas a llenar ese hueco y hacer más fuerte y grande nuestro amor, gracias por tu sonrisa y por darme fuerzas para salir adelante. Te amo tanto mí princesa! Gracias por todo tu apoyo en la realización del presente trabajo, porque a pesar de tu corta edad me permitiste cumplir mí sueño y apoyaste en la realización del mismo.

Al nuevo integrante de la familia mí hijo Jonathan, por enseñarme que todo se puede en esta vida y que nada impide cumplir las metas que se han planeado, ahora que te conozco le doy gracias a Díos por elegirme para ser tu madre y compartir este amor entre ustedes.

A toda mí familia gracias por todo su apoyo en todo este tiempo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE TABLAS (ANEXOS).....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN	x
SUMMARY	xii
INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	3
HIPÓTESIS.....	4
OBJETIVO.....	4
OBJETIVO GENERAL.....	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
ESTRUCTURA DE LA TESIS	5
CAPÍTULO I: DINÁMICA DE NUTRIENTES EN SUELOS DEL MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO	6
Factores involucrados en la dinámica de nutrientes	6
Calidad de la hojarasca.....	7
Temperatura y Precipitación.....	7
Factores del suelo involucrados en la dinámica de nutrientes.....	8
Factores físicos	8
Textura.....	8
Humedad del suelo	8
Densidad aparente.....	8
Factores químicos	9
pH.....	9

Papel de los microorganismos en la degradación de la hojarasca	9
Diversidad microbiana	9
Balance entre mineralización e inmovilización microbiana	10
Mineralización de nitrógeno	10
Métodos para evaluar la mineralización	11
Inmovilización microbiana	11
Importancia de la hojarasca en la dinámica de los nutrientes	12
Importancia de la materia orgánica en la dinámica de los nutrientes	13
Importancia de los nutrientes en el suelo	14
Macronutrientes	14
Micronutrientes	14
Principales ciclos de nutrientes.....	15
Ciclo del Nitrógeno	15
Ciclo del Carbono	15
Ciclo del Azufre.....	16
Ciclo del Fósforo.....	16
Ciclo del Potasio	17
Funciones de los nutrientes.....	18
Isótopos en el ciclo de nutrientes.....	19
Estudios de nutrientes en el Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET).....	19
Discusión	21
Resumen	24
Abstract.....	24
CAPÍTULO II: MODELOS DE DEGRADACIÓN DE LA HOJARASCA EN BOSQUES DE ENCINO Y DE PINO EN NUEVO LEÓN.....	25

Resumen	25
Abstract.....	25
Introducción	26
Materiales y métodos.....	27
El área de estudio.....	27
Variables ambientales.....	28
Degradación de la hojarasca y frecuencia de recolecta	28
Análisis estadísticos	30
Resultados y Discusión.....	31
Variables ambientales.....	31
Degradación de la hojarasca.....	32
Modelos de descomposición	35
Tasa de degradación de la hojarasca	38
CAPÍTULO III: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA HOJARASCA DURANTE EL PROCESO DE DESCOMPOSICIÓN EN BOSQUES TEMPLADOS (BORRADOR SIN REVISIÓN)	40
Resumen	40
Summary	41
Introducción	42
Materiales y métodos.....	44
Área de estudio	44
Colecta de muestras de degradación.....	44
Análisis Químico en Laboratorio	46
Variables ambientales.....	47
Análisis estadísticos	48
Resultados y Discusión.....	49

Descomposición y Masa Remanente de la hojarasca.....	49
Materia seca residual de la hojarasca	51
Tasa de descomposición.....	52
Composición Química de la hojarasca.....	53
Contenido de Nitrógeno.....	55
Contenido de Carbono.....	56
Relación Carbono/Nitrógeno	57
Contenido de Lignina.....	58
Relación Lignina/Nitrógeno.....	59
Contenido de Fósforo	60
Relación Nitrógeno/Fósforo	61
Correlación entre la masa remanente de la hojarasca, las variables ambientales y la composición química de la hojarasca	62
CONCLUSIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXOS.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Funciones principales de macro y micro-nutrientes y la forma disponible de asimilación por las plantas entre paréntesis (Taiz y Zeiger, 2002; Salisbury y Ross, 1985).....	18
Tabla 2. Estudios relacionados al aporte de nutrientes en el MET.....	19
Tabla 3. Modelos de regresión ajustados para la estimación de la fracción de hojarasca remanente durante el período de estudio para los tres tipos de bosques.	37
Tabla 4. Tasa de degradación (k) para degradar 50 y 99 % de la hojarasca representada en años en los tres tipos de bosque.	38
Tabla 5. Temperatura del aire (°C), temperatura del suelo (°C) y humedad relativa (%) media mensual y precipitación (mm) registrada en el tiempo (días) de incubación (2016-2018).	47
Tabla 6. Resultados de la prueba Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los ecosistemas estudiados a los diferentes tiempos de incubación respecto a la degradación, masa remanente y materia seca residual de la hojarasca.....	50
Tabla 7. Modelos de regresión ajustados para materia seca residual en función del tiempo de incubación de la hojarasca en tres tipos de bosque templado en el noreste de México. Tasas de descomposición k (año ⁻¹)	52
Tabla 8. Resultados de la prueba Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los ecosistemas a diferentes tiempos de incubación respecto a la composición química de la hojarasca. Carbono (C), Nitrógeno (N), Relación CN (CN), Lignina (L), Relación LN (LN), Fósforo (P), Relación NP (NP).Espacios en blanco significa que no se analizaron las muestras.	54
Tabla 9. Coeficientes de correlación de Spearman (n=360 para N y CN; n=150 para P, NP, L y LN) entre la masa remanente, degradación, variables ambientales. El valor del coeficiente de correlación se ilustra en la parte superior de la línea y el valor de significancia se presenta en la parte inferior de la línea diagonal.	56

ÍNDICE DE TABLAS (ANEXOS)

Tabla A 1. Resultados de las pruebas de normalidad para el total de observaciones en las variables analizadas. Valores p en negritas ($p < 0.05$), indican que no existe homogeneidad de varianzas ni distribución normal.....	72
Tabla A 2. Resultados de las pruebas de normalidad, por sitio de estudio y variable analizada. Valores p en negritas ($p < 0.05$), indican que no existe homogeneidad de varianzas ni distribución normal.	72
Tabla A 3. Resultados de las pruebas de normalidad para todas las observaciones del contenido de C y N, y Relación CN. Valores p en negritas ($p < 0.05$), indican que no existe homogeneidad de varianzas ni distribución normal.....	73
Tabla A 4. Resultados de las pruebas de normalidad, por sitio de estudio y contenido de C y N, y Relación CN. Valores p en negritas ($p < 0.05$), indican que no existe homogeneidad de varianzas ni distribución normal.	73
Tabla A 5. Resultados de las pruebas de normalidad para todas las observaciones del contenido de lignina, N, P, Relación LN y Relación NP. Valores p en negritas ($p < 0.05$), indican que no existe homogeneidad de varianzas ni distribución normal.....	74
Tabla A 6. Resultados de las pruebas de normalidad, por sitio de estudio y contenido de lignina, N, P, Relación LN y Relación NP. Valores p en negritas ($p < 0.05$), indican que no existe homogeneidad de varianzas ni distribución normal.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.....	28
Figura 2. Temperatura ambiente (°C), Temperatura del suelo (°C), humedad relativa (%) y precipitación pluvial (mm) registrada durante el ensayo.	31
Figura 3. Degradación de la hojarasca (%) de los tres tipos de bosques en el noreste de México. Cada Valor graficado representa la media ($n=10 \pm$ error estándar). El valor de p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias entre los tipos de bosques en cada tiempo de duración del ensayo se muestra dentro de la gráfica. Probabilidades en negritas (parte superior) indican diferencias significativas. BE= Bosque de Encino; BPE= Bosque de Pino-Encino; BP Bosque de Pino.....	33
Figura 4. Predicción de la degradación de la hojarasca por tiempo de duración del ensayo en los tres tipos de bosques.	39
Figura 5. Área de estudio.....	44
Figura 6. Bolsas de degradación en campo (izquierda) y colecta de las bolsas de degradación a diferentes tiempos de incubación (días).....	45
Figura 7. Limpieza de las bolsas de degradación (izquierda) y determinación de peso seco a 65 °C en una estufa de aire forzado.	45
Figura 8. Determinación de C y N en el equipo analizador de CHNS/O (a); determinación de P por colorimetría en espectrofotómetro UV (b); determinación de lignina con los procedimientos descritos por Van Soest et al. 1991, mediante el procedimiento de H ₂ SO ₄ al 72% (c) y (d).	46
Figura 9. Materia Seca Residual (X_t/X_0) de la hojarasca por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques estudiados. Cada valor graficado representa la media ($n= 10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la figura. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino).....	51

Figura 10. Contenido de nitrógeno en la hojarasca por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques presentes en el sitio de estudio. Cada valor graficado representa la media ($n= 10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la gráfica. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino). 55

Figura 11. Contenido de carbono en la hojarasca por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques presentes en el sitio de estudio. Cada valor graficado representa la media ($n= 10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la gráfica. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino). 56

Figura 12. Relación carbono/nitrógeno por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques presentes en el sitio de estudio. Cada valor graficado representa la media ($n= 10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la gráfica. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino). 57

Figura 13. Contenido de lignina en la hojarasca por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques presentes en el sitio de estudio. Cada valor graficado representa la media ($n= 10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la gráfica. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino). 58

Figura 14. Relación lignina/nitrógeno por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques presentes en el sitio de estudio. Cada valor graficado representa la media ($n= 10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para

detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la gráfica. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino)..... 59

Figura 15. Contenido de fósforo en la hojarasca por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques presentes en el sitio de estudio. Cada valor graficado representa la media ($n= 10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la gráfica. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino). 60

Figura 16. Relación nitrógeno/fósforo por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques presentes en el sitio de estudio. Cada valor graficado representa la media ($n= 10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la gráfica. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino)..... 61

RESUMEN

La descomposición de residuos vegetales determina la disponibilidad de nutrientes que se reincorporan al suelo, por lo que se puede afirmar que la descomposición es un proceso que está relacionado con la fertilidad del suelo, el reciclaje de los nutrientes, la diversidad de organismos desintegradores. La calidad de la hojarasca es un indicador que favorece o limita la descomposición y por tal motivo la reincorporación de los nutrientes al suelo. Por motivo el objetivo del presente estudio fue evaluar la tasa de degradación durante 16 meses (510 días), la composición química de la hojarasca, las características físicas y químicas del suelo, la composición y estructura de la vegetación y las variables ambientales (temperatura del aire, humedad relativa, precipitación y temperatura del suelo), las cuales se correlacionaron con la degradación para conocer si influyen en la degradación, el estudio fue llevado a cabo en el Campus Ecológico “Bosque Escuela” de la Universidad Autónoma de Nuevo León, ubicado en el municipio de Iturbide, Nuevo León. En el cual se analizaron tres tipos de bosque templado (bosque de encino: BE, bosque de pino-encino: BPE y bosque de pino: BP). Las variables evaluadas para la calidad de la hojarasca fueron carbono (C), nitrógeno (N), relación CN, lignina (L), relación LN, fósforo (P), relación NP. Los resultados encontrados para cada variable estudiada son los siguientes: la tasa de degradación fue mayor en el bosque de encino con un valor de -0.259 (BE) y para bosque de pino fue de -0.158, la degradación al final del estudio fue de 27 (BP) a 38.1% (BE), lo que nos indica que la degradación es más lenta en el bosque de pino (BP). En cuanto a la composición química analizada los resultados fueron los siguientes: para el día 0 el contenido de nitrógeno fue de 0.7490 (BPE) a 1.3430% (BE), carbono los valores fluctuaron de 53.47 (BP) a 55.17% (BE), relación CN de 45.13 (BE) a 93.70 (BP), lignina de 41.46 (BE) a 55.79% (BP), relación LN de 34.30 (BE) a 98.11 (BP), fósforo de 0.0327 (BP) a 0.0672% (BPE), relación NP de 11.61 (BPE) a 30.29 (BP). Presentaron diferencias significativas entre los tres tipos de bosques y en los tiempos de incubación representados en días. Por otro lado la correlación de Spearman de

la masa remanente con las variables ambientales, los resultados mostraron una relación negativa con valores que van de -0.068 (temperatura del suelo), -0.107 (humedad relativa), -0.258 (temperatura del aire) y -0.384 (precipitación); con base a los resultados descritos se puede afirmar que la precipitación y la temperatura del aire son las variables ambientales que más influyen en la descomposición de la hojarasca y las cuales presentan diferencias significativas.

SUMMARY

The decomposition of plant waste determines the availability of nutrients that are reincorporated into the soil, so it can be said that decomposition is a process that is related to soil fertility, the recycling of nutrients, the diversity of disintegrating organisms. The quality of litterfall is an indicator that favors or limits decomposition and therefore the reincorporation of nutrients into the soil. For this reason, the objective of the present study was to evaluate the degradation rate during 16 months (510 days), the chemical composition of the litterfall, the physical and chemical characteristics of the soil, the composition and structure of the vegetation and the environmental variables (air temperature, relative humidity, precipitation and soil temperature), which were correlated with the degradation to know if they influence the degradation. The study was carried out in the Campus Ecologico "Bosque Escuela" of the Universidad Autonoma de Nuevo Leon, located in the municipality of Iturbide, Nuevo Leon. In which three types of temperate forest were analyzed (oak forest: BE, pine-oak forest: BPE and pine forest: BP). The variables evaluated for leaf litter quality were carbon (C), nitrogen (N), CN ratio, lignin (L), LN ratio, phosphorus (P), and NP ratio. The results found for each variable studied are the following: the degradation rate was higher in the oak forest with a value of -0.2592 (BE) and for pine forest was -0.1579, the degradation at the end of the study was from 17.16 (BP) to 27.63% (BE), which indicates that degradation is slower in the pine forest (BP). As for the chemical composition analyzed the results were as follows: for day 0 the nitrogen content was from 0.7490 (BPE) to 1.3430% (BE), carbon values fluctuated from 53.47 (BP) to 55.17% (BE), CN ratio of 45.13 (BE) to 93.70 (BP), lignin from 41.46 (BE) to 55.79% (BP), LN ratio from 34.30 (BE) to 98.11 (BP), phosphorus from 0.0327 (BP) to 0.0672% (BPE), NP ratio from 11.61 (BPE) to 30.29 (BP). They presented significant differences between the three types of forests and in the incubation times represented in days. On the other hand, Spearman's correlation of the remaining mass with the environmental variables, the results showed a negative relationship, with values ranging from -0.068 (soil temperature), -0.107 (relative

humidity), -0.258 (air temperature) and -0.384 (precipitation); based on the results described, it can be stated that precipitation and air temperature are the environmental variables that most influence the decomposition of litterfall and which present significant differences.

INTRODUCCIÓN

En el suelo se van acumulando hojas, ramas, inflorescencias, frutos, los cuales conforman la hojarasca, el componente que mayor cantidad representa son las hojas. La hojarasca llamada así a la acumulación de residuos orgánicos, retiene gran cantidad de nutrientes, los cuales son extraídos del suelo por las plantas (Rocha-Loredo y Ramírez, 2009).

La importancia de la hojarasca se atribuye al aporte de nutrientes que aporta al suelo, lo que representa el 80% del total de nutrientes que son retornados al suelo por los microorganismos (Santa Regina y Tarazona, 2001).

La descomposición de la hojarasca son los procesos tanto físicos como químicos en los cuales la hojarasca es reducida a sus constituyentes químicos para favorecer la asimilación de los nutrientes por las plantas. Dicho proceso es el más importante para el reciclaje de nutrientes en el ecosistema, debido a que mediante la descomposición de la hojarasca, la disponibilidad de los nutrientes mejora la fertilidad del suelo y la capacidad de retener agua y nutrientes para las plantas (Aerts, 1997; Mc Tiernan *et al.*, 2003).

Durante el proceso de descomposición primero se libera la fracción lábil (azúcares y proteínas) y después la fracción recalcitrante, la cual es de lenta descomposición: ligninas y fenoles (Sánchez *et al.*, 2008). La calidad de la materia orgánica es importante debido al papel que desempeña en los procesos funcionales que se llevan a cabo en los ecosistemas forestales (López *et al.*, 2013). La entrada de la materia orgánica al suelo está determinada por la caída de hojarasca, tanto producción como descomposición debido a que son piezas clave en el reciclado de nutrientes (Cantú *et al.*, 2013)

El efecto combinado de precipitación y temperatura son considerados como factores importantes que condicionan la velocidad de descomposición, en periodos secos la descomposición del material vegetal es más lenta. Así mismo,

las variables climáticas del suelo como humedad y temperatura están ampliamente relacionadas a la velocidad de degradación (Gallardo y Pino, 1988).

En este sentido, la descomposición de la hojarasca constituye uno de los flujos principales del ciclo de carbono (C), debido a que la mayor parte de carbono regresa a la atmósfera por la respiración de los microorganismos. Para que ocurra este proceso se deben de presentar los siguientes factores: organismos del suelo, condiciones ambientales (temperatura y precipitación, principalmente) y composición química de la hojarasca (O'Neill *et al.*, 2003).

El nitrógeno es de suma importancia en la descomposición de la materia orgánica (Aber *et al.*, 1990). De esta manera, el mayor contenido de nitrógeno participa en la regulación de las primeras etapas de descomposición, mejorando el crecimiento de los organismos del suelo que degradan los compuestos lábiles de la hojarasca, por lo que la concentración de lignina aumenta a lo largo del proceso de descomposición (Keyser *et al.*, 1978).

La relación CN es considerado un buen indicador de la susceptibilidad de la hojarasca para ser degradada. Es por ello, que al presentar altas relaciones de CN la hojarasca tiende a descomponerse más lentamente a diferencia de bajas relaciones de CN en las cuales la degradación es más rápida. Por lo que, una mayor relación de CN indica la presencia en mayor cantidad del carbono con respecto al nitrógeno y se ha mencionado que se relaciona a una menor calidad del sustrato y por ende, una descomposición más lenta. La relación LN ha sido utilizada como un indicador de la descomposición. Al presentar la hojarasca cantidades bajas de lignina y elevadas cantidades de nitrógeno se descomponen más rápidamente que la materia orgánica con cantidades altas de lignina y cantidades bajas de nitrógeno (Swift y Anderson, 1989).

Por tal motivo, la presente investigación pretende entender la velocidad de descomposición de la hojarasca y relacionarla con las variables climáticas y la composición química de la hojarasca en un ecosistema templado representado por bosque de pino, pino-encino y encino, en el estado de Nuevo León.

JUSTIFICACIÓN

La producción primaria neta de los ecosistemas en su mayoría depende del aporte de nutrientes principalmente de la descomposición de la hojarasca y la mineralización de la materia orgánica, los cuales dependen de la calidad de la hojarasca. Por lo que la conservación de nutrientes en la vegetación y la dinámica de nutrientes en el suelo constituyen una herramienta importante para comprender el funcionamiento de los ecosistemas forestales y así mismo predecir el efecto de disturbios al ecosistema. La destrucción de los ecosistemas tiene consecuencias pero no sólo a al balance de carbono y el ciclo de nutrientes, sino también en el proceso de descomposición. La descomposición de la hojarasca es parte esencial en el funcionamiento de los ecosistemas forestales principalmente en el ciclo de nutrientes, cabe mencionar que se ha intentado comprender los mecanismos que controlan la descomposición, principalmente en el estado de Nuevo León no se han realizado investigaciones relacionadas a la descomposición de la hojarasca y de ahí la importancia de la presente investigación en la cual se evalúo la velocidad de degradación, la calidad de la hojarasca durante 510 días en bosque de encino, pino-encino y pino en Iturbide, Nuevo León.

HIPÓTESIS

La degradación de la hojarasca está influenciada por las condiciones ambientales, su composición química y por el tipo de comunidad vegetal presente en el sitio de estudio. El sitio que presentará mayor degradación es el bosque de encino.

OBJETIVO

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la composición química y la tasa de degradación de la hojarasca en Bosques de Pino, Pino-Encino y Encino.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la velocidad de la degradación de la hojarasca y la utilización de diferentes modelos de regresión lineal y no lineal en Bosques de Pino, Pino-Encino y Encino.
2. Determinar el contenido de Nitrógeno, Carbono, Relación CN, Lignina, Relación LN, Fósforo y Relación PN en la hojarasca en Bosques de Pino, Pino-Encino y Encino.
3. Relacionar la degradación de la hojarasca a las condiciones ambientales prevalecientes.
4. Determinar las características físicas y químicas del suelo.

ESTRUCTURA DE LA TESIS

La presente investigación es presentada por capítulos, los cuales representan artículos científicos, a continuación se mencionan cada uno. La investigación inicia con una introducción general del tema principal de investigación. En el **capítulo I**, se presenta la importancia de los ciclos de nutrientes en suelos del Matorral Espinoso Tamaulipeco. En el cual se mencionan los procesos principales que aportan nutrientes al suelo, así como los factores que afectan el aporte de los mismos al suelo. **Este artículo es producto del examen predoctoral** se encuentra publicado en la Revista Ciencia UANL. En el **capítulo II**, se evaluó la velocidad de degradación de la hojarasca en bosque de encino, pino-encino y pino en Iturbide, Nuevo León, en el cual se utilizaron diferentes modelos de regresión no lineal como lineal para obtener el que mejor represente a este tipo de vegetación, logrando obtener la tasa de degradación para este ecosistema, el periodo de evaluación fue de 510 días. Este artículo se encuentra publicado en la Revista Mexicana de Ciencias Forestales. En el **capítulo III**, se presenta la composición química de hojarasca (C, N, relación CN, lignina, relación LN, P, relación NP), se realizó una correlación con la masa remanente y las condiciones ambientales que son: precipitación, temperatura del aire, temperatura del suelo y humedad relativa. **Este artículo aún se encuentra en borrador**. Para terminar se incluyen una conclusión general de los resultados encontrados en los capítulos mencionados, y un anexo con fotografías relacionadas a la investigación; también, los resultados de la prueba de normalidad de varianzas para comprobar si los datos son normales.

CAPÍTULO I: DINÁMICA DE NUTRIENTES EN SUELOS DEL MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO

El suelo es el mayor depósito de carbono, almacena el 80% del carbono terrestre global por lo que interviene en la captura del CO₂ atmosférico (Yáñez *et al.*, 2017). El ecosistema denominado Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) cuenta con una superficie de 200,000 km² que abarca del noreste de México y sur de Texas (Alanís *et al.*, 2008). El suelo predominante en el MET es el denominado vertisol, el cual tiene una coloración gris oscuro, limo-arcilloso con montmorillonita, tiene la capacidad de contraerse y expandirse en respuesta a diferentes cambios en el contenido de humedad del suelo (González *et al.*, 2011).

La disponibilidad de nutrientes y la productividad de los ecosistemas dependen en su mayoría de la actividad microbiana presente en el suelo (Gama, 2011), por tal motivo afecta las relaciones suelo-planta (García *et al.*, 2012; Salette *et al.*, 2016). La escasez de los nutrientes en el suelo afecta a la productividad de los ecosistemas forestales (Cerón y Aristizábal, 2012; Li *et al.*, 2010) debido a que la descomposición de la materia orgánica a través de procesos físicos (lixiviación) y biológicos (actividad microbiana), determina el reciclado de nutrientes y su disponibilidad en el suelo para el aprovechamiento de las plantas (Fernández y Aragón, 2014; Fuentes y Rodríguez, 2012; Pérez *et al.*, 2012).

Los factores involucrados en la mineralización e inmovilización de nutrientes son la composición de la vegetación; las interacciones entre la materia orgánica, los microorganismos del suelo y las condiciones ambientales como precipitación, temperatura (Celentano *et al.*, 2011; Gaspar *et al.*, 2015).

Factores involucrados en la dinámica de nutrientes

Los factores principales que controlan la dinámica de los nutrientes se describen a continuación:

Calidad de la hojarasca

La calidad de la hojarasca regula la capacidad del suelo para suministrar nutrientes, almacenar agua, liberar gases de efecto invernadero. Asimismo, las características fisicoquímicas del material orgánico, es decir, el contenido de agua, nitrógeno y demás contenido de nutrientes, en conjunto, influyen fuertemente en la liberación de nutrientes (Bradford *et al.*, 2016; Hopkins y Dungait, 2010; Rawat *et al.*, 2009).

Temperatura y Precipitación

Las condiciones ambientales influyen en las características químicas de la hojarasca, regulando de esta manera el ciclo de nutrientes. En este sentido, los factores climáticos como la temperatura y precipitación, influyen en la descomposición de la hojarasca (Marmolejo *et al.*, 2013), favoreciendo la presencia o ausencia de la actividad microbiana (Carnevele y Lewis, 2009; Wang *et al.*, 2008).

El efecto combinado de precipitación y temperatura son considerados como factores importantes que condicionan la velocidad de descomposición, en periodos secos, cuando se retrasa la descomposición del material vegetal. Asimismo, las variables climáticas del suelo, como humedad y temperatura, están ampliamente relacionadas con la velocidad de degradación (Gallardo y Pino, 1988).

La temperatura óptima para que ocurra la descomposición de la materia orgánica oscila en un rango de 10-40°C. La actividad microbiana es nula en temperaturas de 0°C (Hopkins y Dungait, 2010). Ejemplo de lo anterior es la temperatura registrada en el MET, respectivamente para Linares, de 12.8°C mínima y 30.6°C máxima, lo que favorece la presencia de la actividad microbiana. En cambio la precipitación registrada es de 629.9 mm (López *et al.*, 2013). De acuerdo con las variables ambientales presentes, en la región favorece la descomposición y la disponibilidad de nutrientes.

Factores del suelo involucrados en la dinámica de nutrientes

Los factores principales que controlan la dinámica de los nutrientes se describen a continuación:

Factores físicos

Textura

La textura juega un papel importante en el proceso de degradación de la hojarasca y mineralización de nutrientes. Los suelos arenosos tienen mayor mineralización debido a la aireación del suelo. Por otro lado, la arcilla tiene alta capacidad de retención de humedad, por lo que puede afectar procesos microbianos de mineralización e inmovilización (Monsalve *et al.*, 2017).

La textura que se presenta en el matorral espinoso tamaulipeco es limoarcilloso, de acuerdo al triángulo de textura de la USDA con arena: 17.8%, limo: 41.2% y arcilla: 41.0% (Yáñez *et al.*, 2017).

Humedad del suelo

La humedad del suelo cumple una función importante en la descomposición de la hojarasca, al existir humedad los microorganismos se encuentran activos y realizan la descomposición y mineralización; sin embargo, en condiciones de desecación la mineralización es mínima e incluso provoca inmovilización de los nutrientes (Monsalve *et al.*, 2017).

Densidad aparente

La densidad aparente juega un papel importante en la mineralización de nutrientes, debido a que al presentarse suelos con mayor contenido de arcilla provoca que la retención de humedad sea más alta, disminuyendo el contenido de aire, lo que conlleva a la disminución de los microorganismos presentes en el suelo (Monsalve *et al.*, 2017). La densidad aparente en el matorral espinoso

tamaulipeco es de 0.9 (g/cm³) (Yáñez *et al.*, 2017) este valor indica que la densidad aparente es baja y no representa un valor crítico en las propiedades físicas del suelo.

Factores químicos

pH

Es un indicador de la disponibilidad de los nutrientes, cuando el suelo tiene un pH cercano a la neutralidad o alcalino (pH \geq 6.5) provoca que los nutrientes sean no disponibles por las plantas debido a la abundancia de iones OH⁻ provocando la precipitación de compuestos insolubles (Osorio, 2012). El valor de pH registrado en el MET es de 7.60 (Yáñez *et al.*, 2017) el valor indica que el pH es ligeramente alcalino. La disponibilidad de nutrientes es alta para el MET a excepción del Fe, Mn y P, los cuales presentan menor disponibilidad de acuerdo al valor del pH.

Papel de los microorganismos en la degradación de la hojarasca

Diversidad microbiana

Los microorganismos en el suelo juegan un papel importante en la retención y liberación de nutrientes en los ecosistemas forestales, la relación entre microorganismos y plantas puede ser tanto de mutualismo como de competencia (Gallardo *et al.*, 2009). Estos microorganismos se dividen en cinco categorías taxonómicas: algas, bacterias, hongos, protistas y virus. En el suelo están estrechamente asociados con las partículas, principalmente arcillas y materia orgánica formando un microhábitat en el cual incluyen superficies interiores y exteriores de los agregados del suelo, por lo tanto, se puede afirmar que el suelo es heterogéneo con respecto a la distribución de los microorganismos (Giri *et al.*, 2005).

Estos microorganismos son de suma importancia debido a que juegan un papel en la descomposición y son considerados reservorios de nitrógeno, liberado con

la muerte de los mismos (Celaya y Castellanos, 2011). La diversidad de los microorganismos es más antigua que la existencia de las plantas y animales, por lo tanto, han tenido tiempo para evolucionar a diferentes formas (Giri *et al.*, 2005).

Los hongos son capaces de descomponer la mayor parte de materia orgánica (Hopkins y Dungait, 2010), se presentan en el suelo en diferentes formas y tamaños, algunas especies forman colonias, mientras que otras son levaduras unicelulares. Las micorrizas son hongos que viven encima o en las raíces de las plantas, éstos incrementan la toma de agua y nutrientes (Crespo, 2013).

Las bacterias son organismos unicelulares y son los más numerosos en el suelo; uno de sus beneficios es que ayudan a las plantas a la toma de nutrientes. Los actinomicetos no son tan numerosos como las bacterias, tienen funciones importantes como descomponer la materia orgánica en humus y por tal motivo liberan nutrientes que son aprovechados por las plantas (Crespo, 2013).

Las algas son organismos que producen su propio alimento a través de la fotosíntesis, aparecen en el suelo después de las lluvias como una capa fina verde, la función principal es mejorar la estructura, aunque algunas especies como las verdes azules, pueden fijar N que después liberan y puede ser absorbido por las plantas (Crespo, 2013). La actividad microbiana es pieza clave para el entendimiento de los procesos biológicos del suelo (Liu *et al.*, 2000), por lo que cambios en el suelo pueden afectar a la productividad de las plantas (Crespo, 2013).

Balance entre mineralización e inmovilización microbiana

Mineralización de nitrógeno

La mineralización del nitrógeno es el proceso por el cual el nitrógeno orgánico del suelo es convertido por los microorganismos en compuestos inorgánicos (nitrato y amonio). El amonio puede ser fijado por la materia orgánica o las partículas de arcilla del suelo, se volatilizan como amoníaco y es absorbido por las plantas o los microorganismos. Estos compuestos inorgánicos son tomados por los

microorganismos, incorporándolos a su biomasa, y se le conoce como inmovilización (Celaya y Castellanos, 2011). El proceso de mineralización es similar para el resto de los nutrientes.

Los microorganismos del suelo son de gran importancia para la descomposición y mineralización del nitrógeno (Celaya y Castellanos, 2011).

Métodos para evaluar la mineralización

Los métodos para calcular la mineralización representan un indicador de la cantidad de nitrógeno orgánico que cambia a inorgánico en un tiempo determinado, por lo cual se realizan incubaciones de algunas muestras de suelo, permitiendo calcular el amonio y nitrato que se mineraliza después de un tiempo determinado. Para obtener la tasa neta de mineralización *in situ*, se utiliza el método de las bolsas de polietileno cubiertas en el sitio a evaluar, se agrega suelo y se sellan, permanecen en el sitio por un periodo con las mismas condiciones de temperatura. Las bolsas pueden sufrir alteraciones causadas por los insectos o las raíces de las plantas, lo que contribuye a la pérdida de mineralización del nitrógeno. Sin embargo, si la bolsa no sufre daños durante el periodo de evaluación no existirá lixiviación de nutrientes (Celaya y Castellanos, 2011).

Inmovilización microbiana

La biomasa microbiana tiene la función de almacenamiento (inmovilización) y fuente (mineralización) de nutrientes, por lo que no solo es utilizada como indicador de la calidad del suelo (Monsalve *et al.*, 2017). Se considera inmovilización a la absorción y asimilación microbiana de nutrientes que no son disponibles para las plantas (Taiz y Zeiger, 2002), al ocurrir la muerte de la biomasa microbiana se liberan los nutrientes que se encontraban inmovilizados.

Importancia de la hojarasca en la dinámica de los nutrientes

Los primeros estudios sobre la hojarasca se realizaron en la década de 1960, debido al papel que juega en la comprensión de los nutrientes. La hojarasca es la principal fuente de nutrientes y materia orgánica en la capa del humus del suelo en el matorral espinoso tamaulipeco (González *et al.*, 2017). La hojarasca constituye la principal entrada de los nutrientes al suelo y es por ello que forma parte del punto clave del reciclado de nutrientes y materia orgánica (Gutiérrez *et al.*, 2012; Crespo, 2015). Los nutrientes más comunes en la hojarasca son N, P, K y Ca, y en la mayoría de los casos el N es el nutriente más abundante (Gutiérrez *et al.*, 2012).

La hojarasca está compuesta por hojas, ramas, inflorescencias, frutos, entre otros, los cuales son depositados al suelo (Gutiérrez *et al.*, 2012; Crespo, 2015). La hojarasca, al caer al suelo tiene una atribución importante en su formación (Triadiati *et al.*, 2011) gracias a la circulación de nutrientes y materia orgánica que ocurre con la descomposición (Kumar y Tewari, 2014).

La descomposición de la hojarasca se divide en cuatro etapas: trituración, el fraccionamiento de los tejidos; lixiviación, la pérdida de los compuestos más solubles mediante corrientes de agua; catabolismo (se incluye la mineralización y la humificación), la transformación que realizan los microorganismos de los compuestos orgánicos, es decir, transforman los nutrientes para que estén disponibles para las plantas y para la humificación, es la formación de la materia orgánica por los microorganismos (Álvarez, 2001). El ciclo de nutrientes y la descomposición de la hojarasca son procesos complejos que se dividen en tres pasos: descomposición, mineralización y humificación (Mishra y Kumar, 2016; Sánchez *et al.*, 2008).

Importancia de la materia orgánica en la dinámica de los nutrientes

La materia orgánica está conformada por componentes ricos en nitrógeno, carbono, fósforo y agua, principalmente, los cuales propician energía y nutrimentos necesarios para el desarrollo y metabolismo de los microorganismos encargados de la descomposición (Ferrera y Alarcón, 2001).

En la materia orgánica se encuentra la mayor cantidad de nitrógeno, pero no está disponible para las plantas y mediante el proceso de descomposición y mineralización el nitrógeno es transformado a compuestos inorgánicos que lo regresan disponible (Celaya y Castellanos, 2011). La descomposición de la materia orgánica es un proceso que permite reciclar nutrientes (Shi, 2011) que no están disponibles para las plantas, esta tarea es llevada a cabo en su totalidad por los microorganismos que se encuentran en el suelo (Celaya y Castellanos, 2011). Durante el proceso de descomposición primero se libera la fracción lábil (azúcares y proteínas) y después la fracción recalcitrante, la cual es de lenta descomposición (ligninas y fenoles) (Sánchez *et al.*, 2008).

La calidad de la materia orgánica es importante debido al papel que desempeña en los procesos funcionales que se llevan a cabo en los ecosistemas forestales (López *et al.*, 2013). La entrada de la materia orgánica al suelo está determinada por la caída de hojarasca, tanto producción como descomposición debido a que son piezas clave en el reciclado de nutrientes (Cantú *et al.*, 2013).

Algunas funciones que tiene la materia orgánica en el suelo se mencionan a continuación (García, 2008):

- Es la fuente de crecimiento de las bacterias, las cuales liberan sustancias que ayudan en la formación de agregados para hacer más estable el suelo.
- Retiene minerales, lo que reduce su arrastre y pérdida.
- Reduce la erosión causada por la lluvia.
- Incrementa la penetración de las raíces.
- Regula la temperatura y humedad del suelo.

Importancia de los nutrientes en el suelo

Los nutrientes son elementos que se derivan del suelo y los cuales son esenciales para las plantas, de acuerdo a su concentración y a los requerimientos necesarios para el crecimiento de las mismas. Las plantas requieren 17 elementos esenciales, los cuales se dividen en macronutrientes y micronutrientes. Cada nutriente tiene funciones específicas en las plantas (Cogger y Brown, 2016; Kyrkby y Römheld, 2007). La absorción de nutrientes por las plantas está inicialmente limitada por las tasas de descomposición y de mineralización, la solubilidad mineral, la capacidad de intercambio catiónico y la competitividad de los microorganismos (Bosco *et al.*, 2004). Se estima que durante la descomposición de la hojarasca la cantidad de nutrientes liberados equivalen al 70-90% del total de los requeridos por las plantas (Sánchez *et al.*, 2008).

Macronutrientes

Los macronutrientes son requeridos en grandes cantidades por las plantas, de ahí su nombre. Los nueve principales nutrientes son: nitrógeno, carbono, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre (Cogger y Brown, 2016; Kyrkby y Römheld, 2007), hidrógeno y oxígeno (Rodríguez y Flórez, 2004).

Micronutrientes

Los micronutrientes son requeridos en cantidades menores; asimismo, son considerados elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Los micronutrientes son: hierro, manganeso, boro, zinc, cobre, molibdeno, cloro (Cogger y Brown, 2016; Kyrkby y Römheld, 2007), níquel (Rodríguez y Flórez, 2004).

Principales ciclos de nutrientes

Ciclo del Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento esencial requerido para la degradación de la materia orgánica y el crecimiento microbiano. Si la materia orgánica tiene alto contenido de nitrógeno, los microorganismos tienen suficiente sustrato para inducir mayor mineralización, satisfaciendo totalmente sus necesidades de N, es por ello que no representa un factor limitante. Por otro lado, si el contenido de N es bajo, la descomposición de la materia orgánica disminuye drásticamente y la mineralización de carbono orgánico dependerá de las fuentes nitrogenadas (Ferrera y Alarcón, 2001).

El ciclo del nitrógeno es de suma importancia pues mediante éste los nutrientes son liberados y adquiridos por la materia orgánica (Cogger y Brown, 2016), se incluyen cuatro procesos: fijación del nitrógeno, mineralización, nitrificación y desnitrificación (Mao *et al.*, 2011). Este elemento puede ser absorbido por las raíces en tres formas: como N orgánico, amonio o nitrato. La mineralización y nitrificación en el suelo son procesos lentos, por lo que suelen predominar las formas orgánicas y reducidas, disminuyendo la abundancia en el suelo en el sentido: N orgánico soluble > amonio > nitrato (Escudero y Mediavilla, 2003).

Ciclo del Carbono

La descomposición de la hojarasca es importante en el ciclo del carbono (Zhang *et al.*, 2008; De Paz *et al.*, 2017). El carbono desempeña un papel central en el control del reciclaje del nitrógeno (Cantú y Yáñez, 2018).

Para conocer la velocidad con que la materia orgánica se mineraliza, se utiliza la relación entre carbono y nitrógeno, la cual indica la tasa de nitrógeno disponible para las plantas, por tal motivo, al obtener valores de 10 a 14 corresponden a una mineralización rápida, lo que favorece a que los microorganismos y las plantas cuenten con los nutrientes suficientes (Gamarra *et al.*, 2017).

Por tal motivo los valores altos de la relación carbono y nitrógeno indican que la hojarasca se descompone más lento, a diferencia de valores bajos en los que la degradación es más rápida, debido principalmente a la calidad de la hojarasca (Álvarez, 2001).

El C orgánico del suelo resulta del balance entre la incorporación del material orgánico al suelo y la salida del C del suelo en forma de CO₂ a la atmósfera, es emitido desde el suelo a la atmósfera, pero no sólo es producido por la mineralización de la materia orgánica, sino que es generado también por el metabolismo de las raíces de las plantas (Martínez *et al.*, 2008).

Ciclo del Azufre

El azufre es un elemento necesario para las plantas en menor proporción que el N, pero es tan importante como el ya mencionado, el proceso de asimilación ocurre al pasar de las formas oxidadas a reducidas del azufre, este cambio de oxidación del azufre es una actividad realizada en su mayoría por los microorganismos del suelo. El azufre se encuentra en la atmósfera como dióxido de azufre (SO₂), por lo que no se encuentra disponible para las plantas, es por ello que en el ciclo del azufre se convierte en sulfato de azufre (SO₄⁻²), que es absorbido por las raíces de las plantas e incorporado al aminoácido cisteína (Benavides, 1998).

Ciclo del Fósforo

El fósforo es un elemento que proviene de las apatitas (fosfato de calcio natural más abundante en la superficie terrestre, es por ello que son consideradas la principal fuente de fósforo) (Fernigrini *et al.*, 2008). El fosfato es liberado mediante los procesos de lixiviación, meteorización y erosión. Es absorbido por las plantas y los microorganismos del suelo, por lo que es incorporado en la materia orgánica y sedimentos, para depositarse nuevamente en forma de mineral no disponible para la asimilación. El fósforo inorgánico (H₂PO₄⁻ y HPO₄²⁻) por lo general es

fijado fuertemente en forma de fosfatos de Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} y Fe^{2+} . La mineralización de los compuestos orgánicos (ácidos nucleicos, fosfolípidos y ésteres) del fósforo permite el reciclaje del elemento para que regrese al suelo y permita formar parte del ciclo. A diferencia del ciclo del nitrógeno, el ciclo del fósforo no incluye cambios en los compuestos inorgánicos, es tomado del suelo por las plantas y retorna a través de los residuos vegetales y animales (Cerón y Aristizábal, 2012).

Ciclo del Potasio

El potasio es un elemento esencial, por lo que las plantas necesitan cantidades elevadas similar al nitrógeno, se obtiene del suelo y proviene de la meteorización de minerales, mineralización de los residuos orgánicos y en algunos casos de los abonos o fertilizantes. Los compuestos de arcilla son la principal fuente de potasio en el suelo. Se encuentra disponible en la solución del suelo, por lo que es absorbido por las plantas de manera inmediata. El ciclo del potasio en el suelo consiste en la adsorción y desorción de potasio intercambiable de la solución del suelo, el cual es fijado o liberado en las arcillas y se cristaliza o meteoriza en potasio estructural (Conti, 2002).

El potasio de la materia orgánica pasa a la solución del suelo, asimismo, se pueden aplicar fertilizantes de potasio. Las pérdidas de potasio en la solución del suelo se presentan con la erosión del suelo y el potasio lixiviado (Conti, 2002).

Funciones de los nutrientes

Las funciones de los macro y micronutrientes en las plantas se ilustran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Funciones principales de macro y micro-nutrientes y la forma disponible de asimilación por las plantas entre paréntesis (Taiz y Zeiger, 2002; Salisbury y Ross, 1985).

Elemento	Función principal
H (H ₂ O)	Constituyente principal de la materia orgánica.
C (CO ₂)	Constituyente principal de la materia orgánica.
O (O ₂ , H ₂ O)	Constituyente principal de la materia orgánica.
N (NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺)	Constituyente de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos y clorofila.
K (K ⁺)	Regula la presión osmótica y activa diferentes enzimas.
Ca (Ca ²⁺)	Requerido como cofactor por algunas enzimas involucradas en la hidrólisis de ATP y fosfolípidos.
Mg (Mg ²⁺)	Requerido por muchas enzimas involucradas en la transferencia de fosfato. Constituyente de la molécula de clorofila.
P (H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻)	El componente de los fosfatos de azúcar, ácidos nucleicos, nucleótidos, coenzimas, fosfolípidos, etc. Tiene un papel clave en las reacciones que involucran ATP.
S (SO ₄ ²⁻)	Componente de cisteína, metionina y de algunas vitaminas.
Mo (MoO ₄ ⁻)	Constituyente de nitrogenasa y nitrato reductasa.
Cu (Cu ⁺ , Cu ²⁺)	Presente en proteínas o enzimas involucradas en reacciones de óxido-reducción.
Zn (Zn ²⁺)	Requerido para la síntesis de la hormona del crecimiento, auxina.
Mn (Mn ²⁺)	Papel estructural en la membrana de los cloroplastos.
B (H ₃ BO ₃)	Implicado en la elongación celular y el metabolismo de los ácidos nucleicos.
Fe (Fe ³⁺ , Fe ²⁺)	Forma parte esencial de diversas enzimas, contribuye al transporte de electrones.
Cl (Cl ⁻)	Estimula el rompimiento del H ₂ O durante la fotosíntesis.
Ni (Ni ²⁺)	Constituyente de ureasa. En bacterias fijadoras de N ₂ , constituyente de hidrogenasas.

Isótopos en el ciclo de nutrientes

Los isótopos estables son los elementos con el mismo número atómico, pero diferente peso atómico. Se utilizan para estudiar los efectos del uso del suelo sobre las características de los ecosistemas. (Boutton *et al.*, 1999). Se tienen estudios con isótopos estables de H, C, N, O y S en el sur de Texas y de ahí su importancia en los ecosistemas para registrar cambios de vegetación de pastos a bosques.

Estudios de nutrientes en el Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET)

A continuación, se describen algunos estudios relacionados al aporte de nutrientes en el MET:

Tabla 2. Estudios relacionados al aporte de nutrientes en el MET.

Autor	Año	Investigación	Aporte de nutrientes
Cantú y Yáñez.	2018	Efecto del cambio de uso del suelo en el contenido de carbono orgánico y nitrógeno en Campus FCF.	Profundidad de 0-5 cm: C orgánico (4.06%), Nitrógeno total (0.43%) y Relación C/N (9.59) Profundidad de 5-30 cm: C orgánico (1.97%), Nitrógeno total (0.42%) y Relación C/N (5.58)
Yáñez <i>et al.</i>	2017	Respiración del suelo en cuatro sistemas de uso suelo de la tierra en Campus FCF.	El sistema de matorral presentó el valor más alto con 6.17 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ por la mañana y 8.4 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ por la tarde
González <i>et al.</i>	2017	Deposición de hojarasca y nutrientes en hojas y ramas en Campus FCF.	Hojas: Ca (14.3)>K (2.8)>Mg (1.5)>P (0.2) g m^{-2} Fe (115.5)>Mn (13.4)>Zn (6.8)>Cu (2.4) mg m^{-2} Ramas: Ca (2.7)>Mg (0.4)>K (0.1)>P (0.1) g m^{-2} Fe (22.9)>Zn (2.8)>Mn (2.7)>Cu (0.8) mg m^{-2}

López <i>et al.</i>	2015	Producción de hojarasca y depósito de nutrientes en China, Los Ramones y Campus FCF.	Ca (99.5)>N (7.1)>K (5.5)>Mg (1.9)>P (0.2) g m ⁻² a ⁻¹ Fe (66)>Mn (13.46)>Zn (8.03)>Cu (2.4) mg m ⁻² a ⁻¹
Cantú <i>et al.</i>	2013	Retorno potencial de nutrientes por componentes secundarios de la hojarasca en Crucitas Campus FCF y el Cascajoso.	Hojas: Ca (181.83)>K (31.6)>Mg (18)>P (3.8) kg ha ⁻¹ yr ⁻¹ Fe (7.43)>Mn (5.2)>Zn (0.96)>Cu (0.33) g ha ⁻¹ yr ⁻¹ Componentes secundarios: Ca (154.2)>Mg (7.03)>K (1.56)>P (0.93) kg ha ⁻¹ yr ⁻¹ Fe (235.16)>Mn (69.26)>Zn (33)>Cu (9.8) g ha ⁻¹ yr ⁻¹ Suelo: Ca (7206.43)>N (3654.36)>Mg (208.3)>K (183.96)>P (8.23) mg kg ⁻¹ Mn (34.59)>Fe (5.60)>Zn (1.81)>Cu (0.71) mg kg ⁻¹
López <i>et al.</i>	2013	Producción de hojarasca y retorno potencial de nutrientes en China, Los Ramones y Campus FCF.	Hojas: Ca (5.38)>N (4.47)>K (2.57)>Mg (1.24)>P (0.08) g m ⁻² a ⁻¹ Fe (17.25)>Mn (8.07)>Zn (4.43)>Cu (1.62) mg m ⁻² a ⁻¹ Suelo: Ca (9121)>N (1681)>Mg (240)>K (229) mg/kg Mn (6.0)>Fe (3.5)>Cu (0.3)>Zn (0.2) mg/kg
Marmolejo <i>et al.</i>	2013	Degradación de la hojarasca en sitios con vegetación primaria y secundaria del matorral espinoso tamaulipeco.	Porcentaje de degradación: Sitio 1 (25.92), Sitio 2 (24.58), Sitio 3 (26.16) y Sitio 4 (26.51) Tasa de descomposición (k): Sitio 1 (-0.42), Sitio 2 (-0.43), Sitio 3 (-0.47) y Sitio 4 (-0.50). La tasa de degradación fue ligeramente mayor en la vegetación primaria

Yerena <i>et al.</i>	2012	Contenido de carbono total en especies arbóreas y arbustivas en el matorral espinoso tamaulipeco.	Contenido de carbono total en los componentes de la biomasa de mayor a menor: Hojas (48.14%), Tallos (45.93), Ramas (45.73%), Ramillas (45.70%) y corteza (42.08%)
Creamer <i>et al.</i>	2011	Controles sobre la acumulación de carbono en el suelo durante la invasión de plantas leñosas: respiración del suelo y $\delta^{13}\text{C}$ de CO_2 respirado.	La mineralización del carbono orgánico del suelo (COS) es mayor en rodales con árboles más viejos (34-86 años) que en árboles jóvenes (14-23 años) y pastizales. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de CO_2 respirado indican que el COS mineralizado es predominante en los rodales leñosos
Boutton <i>et al.</i>	1999	Isótopos estables en ecosistemas del sur de Texas, utilizando $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, con la finalidad de identificar cambios de vegetación.	Aproximadamente el 50-90% del carbono del suelo en los vegetación se deriva de los pastos en los últimos 40-120 años

Discusión

Con base en la literatura consultada sobre la importancia del ciclo de nutrientes y el papel que juega la hojarasca como la principal entrada de nutrientes en el suelo, resulta evidente la importancia de los microorganismos, los cuales cumplen una función importante para degradar la hojarasca y liberar nutrientes que son aprovechados por las plantas. Existen diversos estudios relacionados al aporte de nutrientes en el ecosistema del matorral espinoso tamaulipeco.

El suelo forma parte del reservorio de carbono, el cual funciona como sumidero de CO_2 , en este sentido Cantú y Yáñez (2018), evaluaron el contenido de carbono orgánico del suelo, nitrógeno total y se estimó la relación de C/N en dos profundidades de 0-5 y 5-30 cm, siendo la primera en la cual se presentó mayor cantidad de los contenidos de carbono orgánico, nitrógeno total y relación de C/N

(Cantú y Yáñez, 2018). Asimismo, Yáñez *et al.* (2017), estudiaron las variaciones diurnas y estacionales en el flujo del CO₂ en vertisoles bajo cuatro sistemas de uso de suelo, obteniendo que el sistema de matorral se registró el valor más alto de respiración con 6.17 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ por la mañana y 8.4 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ por la tarde, que indica la emisión de CO₂, lo que podría afectar el balance del carbono. El contenido de carbono en especies arbóreas y arbustivas en diferentes componentes de la biomasa fue evaluado por Yerena *et al.* (2012), quienes encontraron valores de 48.14% en hojas, 45.93% en tallos, 45.73% en ramas, 45.70% en ramillas y 42.08% en corteza.

Con la finalidad de conocer el aporte de nutrientes que se obtiene en la producción de la hojarasca, López *et al.* (2013), analizaron durante un año la producción de hojarasca y el aporte de macro y micro-nutrientes, los resultados indicaron que en invierno se depositó la mayor cantidad de producción foliar y, asimismo, el aporte de nutrientes. Del mismo modo, López *et al.* (2015), evaluaron la producción de hojarasca y depósito potencial de nutrientes en el componente hojas, el depósito de nutrientes fue más alto en otoño e invierno.

Mientras que Cantú *et al.* (2013) determinaron el retorno potencial de nutrientes por los componentes secundarios de la hojarasca; las estructuras reproductivas son el componente de mayor importancia en el depósito de nutrientes, además encontraron diferencias entre los sitios de estudio, las cuales se deben principalmente a la composición de la vegetación, la calidad de hojarasca, las condiciones edáficas y las variables climáticas.

Por otro lado, la importancia de la tasa de descomposición es de suma importancia y es por ello que Marmolejo *et al.* (2013), realizaron un estudio para identificar la tasa de descomposición de la hojarasca en cuatro sitios con vegetación primaria y secundaria, los resultados indicaron que la tasa de degradación fue mayor en la vegetación primaria.

Los microorganismos son importantes en el proceso de mineralización de nutrientes, ante ello Celaya y Castellanos (2011), evaluaron la tasa de

mineralización del nitrógeno, un indicador de la disponibilidad del nitrógeno en zonas áridas y semiáridas, en el cual concluyeron que, debido a la poca vegetación, la mineralización se presenta de manera heterogénea causada por las condiciones del microclima y el aporte de materia orgánica, por tal razón los valores de mineralización son mayores bajo el dosel de árboles y arbustos, principalmente en leguminosas. Es viable conocer la tasa de mineralización de los nutrientes, por ejemplo, el nitrógeno, empleando la metodología recomendada por Celaya y Castellanos.

Diversos estudios señalan que las condiciones ambientales influyen en la descomposición de la hojarasca debido a que inhiben o favorecen la presencia de microorganismos en el suelo, Bradford *et al.* (2016) mencionan que desde hace tiempo se ha considerado el clima como el principal factor que controla la descomposición, pero indican que los rasgos propios de la hojarasca pueden predominar en la descomposición, por lo que proponen realizar estudios más precisos para identificar cuáles son los principales factores que la controlan.

Con respecto al uso de isótopos Boutton *et al.* (1999) evaluaron ecosistemas del sur de Texas, utilizando isótopos estables de $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, con la finalidad de identificar cambios de vegetación, y encontraron que durante los últimos 40-120 años se presentó un cambio de vegetación de pastos a bosques, por lo que afirman que cerca del 50-90% del carbono del suelo se deriva de los pastos. Asimismo, Creamer *et al.* (2011) cuantificaron controles sobre la acumulación de carbono en el suelo durante la invasión de plantas leñosas: respiración del suelo y $\delta^{13}\text{C}$ de CO_2 respirado, en el cual utilizaron fracción del suelo para investigar la degradación microbiana de la materia orgánica, para identificar por qué la mineralización del carbono orgánico del suelo (COS) es mayor en rodales con árboles viejos. Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de CO_2 respirado indican que el COS mineralizado es predominante en los rodales leñosos debido a la fracción de luz.

Resumen

La principal entrada de nutrientes al suelo se obtiene de la hojarasca que es de suma importancia en el entendimiento de los ciclos de nutrientes, la cual depende de tres factores: condiciones climáticas, calidad de la hojarasca y cantidad de microorganismos en el suelo. El papel de los microorganismos es importante en el funcionamiento de los ecosistemas, pues son los que se encargan de degradación la hojarasca y realizar la mineralización e inmovilización microbiana. El objetivo del presente documento es realizar una revisión de bibliografía fundamentalmente del ciclo de nutrientes en suelos del matorral espinoso tamaulipeco.

Palabras clave: Ciclo de nutrientes en suelos, matorral espinoso tamaulipeco, condiciones climáticas, mineralización, hojarasca, microorganismos en el suelo.

Abstract

The main entry of nutrients into the soil is obtained from litterfall which is of utmost importance in understanding nutrient cycles, which depends on three factors: climatic conditions, quality of litterfall and quantity of microorganisms in the soil. The role of micro-organisms is important in the functioning of ecosystems, as they are responsible for litterfall degradation, mineralization and microbial immobilization. The aim of this paper is to review the literature fundamentally on nutrient cycling in soils of the Tamaulipan thornscrub.

Key words: Nutrient cycling in soils, Tamaulipan thornscrub, climatic conditions, mineralization, litterfall, microorganisms in the soil.

CAPÍTULO II: MODELOS DE DEGRADACIÓN DE LA HOJARASCA EN BOSQUES DE ENCINO Y DE PINO EN NUEVO LEÓN

Resumen

La descomposición de la hojarasca es importante para entender el funcionamiento y la productividad de los ecosistemas, porque determina el reciclaje de nutrimentos. En el estudio que aquí se describe se evaluó la degradación de la hojarasca durante 510 días en tres comunidades forestales: el bosque de encino (BE), el bosque de pino-encino (BPE) y el bosque de pino (BP) en el municipio de Iturbide, Nuevo León. En cada sitio se marcaron cinco parcelas de 20 m x 20 m en las que se colocaron 110 bolsas con 5 g de hojarasca, con el propósito de calcular su velocidad de degradación. Los resultados indican que la degradación fue de 27 % para BE; de 23 % para BPE y de 17 % para BP. Se realizó un análisis de regresión para la degradación en el periodo de muestreo, en el cual el modelo exponencial negativo simple fue el que mejor ajuste presentó para los tres sitios de estudio. La tasa de degradación para el 99 % de los casos se determinó en 17, 22 y 29 años para BE, BPE y BP, respectivamente. En el bosque de encino se registró la mayor degradación, lo que sugiere que la calidad del material vegetal influye en el proceso.

Palabras clave: Análisis de regresión, degradación de hojarasca, materia orgánica, pino-encino, porcentaje de degradación, tasa de degradación.

Abstract

The decomposition of leaf litter is important to understand the functioning and productivity of ecosystems because it determines the recycling of nutrients. In the study described here, the degradation of leaf litter during 510 days in three forest communities was evaluated: the oak forest (BE), the pine-oak forest (BPE) and the pine forest (BP) in the Iturbide municipality, Nuevo Leon. In each site five plots

of 20 m x 20 m were marked in which 110 bags with 5 g of litter were placed in order to calculate their degradation rate. The results indicate that the degradation was 27 % for BE; 23 % for BPE and 17 % for BP, respectively. A regression analysis was performed for degradation in the sampling period, in which the simple negative exponential model was the one that best fit presented for the three study sites. The degradation rate for 99 % of cases was determined in 17, 22 and 29 years for BE, BPE and BP, respectively. The greatest degradation was recorded in the oak forest, suggesting that the quality of the plant material influences the process.

Key words: Regression analysis, litter decomposition, organic matter, pine-oak, decay percentage, decomposition rate.

Introducción

En el contexto de la dinámica de los ecosistemas, la producción de la hojarasca y la descomposición son los principales procesos de transferencia de nutrientes y materia orgánica al suelo que ejecutan los productores primarios, mediante el aporte de material vegetal al sustrato (Ovington, 1962; López *et al.*, 2013).

La productividad primaria, el ciclo de nutrientes y la fertilidad del suelo están reguladas, en gran medida, por la descomposición de la hojarasca (Wang *et al.*, 2008). Asimismo, si la descomposición es muy lenta, los nutrientes disponibles para las plantas son insuficientes, lo que limita su crecimiento y desarrollo (Bubb *et al.*, 1998; Montagnini y Jordan, 2002). En contraste, si son liberados rápidamente, pueden perderse por volatilización y lixiviación edáfica (Palma *et al.*, 1998).

El funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos favorecen las condiciones físicas, químicas y biológicas óptimas del suelo por la liberación de nutrientes y descomposición de la hojarasca (León *et al.*, 2008).

El efecto combinado de la precipitación pluvial y la temperatura son factores importantes que condicionan la velocidad de descomposición del material vegetal, por lo que en periodos esta transformación es más lenta. Respecto, a las variables climáticas del suelo como la humedad y la temperatura están ampliamente relacionadas a la velocidad de degradación (Gallardo y Pino, 1988).

La descomposición de la hojarasca se divide en cuatro etapas: trituración, que es el fraccionamiento de los tejidos; lixiviación, que corresponde a la pérdida de los compuestos más solubles mediante corrientes de agua; el catabolismo (se incluye la mineralización y la humificación), la cual se refiere a la transformación que realizan los microorganismos de los compuestos orgánicos; es decir, modifican los nutrientes para que estén disponibles para las plantas; y la humificación, o formación de la materia orgánica por los microorganismos (Álvarez, 2001). El ciclo de nutrientes y la descomposición de la hojarasca son procesos complejos que se dividen en tres pasos: descomposición, mineralización y humificación (Sánchez *et al.*, 2008; Mishra y Kumar, 2016).

Con base a lo anterior, el objetivo del presente estudio consistió en determinar la velocidad de la degradación mediante diferentes modelos durante 510 días, bajo la hipótesis de que en el bosque de encino la degradación es más rápida.

Materiales y métodos

El área de estudio

La investigación se desarrolló en el *Campus* Ecológico Bosque Escuela de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), en el municipio Iturbide, Nuevo León, que se localiza entre los 24°42'28" N y los 99°51'43" O, a 1600 m de altitud (Figura 1). El bosque de pino-encino es el tipo de vegetación predominante en el lugar; los suelos corresponden a Leptosol (95.5 %), Calcisol (2.8 %) y Castañozem (1.7 %). La temperatura anual media es de 14 °C y la precipitación anual media es de 635 mm (INEGI, 2009).

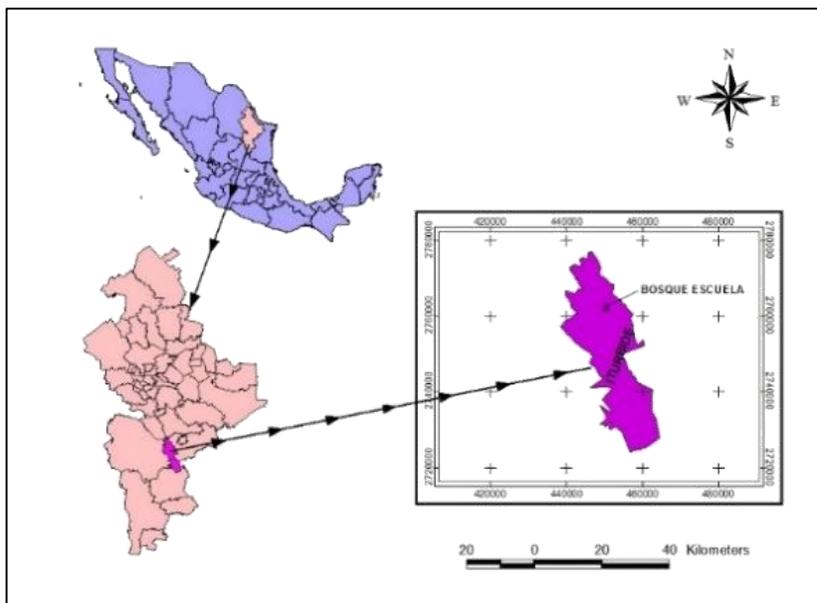


Figura 1. Localización del área de estudio.

Variables ambientales

Se registraron la humedad relativa (%), la temperatura ambiente (°C) y la temperatura del suelo (°C) cada hora a 5 cm de profundidad, mediante los sensores automatizados marca *HOBO*; la precipitación pluvial (mm) se determinó por evento.

Degradación de la hojarasca y frecuencia de recolecta

Se utilizó el método de la bolsa de hojarasca (*litter bag*) (Bocock y Gilbert, 1957); se recolectaron 5 g de hojarasca recién caída, que se puso a secar a la intemperie y se depositó en bolsas de 25 cm x 20 cm de tela de malla de nylon de 1 mm². Esta apertura permite el acceso al interior de las bolsas a ciertos detritívoros invertebrados, pero minimiza las pérdidas por fragmentación (Douce y Crossley, 1982). Por efecto del tiempo, la diferencia en peso permite evaluar la degradación del material recolectado.

En el área de estudio, se seleccionaron tres condiciones por tipo de vegetación de bosque templado: el bosque de encino (BE); el de pino-encino (BPE); y el bosque de pino (BP). El experimento se inició el 15 de diciembre de 2016 y terminó el 9 de mayo de 2018.

En cada bolsa, se depositó una mezcla homogénea de los componentes de la hojarasca (hojas, ramas, estructuras reproductivas y otros componentes de la hojarasca). Se colocaron en total 110 bolsas, en cinco parcelas experimentales (20 m x 20 m) por cada sitio de estudio, a razón de 22 bolsas por parcela distribuidas al azar. Cada una de ellas se acomodó sobre la superficie del suelo, que previamente se limpió para que las bolsas estuvieran en contacto con el sustrato.

La degradación de la hojarasca se evaluó en 12 fechas, para ello se recolectó todo el material de dos bolsas por parcela experimental cada 15, 30, 60, 90, 150, 210, 270, 330, 390, 450 y 510 días; las cuales se llevaron al Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL, donde se secaron a 65 °C en un horno marca Felisa, modelo FE-292AD, hasta llegar a un peso constante. Con esos datos se calculó el porcentaje de pérdida de peso.

La tasa de descomposición se determinó mediante el Modelo Simple Exponencial Negativo de Olson (1963):

$$X/X_0 = e^{-kt} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$k = -\left(\ln X/X_0\right)/t \quad \text{Ecuación 2 (derivada de la ecuación 1)}$$

Donde:

k = Constante de descomposición (año⁻¹)

X = Masa de hojarasca en un tiempo dado (g)

X_0 = Masa inicial de hojarasca (g)

t = Tiempo expresado en años (años)

Se calculó el tiempo necesario para degradar 50 y 99 % de la hojarasca con las siguientes ecuaciones (Olson, 1963):

Degradación al 50 %:

$$t_{0.5} = \ln 0.50/k$$

Degradación al 99 %:

$$t_{0.99} = \ln 0.01/k$$

Análisis estadísticos

A los datos de degradación de la hojarasca se les aplicó un análisis de varianza; para comprobar los supuestos de homogeneidad de varianzas se emplearon las pruebas de *Kolmogorov-Smirnov* y la de *Shapiro Wilk* (Steel y Torrie, 1980) (Tabla A.1). Se utilizó la prueba no paramétrica *Kruskal-Wallis* (Ott, 1993), porque los datos no presentaron distribución normal.

Para determinar la tasa de degradación de la hojarasca, se trabajó con cuatro modelos: el Exponencial Negativo Simple propuesto por Olson (1963) y tres con base en las recomendaciones de Moreno *et al.* (2018); se seleccionaron la raíz del error cuadrático medio (RECM) y el Coeficiente de Correlación de Pearson, con base en el ajuste de los modelos y el coeficiente de determinación (R^2).

Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS, 2016) versión 22.0 para *Windows*.

Resultados y Discusión

Variables ambientales

En la Figura 2 se ilustra la temperatura media del aire, la temperatura media del suelo y la humedad relativa media, así como la precipitación pluvial mensual registrada durante el periodo de estudio. Esta última fue de 719 mm en 2017 y de 184 mm al término del experimento, con picos máximos en septiembre y noviembre, para un total de 903 mm. La temperatura ambiente osciló de 14 a 25 °C y no hubo heladas, mientras que la humedad relativa fue de 48 a 85 %. La temperatura del suelo siguió la misma tendencia que la ambiental, con variaciones de 12 a 20 °C.

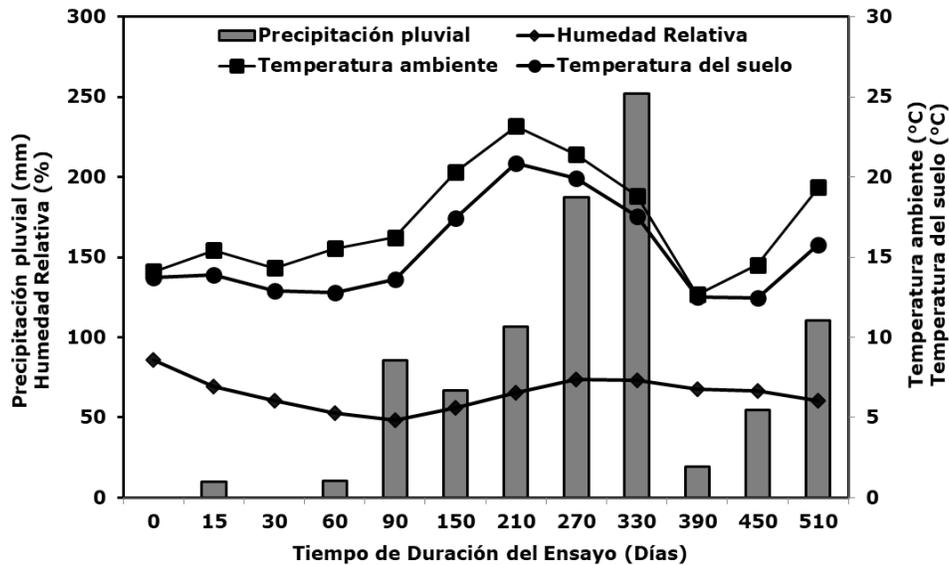


Figura 2. Temperatura ambiente (°C), Temperatura del suelo (°C), humedad relativa (%) y precipitación pluvial (mm) registrada durante el ensayo.

Degradación de la hojarasca

En la degradación de la hojarasca (Figura 3) se observa una fase de lenta descomposición del día 15 al 90, y mayor hasta el día 510; se mantiene constante la tendencia del proceso en los tres tipos de bosque. Al aumentar el tiempo de duración del ensayo, también lo hizo la pérdida de biomasa. Para el término del estudio (510 días después del inicio), la degradación fue de 27 % para el bosque de encino, de 23 % para el de pino-encino y de 17 % para el de pino. Los valores no presentaron diferencias significativas en los días 0, 15 y 450 de acuerdo a la prueba de *Kruskal-Wallis*.

Al evaluar la pérdida de biomasa en un bosque templado durante un año en dos localidades en El Salto, Durango, Moreno *et al.* (2018), calcularon degradación de 31 % y 35 %. Asimismo, López *et al.* (2018), refirieron que en los primeros 30 y 150 días ocurrió la mayor pérdida de biomasa de *Pinus cooperi* C. E. Blanco en parcelas con diferentes intensidades de aclareos, también en El Salto, Durango; mientras que, Rocha y Ramírez (2009) obtuvieron resultados de 34 a 52 % degradación y no citan diferencias significativas, para el bosque de pino-encino en Chiapas, México.

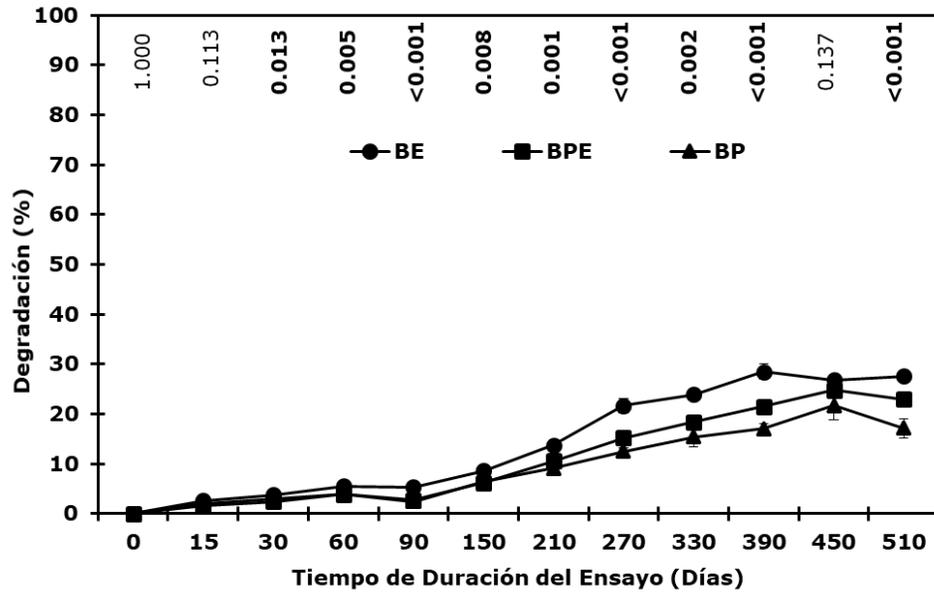


Figura 3. Degradación de la hojarasca (%) de los tres tipos de bosques en el noreste de México. Cada Valor graficado representa la media ($n=10 \pm$ error estándar). El valor de p de la prueba de *Kruskal-Wallis* para detectar diferencias entre los tipos de bosques en cada tiempo de duración del ensayo se muestra dentro de la gráfica. Probabilidades en negritas (parte superior) indican diferencias significativas. BE= Bosque de Encino; BPE= Bosque de Pino-Encino; BP Bosque de Pino.

Sierra *et al.* (2009) señalan que la fase inicial de descomposición presenta una curva más pronunciada en la pérdida de biomasa y, al final, la pendiente se reduce significativamente, lo que supone que la lenta descomposición de la hojarasca es controlada por los factores ambientales y por la calidad de la hojarasca (composición química, variables no analizadas en el presente estudio). Ibarra *et al.* (2011) indican que el comportamiento de la degradación se debe a que se utilizan todos los componentes de la hojarasca que incluyen las de descomposición rápida (hojas y estructuras reproductivas) y las de descomposición lenta (ramillas y corteza).

También influye la naturaleza de la hojarasca, su relación C/N, así como el contenido de lignina y taninos; mientras mayor es el grado de lignificación de la acícula, el tiempo de descomposición aumenta.

Las acículas secas de pino presentan alto contenido de lignina (25.93-30.05 %) (Díaz *et al.*, 2007) y taninos (0.07-0.12 %) ambos precursores de las sustancias húmicas en la materia orgánica, de una alta relación C/N (alrededor de 150), además tienen bajo contenido de Ca (39.5-54.3 %) y Mg (10.8-18.8 %) (Bernabé *et al.*, 2013).

Modelos de descomposición

Para evaluar la degradación se utilizaron modelos matemáticos lineales, potenciales y exponenciales, entre estos el Modelo Exponencial Negativo Simple propuesto por Olson (1963), así como algunos evaluados por Moreno *et al.* (2018).

Los modelos utilizados en la presente investigación fueron:

- *Modelo 1: $H(t) = \beta_0 * \exp^{-\beta_1 * t}$ propuesto por Olson (1963)
- *Modelo 2: $H(t) = \beta_0 + \beta_1 (t)$
- *Modelo 3: $\ln H(t) = \beta_0 + \beta_1 \ln (t)$
- *Modelo 4: $H(t) = \beta_0 * t^{\beta_1}$

Donde:

H : Fracción de hojarasca remanente en t años.

t : Tiempo expresado en años.

β_0 : Porcentaje de peso inicial.

β_1 : Tasa relativa de descomposición.

*Propuestos por Moreno *et al.* (2018).

En el cuadro 1 se muestran los modelos obtenidos para los tres sitios experimentales; se aprecia que los valores del coeficiente de determinación variaron de 0.766 a 0.899 y fueron similares a los registrados por Moreno *et al.* (2018) con 0.965 a 0.969; así como a los de Del Valle (2003) con 0.966; a los de Ibarra *et al.* (2011) con 0.946; y Martínez *et al.* (2007) con 0.698 a 0.821. Por tal motivo, el modelo (1) Exponencial Negativo Simple fue el de mejor ajuste, de acuerdo al coeficiente de determinación y el coeficiente de correlación de *Pearson* para los tres tipos de bosques.

El coeficiente de correlación se distribuyó en entre 0.875 a 0.948 para el modelo (1). Se puede observar que el modelo Exponencial Negativo Simple es el de mejor ajuste con base en el mayor valor del coeficiente de determinación y coeficiente de correlación de *Pearson*, así como el menor RECM para los tres tipos de bosque.

Tabla 3. Modelos de regresión ajustados para la estimación de la fracción de hojarasca remanente durante el período de estudio para los tres tipos de bosques.

Sitio	Modelo	Coeficientes		Intervalos de confianza		Estadísticos		
		β_0	β_1	Límite Inferior β_0	Límite Superior β_1	R^2	RECM	Coefficiente de Pearson
1	1	0.886	0.302	0.280	0.897	0.891	0.035	0.944
2	1	0.890	0.244	0.227	0.899	0.899	0.028	0.948
3	1	0.894	0.184	0.163	0.906	0.766	0.035	0.875
1	2	0.877	-0.218	-0.233	0.888	0.882	0.036	0.939
2	2	0.884	-0.184	-0.196	0.892	0.897	0.029	0.947
3	2	0.891	-0.146	-0.162	0.902	0.765	0.036	0.875
1	3	-0.410	-0.110	-0.097	-0.428	0.737	0.074	0.859
2	3	-0.351	-0.090	-0.078	-0.367	0.718	0.063	0.847
3	3	-0.286	-0.066	-0.054	-0.302	0.577	0.063	0.760
1	4	0.673	-0.100	-0.108	0.693	0.733	0.054	0.856
2	4	0.710	-0.082	-0.089	0.722	0.716	0.047	0.846
3	4	0.757	-0.061	-0.074	0.767	0.613	0.046	0.782

Sitio 1 = Bosque de Encino; Sitio 2 = Bosque de Pino-Encino y Sitio 3 = Bosque de Pino; β_0 , β_1 = Coeficientes del modelo; R^2 = Coeficiente de determinación; RECM = Raíz del error cuadrático medio.

Tasa de degradación de la hojarasca

En el Cuadro 2 se observan los diferentes valores de k , que corresponde a la velocidad de la degradación en los tres tipos de bosque: para BE -0.259, para BPE -0.209 y para BP -0.158. El tiempo requerido para la descomposición al 50 y 99 % fue de 2.67 a 17.74 años para BE, y de 4.38 a 29.11 años para BP. La tasa de descomposición documentada por Moreno *et al.* (2018) fue de -0.424 a -0.425, durante un año de estudio, en un bosque templado y el tiempo necesario para la descomposición fue de 1.6 (50 %) a 10.8 años (99 %).

Tabla 4. Tasa de degradación (k) para degradar 50 y 99 % de la hojarasca representada en años en los tres tipos de bosque.

Sitio	k	$t_{0.5}$	$t_{0.99}$
BE	-0.259	2.67	17.76
BPE	-0.209	3.32	22.05
BP	-0.158	4.39	29.15

La predicción de la degradación de la hojarasca (Figura 4) indica la distribución de los datos (peso relativo de la hojarasca) y la predicción de los valores para cada tipo de bosque (modelo de Olson), durante el tiempo de ensayo. Se advierte la dispersión de los datos en cada tipo de bosque y la predicción que debieron tener los datos durante el experimento, de acuerdo al modelo referido.

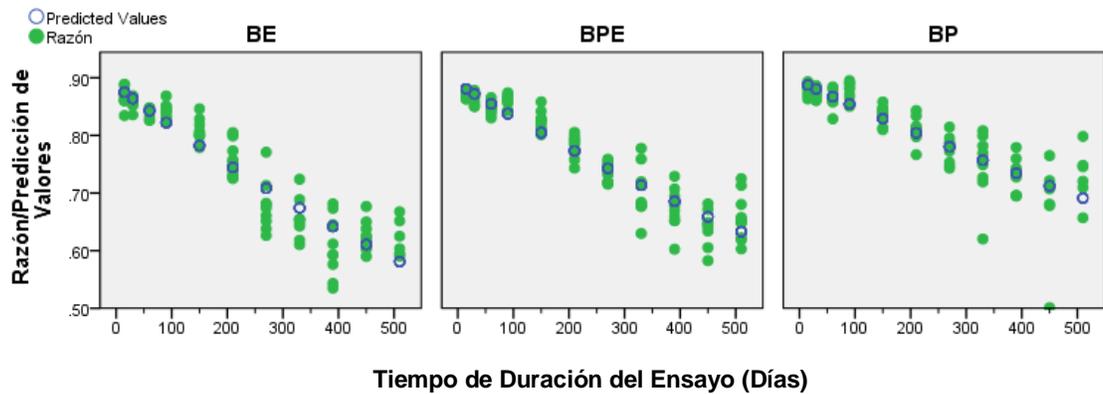


Figura 4. Predicción de la degradación de la hojarasca por tiempo de duración del ensayo en los tres tipos de bosques.

CAPÍTULO III: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA HOJARASCA DURANTE EL PROCESO DE DESCOMPOSICIÓN EN BOSQUES TEMPLADOS (BORRADOR SIN REVISIÓN)

Resumen

La hojarasca (hojas, ramas, flores, frutos u otros componentes) representa la entrada principal del ciclo de nutrientes y el aporte de materia orgánica al suelo. El objetivo de este estudio fue determinar la velocidad de degradación y la composición química (carbono, nitrógeno, relación CN, lignina, relación LN, fósforo, relación PN,) de la hojarasca durante 510 días en tres sitios de bosque templado en el estado de Nuevo León, México (Bosque de Encino: BE, Bosque de Pino-Encino: BPE y Bosque de Pino: BP). Para determinar la velocidad de degradación se colocaron 110 bolsas con 5 g de hojarasca en 5 parcelas de 20m x 20m por cada sitio. La tasa de degradación fue mayor en bosque de encino con valores de 27.6, 22.9 y 17.1%, para BE, BPE y BP, respectivamente. El contenido de C para el término del estudio fluctuó de 36.6 a 39.4%; N de 0.92 a 0.94%; relación CN de 38.6 a 49.3; L de 46.9 a 57.1%; relación LN de 50.1 a 69.6; P de 0.034 a 0.063% y relación NP de 15.6 a 27.6. Los resultados muestran que la descomposición de la hojarasca es más rápida en el bosque de encino. Se presentaron diferencias significativas en la composición química de la hojarasca durante el tiempo de la evaluación.

Palabras clave: bosque templado, hojarasca, degradación, composición química, nitrógeno.

Summary

Litterfall (leaves, branches, flowers, fruits or other components) represents the main entrance to the nutrient cycle and the supply of organic matter to the soil. The objective of this study was to determine the degradation rate and chemical composition (carbon, nitrogen, CN ratio, lignin, LN ratio, phosphorus, PN ratio) of leaf litter during 510 days in three temperate forest sites in the state of Nuevo Leon, Mexico (Oak Forest: BE, Pine-Oak Forest: BPE and Pine Forest: BP). To determine the rate of degradation, 110 bags of 5 g of litter were placed in 5 plots of 20m x 20m for each site. The degradation rate was higher in oak forest with values of 27.6, 22.9 y 17.1%, for BE, BPE and BP, respectively. The C content for the end of the study fluctuated from 36.6 to 39.4%; N from 0.92 to 0.94%; CN ratio from 38.6 to 49.3; L from 46.9 to 57.1%; LN ratio from 50.1 to 69.6; P from 0.034 to 0.063% and NP ratio from 15.6 to 27.6. The results show that leaf litter decomposition is faster in the oak forest. There were significant differences in litterfall chemical composition during the time of the assessment.

Keywords: temperate forest, litterfall, degradation, chemical composition, nitrogen.

Introducción

La descomposición de la hojarasca y liberación de nutrientes permiten el adecuado funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos, por lo que favorece óptimas condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo (León *et al.*, 2008). La descomposición de la hojarasca comprende dos etapas: la primera, durante la cual se descomponen los compuestos lábiles (proteínas, algunos fenoles, almidones y azúcares), la segunda, más lenta debido a que se descomponen compuestos recalcitrantes como son taninos, celulosa, hemicelulosa y lignina (Castellanos y León, 2011).

La descomposición es clave en el funcionamiento de los bosques debido a que si los nutrientes son liberados rápidamente pueden perderse por lixiviación edáfica o por volatilización (Palma *et al.*, 1998). Sin embargo, si la descomposición es muy lenta, los nutrientes disponibles para las plantas pueden limitar el crecimiento y desarrollo de las plantas (Bubb *et al.*, 1998; Montagnini y Jordan, 2002).

La descomposición de la hojarasca constituye uno de los principales flujos de carbono, debido a que éste elemento regresa a la atmósfera mediante la respiración de los organismos descomponedores. Dicho proceso depende de la composición química de la hojarasca, las condiciones ambientales y los organismos presentes en el suelo (O'Neill *et al.*, 2003).

La relación CN es un indicador de la susceptibilidad de la hojarasca para ser degradada. La hojarasca con alta relación CN se degrada más lento que cuando ésta relación es baja. A mayor relación CN, mayor cantidad de carbono en relación con el nitrógeno; por tanto, el nitrógeno actúa como factor limitante para los descomponedores produciéndose una descomposición más lenta debido a la baja calidad del sustrato (Swift y Anderson, 1989). El contenido de lignina y la relación LN también se consideran indicadores de la descomposición (Uratani *et al.*, 2004), así como la relación NP (Aerts, 1999; Marklein *et al.*, 2015).

La precipitación y temperatura son los principales factores que regulan el proceso de descomposición (Couteaux *et al.*, 1995). En los climas húmedos tropicales la descomposición de la hojarasca tiende a ser más rápida que en las regiones templadas y frías (Aerts, 1999; Xiaogai *et al.*, 2013; Marklein *et al.*, 2015). Por otro lado, el exceso de precipitaciones provoca una disminución de la descomposición debido a que produce condición de anaerobiosis (Smith *et al.*, 1989). El contenido de lignina y nutrientes pueden variar con la precipitación. En cambio, el contenido P y N presentan un incremento al aumentar las precipitaciones (Austin y Vitousek, 1998, 2000).

En este sentido, la hipótesis planteada en la presente investigación fue que la degradación de la hojarasca está influenciada por las condiciones ambientales, composición química y por el tipo de comunidad vegetal. El objetivo del presente estudio es evaluar la tasa de degradación y la composición química de la hojarasca durante el proceso de descomposición durante 510 días en tres tipos de bosques templados: bosque de encino, pino-encino y encino, en Nuevo León, México.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el Campus Ecológico Bosque Escuela de la Universidad Autónoma de Nuevo León, ubicado en el municipio de Iturbide, Nuevo León (24°42'28" N; 99°51'43" O). La vegetación predominante es Bosque de Pino-Encino, a altitud de 1600 m s.n.m. (Figura 5). La precipitación media anual es de 635 mm y la temperatura media anual es de 14 °C. (Bravo-Garza, 1999).

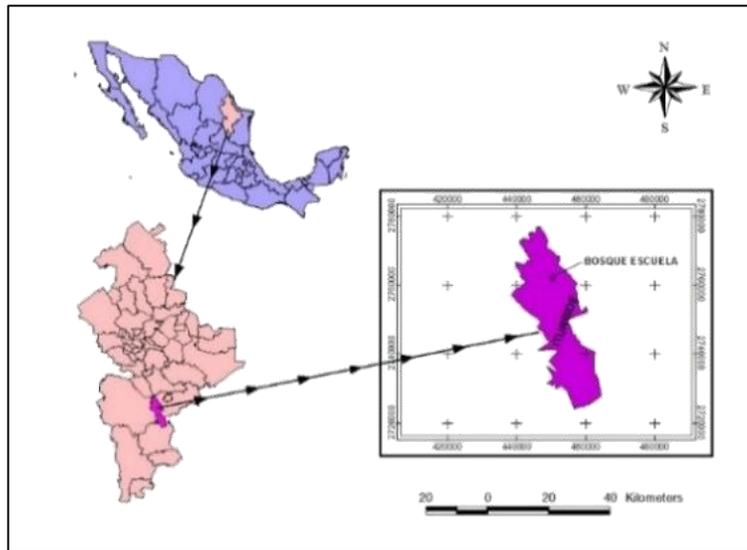


Figura 5. Área de estudio.

Colecta de muestras de degradación

Se utilizó el método de la bolsa de hojarasca (*litter bag*) (Bocock y Gilbert, 1957); que consiste en recolectar 5 g de hojarasca recién caída en bolsas de 25 cm x 20 cm de tela nylon de 1 mm de luz. Esta apertura permite el acceso al interior de las bolsas por un rango de detritívoros invertebrados, pero minimiza las pérdidas por fragmentación (Douce y Crossley, 1982). En cada bolsa, se depositó una mezcla homogénea de los componentes de la hojarasca (hojas, ramas, estructuras reproductivas y otros componentes de la hojarasca). Se colocaron 110 bolsas en cinco parcelas experimentales (20 m x 20 m) por cada sitio (ecosistema) de estudio (Figura 6). En cada parcela, se colocaron 22 bolsas de

hojarasca. Se recolectaron 30 bolsas de hojarasca cada 15, 30, 60, 90, 150, 210, 270, 330, 390, 450 y 510 días, las cuales se llevaron al laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL, donde se secaron a 65°C, hasta peso constante (Figura 7). Con esos datos se calculó el porcentaje de pérdida de peso en función del tiempo de descomposición.



Figura 6. Bolsas de degradación en campo (izquierda) y colecta de las bolsas de degradación a diferentes tiempos de incubación (días).

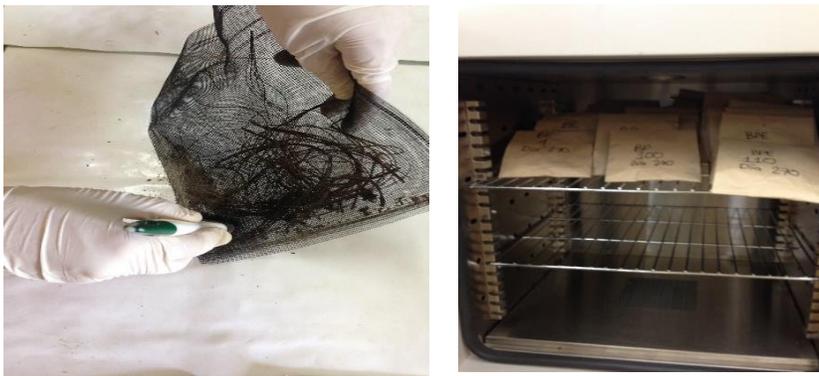


Figura 7. Limpieza de las bolsas de degradación (izquierda) y determinación de peso seco a 65 °C en una estufa de aire forzado.

Análisis Químico en Laboratorio

Para determinar el contenido de nitrógeno (N) y carbono (C), por combustión seca, se utilizó el analizador de CHNS/O Analyzer, 2400 serial II, marca Perkin Elmer. Para determinar el contenido de fósforo (P) por colorimetría (AOAC, 1997) en un Espectrofotómetro UV-Visible (marca Perkin-Elmer, modelo Lambda 1A). El contenido de lignina de acuerdo con los procedimientos descritos por Van Soest *et al.* (1991), mediante el procedimiento con ácido sulfúrico al 72%, el residuo fue incinerado a 550°C. (Figura 8).



a)



b)



c)



d)

Figura 8. Determinación de C y N en el equipo analizador de CHNS/O (a); determinación de P por colorimetría en espectrofotómetro UV (b); determinación de lignina con los procedimientos descritos por Van Soest *et al.* 1991, mediante el procedimiento de H₂SO₄ al 72% (c) y (d).

Variables ambientales

Se registraron las siguientes variables ambientales: humedad relativa (%), temperatura ambiente (°C) y temperatura del suelo (°C), registradas en los sensores automatizados marca HOBO cada hora y precipitación pluvial diaria (mm) registrada en un pluviómetro marca HOBO. La Tabla 5 ilustra la temperatura media ambiente del aire (°C), la temperatura media del suelo (°C), humedad relativa media del aire (%), y la precipitación media mensual (mm) registrada durante el periodo de estudio.

Tabla 5. Temperatura del aire (°C), temperatura del suelo (°C) y humedad relativa (%) media mensual y precipitación (mm) registrada en el tiempo (días) de incubación (2016-2018).

Tiempo (días)	Variable Ambiental			
	(Temp del aire, °C)	(Temp. del suelo, °C)	(Humedad Relativa, %)	(Precipitación, mm)
0	14.09	13.75	85.64	0.0
15	15.43	13.90	69.47	9.65
30	14.32	12.90	60.35	0.0
60	15.54	12.80	52.86	10.41
90	16.24	13.63	48.02	85.85
150	20.33	17.45	55.75	66.55
210	23.17	20.88	65.65	106.68
270	21.41	19.95	73.91	187.46
330	18.83	17.52	73.18	252.22
390	12.68	12.50	67.74	19.30
450	14.51	12.43	66.65	54.61
510	19.37	15.76	66.56	110.24
Total				902.98

Análisis estadísticos

Los datos de degradación de la hojarasca fueron sometidos al análisis de varianza. Para comprobar los supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad se emplearon la prueba de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro Wilk (Steel y Torrie, 1980). Debido a que los datos no presentaron distribución normal se utilizó la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis (Ott, 1993). Para describir la tasa de degradación se ajustaron mediante regresión no lineal dos modelos de descomposición. El primer fue el simple exponencial negativo de la ecuación de Olson (1963), ecuación (1).

$$X_t/X_0 = e^{-kt} \quad (1)$$

Donde: X_t , masa remanente de la hojarasca en un tiempo (t , en días), X_0 , masa inicial de hojarasca en el tiempo = 0, k , constante de descomposición (días^{-1}), t , tiempo expresado en días, e , base de los logaritmos neperianos. Al tener el valor de la constante de descomposición, se calculó la vida media o el tiempo que tarda en descomponerse el 50% ($t_{0.5}$) y el 99% ($t_{0.99}$): $t_{0.5} = -0.693/k$ y $t_{0.99} = -4.605/k$ (Olson, 1963).

El segundo modelo fue el doble exponencial negativo (Bunnell y Tait, 1974), el cual toma en cuenta la fracción lábil o de fácil descomposición (p) y de una fracción recalcitrante o de difícil descomposición, ecuación (2).

$$X_t/X_0 = pe^{-k_1 t} + (1-p)e^{-k_2 t} \quad (2)$$

Donde: p : parámetro de la fracción lábil o de fácil descomposición, $(1-p)$: fracción recalcitrante o de difícil descomposición, k_1 : constante de descomposición de la fracción lábil, k_2 : constante de descomposición de la fracción recalcitrante, t , tiempo (días) que transcurre entre X_0 y X_t . Para la selección de los modelos se emplearon como indicadores de ajuste, el coeficiente de determinación (R^2), el estadístico Durbin-Watson (D-W) y la suma de cuadrados del error. Los análisis estadísticos de los modelos se llevaron a cabo con el programa *Statgraphics*

Centurion XVII (StatPoint Technologies, Inc.). Los análisis estadísticos de degradación, masa seca residual y composición química de la hojarasca se realizaron con el paquete estadístico para las ciencias sociales (SPSS, por sus siglas en inglés) versión 22.0 para Windows.

Resultados y Discusión

Descomposición y Masa Remanente de la hojarasca

La descomposición de la hojarasca se presenta en dos etapas; la primera en la cual la descomposición fue más rápida de los 15 a los 270 días, y la segunda etapa más lenta del día 330 al 510, en la cual se mantiene constante la tendencia de descomposición en los tres tipos de bosque hasta el día 210. La prueba Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los ecosistemas de estudio en los tiempos de incubación para la degradación (%), y masa remanente se muestran en el Tabla 2. La degradación mostró diferencias significativas en diez tiempos de incubación y la masa remanente en siete tiempos de incubación de los once estudiados. Los resultados observados en el presente estudio demuestran que existen diferencias en la degradación de la hojarasca entre los sitios (ecosistemas) de estudio. Los resultados reportados por López *et al.* (2018) mencionan una tasa de descomposición mayor en los primeros 150 días que en los 210 días restantes en un bosque templado en Durango, en este sentido, el comportamiento es diferente en el presente estudio, en el cual la mayor descomposición es a partir del día 270 en los tres tipos de bosques (Figura 2). De la misma manera, Villavicencio (2012) encontró una descomposición rápida durante los primeros 176 días.

Las pruebas de normalidad del total de los datos de masa remanente, degradación y materia seca residual, se observan en la Tabla A1 (Anexo), en el cual se observa una distribución no normal. Los resultados por sitio de estudio y variables analizadas, se indican en la Tabla A2.

Tabla 6. Resultados de la prueba Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los ecosistemas estudiados a los diferentes tiempos de incubación respecto a la degradación, masa remanente y materia seca residual de la hojarasca.

Tiempo	Estadístico	Degradación (%)	Masa Remanente	Materia Seca Residual
15	χ^2	3.254	2.888	3.405
	Valor p	0.196	0.236	0.182
30	χ^2	6.906	4.885	7.095
	Valor p	0.032	0.087	0.029
60	χ^2	12.095	3.863	12.282
	Valor p	0.002	0.145	0.002
90	χ^2	14.170	8.596	13.987
	Valor p	0.001	0.014	0.001
150	χ^2	8.960	5.257	9.094
	Valor p	0.011	0.072	0.011
210	χ^2	10.131	6.806	10.107
	Valor p	0.006	0.033	0.006
270	χ^2	16.612	14.034	16.612
	Valor p	<0.001	<0.001	<0.001
330	χ^2	9.855	9.547	9.860
	Valor p	0.007	0.008	0.007
390	χ^2	19.326	15.030	16.839
	Valor p	<0.001	0.001	<0.001
450	χ^2	7.876	7.645	13.342
	Valor p	0.019	0.022	0.001
510	χ^2	11.028	6.842	11.028
	Valor p	0.004	0.033	0.004

Valores ($p < 0.05$) indican diferencias significativas entre los ecosistemas, se muestran en negritas.

Materia seca residual de la hojarasca

Los resultados para la materia seca residual de la hojarasca se ilustran en la Figura 6 y Tabla 6. La materia seca residual mostró diferencias significativas en diez de los once tiempos analizados. Al finalizar el tiempo de incubación de 510 días, la degradación fue de 27.6 (bosque de encino), 22.9 (bosque pino-encino) y 17.2% (bosque de pino). En un estudio realizado por Moreno *et al.* (2018), en un bosque templado de Durango, donde evaluaron la degradación durante un año, encontraron porcentajes de degradación de 31 y 35%, los cuales son más altos en relación con el presente estudio. Rocha y Ramírez (2009) obtuvieron una descomposición de 34-52% en bosque de Pino-Encino lo cual fue evaluado durante 10 meses en Chiapas. Estos valores dependen de la composición química de la hojarasca.

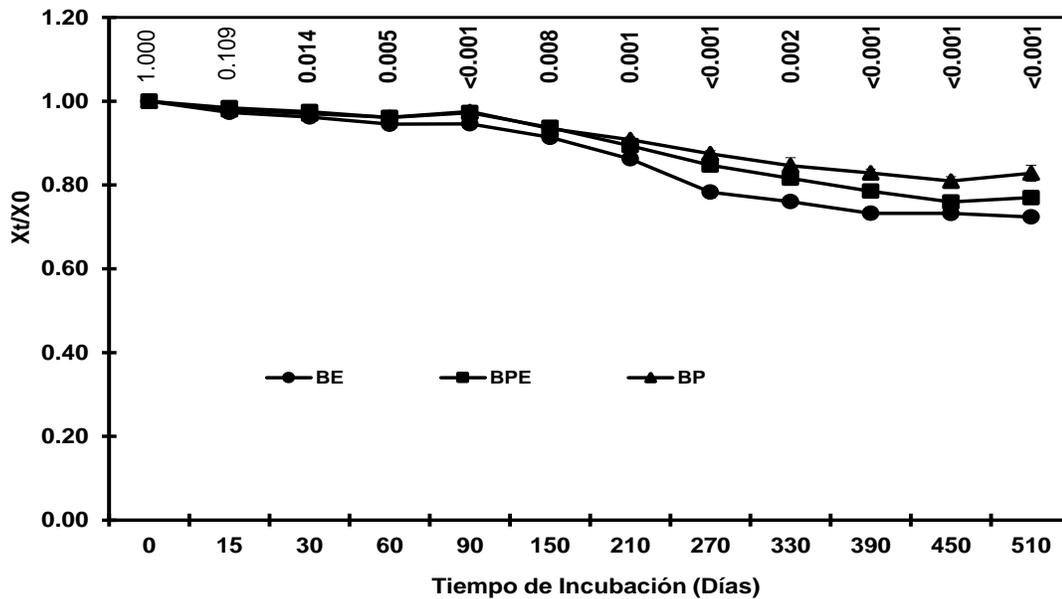


Figura 9. Materia Seca Residual (X_t/X_0) de la hojarasca por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques estudiados. Cada valor graficado representa la media ($n= 10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la figura. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino).

Tasa de descomposición

Los modelos analizados en la presente investigación se ajustaron bien, de acuerdo al coeficiente de determinación (R^2), SCE y $D-W$, al no presentar diferencias estadísticas los dos modelos son iguales para los tres tipos de bosques. (Tabla 7).

La tasa de degradación de la hojarasca (k) se obtuvo por la ecuación del modelo simple exponencial de Olson (1963). Los valores son de -0.259, -0.209 y -0.158 para BE, BPE y BP, respectivamente. El tiempo requerido para la descomposición al 50 y 99% fue de 2.6 a 17.7 años para BE y de 4.3 a 29.1 años para BP. La tasa de descomposición mencionada por Moreno *et al.* (2018) en Durango fue de -0.424 a -0.425, durante un año de estudio en un bosque templado y el tiempo necesario para la descomposición fue de 1.6 años (50%) a 10.8 (99%).

Tabla 7. Modelos de regresión ajustados para materia seca residual en función del tiempo de incubación de la hojarasca en tres tipos de bosque templado en el noreste de México. Tasas de descomposición k (año⁻¹)

Modelo simple exponencial, modelo (1)							
Sitio	Modelo	$t_{0.5}$ (años)	$t_{0.99}$ (años)	k (año ⁻¹)	R^2 (%)	SCE	$D-W$
BE	$0.991524 * e^{(-0.259561 * \text{Años})}$	2.67	17.74	-0.259	91.61	0.10	1.25
BPE	$1.00086 * e^{(-0.209153 * \text{Años})}$	3.31	22.02	-0.209	91.44	0.08	1.12
BP	$0.992334 * e^{(-0.158185 * \text{Años})}$	4.38	29.11	-0.158	84.46	0.08	1.42

Modelo doble exponencial, modelo (2)

Sitio	Modelo	p	$1-p$	k_1	k_2	R^2 (%)	SCE	D-W
BE	$1.74439 * e^{(-0.267624 * \text{Años})} + (0.74439) * e^{(-0.264905 * \text{Años})}$	1.74	0.74	-0.27	-0.26	91.36	0.10	1.21
BPE	$1.55435 * e^{(-0.20133 * \text{Años})} + (0.55435) * e^{(-0.189109 * \text{Años})}$	1.55	0.55	-0.20	-0.19	91.44	0.08	1.12
BP	$1.28726 * e^{(-0.166319 * \text{Años})} + (0.28726) * e^{(-0.16324 * \text{Años})}$	1.29	0.29	-0.17	-0.16	83.97	0.08	1.39

X_t/X_0 : Materia seca residual (1), $t_{0.5}$: Tiempo requerido para tener una descomposición de la hojarasca del 50%, $t_{0.99}$: Tiempo requerido para tener una descomposición de la hojarasca del 99%, k : Tasa de descomposición, R^2 : Coeficiente de determinación, **SCE**: Suma de cuadrados del error, **D-W**: Estadístico Durbin-Watson, p : Fracción lábil, $1-p$: Fracción recalcitrante, k_1 : Constante de descomposición de la fracción lábil, k_2 : Constante de descomposición de la fracción recalcitrante. **Sitios**: **BE**: Bosque de encino, **BPE**: Bosque de pino-encino y **BP**: Bosque de pino.

Composición Química de la hojarasca

El contenido de Carbono, Nitrógeno y la relación C/N se realizaron en cada tiempo de incubación; el contenido de Lignina, relación L/N, Fósforo y relación N/P se realizaron en los tiempos 0, 90, 270, 390 y 510 días.

Los resultados de la prueba Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los diferentes tipos de ecosistemas a diferentes tiempos de incubación respecto a la composición química de hojarasca se muestran en el Tabla 8. El contenido de carbono mostró diferencias significativas en seis tiempos de incubación, el contenido de nitrógeno presentó diferencias significativas en cinco tiempos de incubación y la relación CN mostró diferencias significativas en seis de los doce tiempos analizados. Por otro lado, el contenido de lignina y fósforo presentaron diferencias significativas en los cinco tiempos analizados, la relación LN mostró diferencias significativas en dos de los cinco tiempos analizados y la relación NP presentó diferencias significativas en tres tiempos de incubación.

En las Tablas A3, A4, A5 y A6 (Anexo), se describen a profundidad las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk realizadas para determinar la normalidad de la composición química (total de observaciones y por sitio), en el cual los datos presentaron una distribución no normal.

Tabla 8. Resultados de la prueba Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los ecosistemas a diferentes tiempos de incubación respecto a la composición química de la hojarasca. Carbono (C), Nitrógeno (N), Relación CN (CN), Lignina (L), Relación LN (LN), Fósforo (P), Relación NP (NP).Espacios en blanco significa que no se analizaron las muestras.

Tiempo	Estadístico	C	N	C/N	L	L/N	P	N/P
0	χ^2	0.165	7.440	6.754	24.351	10.692	18.678	7.280
	Valor <i>p</i>	0.921	0.024	0.034	<0.001	0.005	<0.001	0.026
15	χ^2	0.289	0.194	0.279				
	Valor <i>p</i>	0.865	0.907	0.870				
30	χ^2	4.772	5.972	7.930				
	Valor <i>p</i>	0.092	0.050	0.019				
60	χ^2	3.677	11.259	8.255				
	Valor <i>p</i>	0.159	0.004	0.016				
90	χ^2	1.340	0.396	0.436	25.055	3.074	16.258	8.410
	Valor <i>p</i>	0.512	0.820	0.804	<0.001	0.215	<0.001	0.015
150	χ^2	19.951	16.573	18.488				
	Valor <i>p</i>	<0.001	<0.001	<0.001				
210	χ^2	11.285	4.505	4.328				
	Valor <i>p</i>	0.004	0.105	0.115				
270	χ^2	4.661	8.379	8.826	23.611	4.978	22.934	21.429
	Valor <i>p</i>	0.097	0.015	0.012	<0.001	0.083	<0.001	<0.001
330	χ^2	16.523	1.676	3.891				
	Valor <i>p</i>	<0.001	0.433	0.143				
390	χ^2	7.195	10.581	11.708	21.494	14.627	21.154	3.788
	Valor <i>p</i>	0.027	0.005	0.003	<0.001	0.001	<0.001	0.150
450	χ^2	10.162	0.159	1.066				
	Valor <i>p</i>	0.006	0.924	0.587				
510	χ^2	6.279	1.735	2.425	14.205	4.682	12.656	3.625
	Valor <i>p</i>	0.043	0.420	0.297	0.001	0.096	0.002	0.163

Valor *p* <0.05, en negritas indican diferencias significativas entre los ecosistemas evaluados.

Contenido de Nitrógeno

En lo que respecta al Contenido de nitrógeno, se encontró que el valor menor para el día 0 fue para BP y el valor mayor se presentó en el BE; los valores fluctuaron de 0.97 a 1.34%, respectivamente. Para el día 510, el valor menor fue para BP con 0.92% y BE con 0.94%. De acuerdo a Ferrera y Alarcón (2001), si el contenido de N es bajo, la descomposición de la materia orgánica disminuye drásticamente y por ende la mineralización de carbono depende del contenido de N. Los resultados se muestran en la Figura 7.

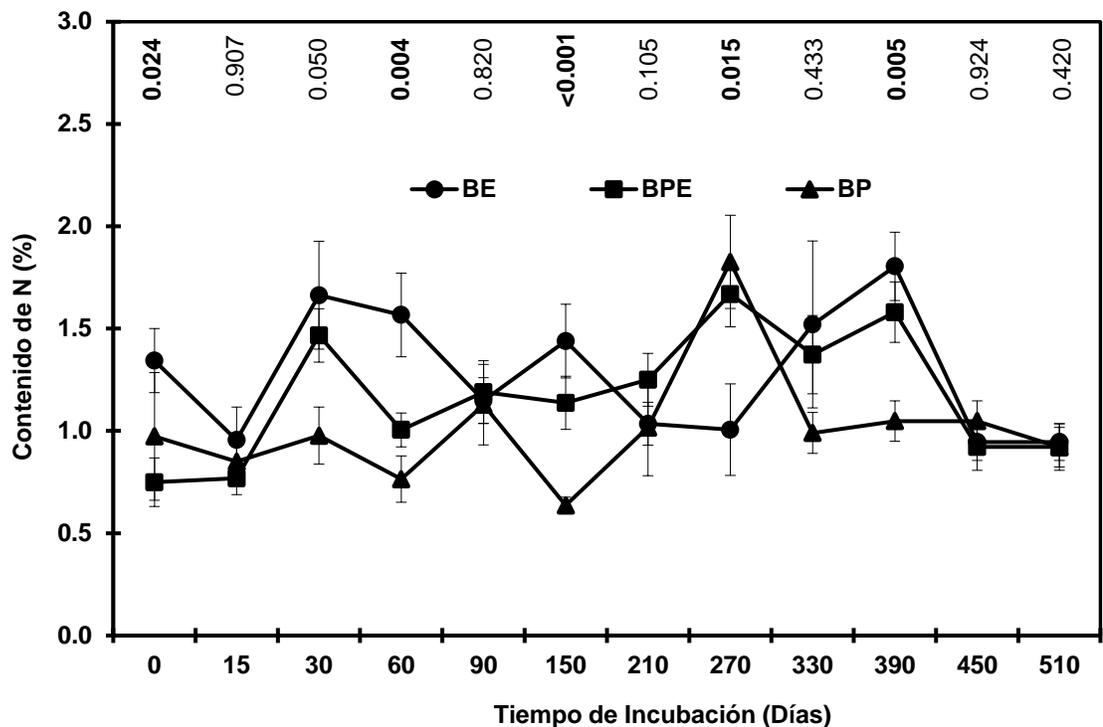


Figura 10. Contenido de nitrógeno en la hojarasca por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques presentes en el sitio de estudio. Cada valor graficado representa la media ($n=10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la gráfica. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino).

Contenido de Carbono

Por otro lado, el contenido de carbono, se encontró que el valor menor para el día 0 fue para BP y el valor mayor se presentó en el BE, los cuales son 53.47 a 55.17%, respectivamente. En el día 510, los valores fluctuaron de 36.60 a 39.40% para BE y BP, respectivamente. El carbono desempeña un papel crucial en el control del nitrógeno. (Cantú y Yáñez, 2018). Por otro lado Yerena *et al.* (2012) encontraron valores de contenido de carbono en hojas (48.14%), ramillas (45.70%) y corteza (42.08%). Los resultados se ilustran en la Figura 8.

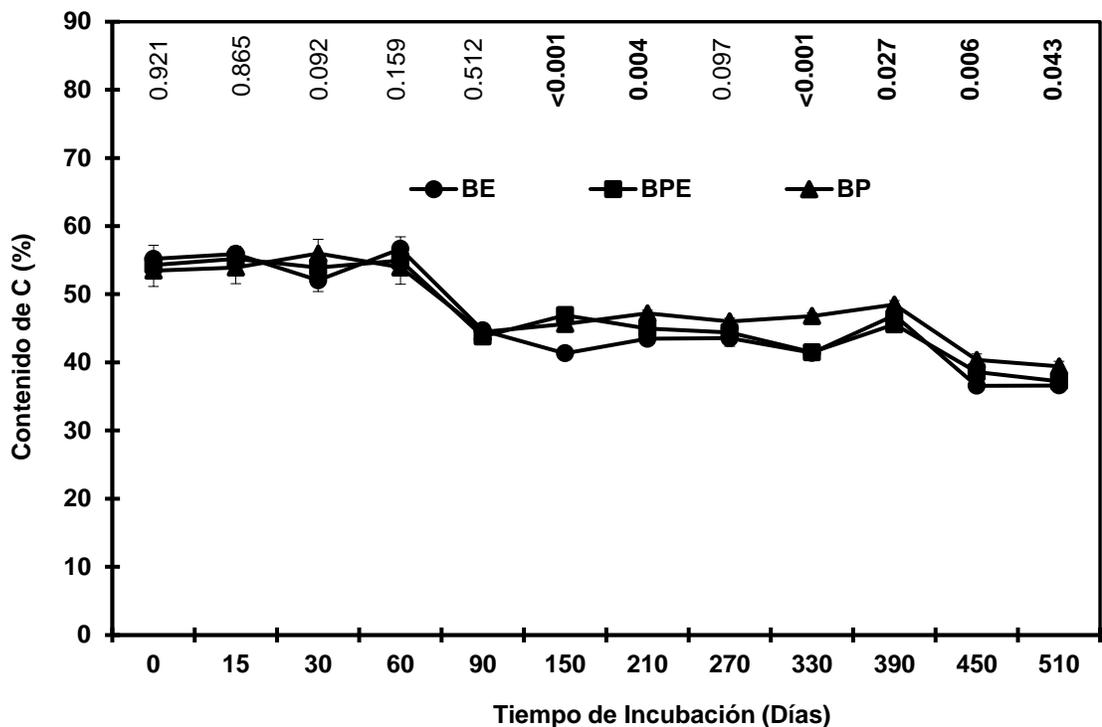


Figura 11. Contenido de carbono en la hojarasca por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques presentes en el sitio de estudio. Cada valor graficado representa la media ($n= 10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la gráfica. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino).

Relación Carbono/Nitrógeno

Respecto a la relación CN, se encontró que el BE presentó el menor valor con 45.14 y el BP el mayor valor con 93.70 para el día 0 de incubación. Al final del periodo de evaluación, los valores fluctuaron de 38.61 a 49.39 para BE y BPE, respectivamente. Los valores altos de la relación CN indican que la hojarasca se descompone más lento lo que se debe principalmente a la calidad de la hojarasca. (Swift and Anderson, 1989). Por otro lado, Álvarez (2001) menciona que si el contenido de C es mayor que la concentración de N, es inmovilizado el N por la actividad microbiana y por lo tanto existirá menos N para ser asimilado por las plantas. Los resultados se ilustran en la Figura 9.

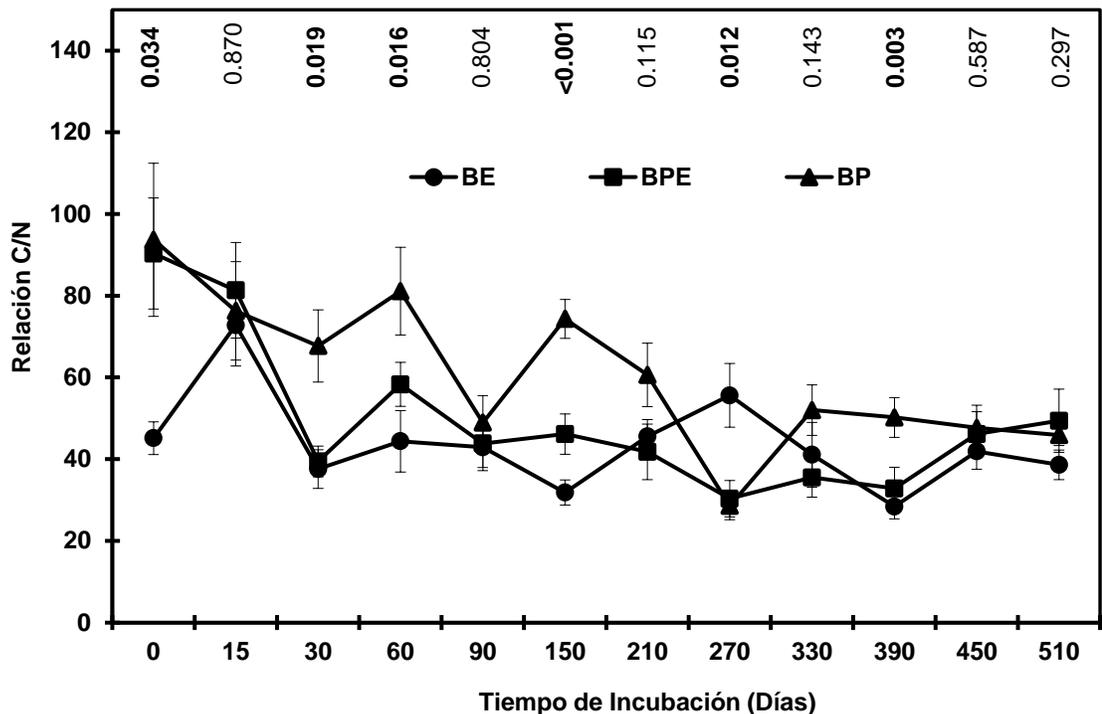


Figura 12. Relación carbono/nitrógeno por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques presentes en el sitio de estudio. Cada valor graficado representa la media ($n= 10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la gráfica. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino).

Contenido de Lignina

La determinación de lignina se realizó para los días de incubación 0, 90, 270, 390 y 510. Los resultados encontrados para lignina en el día 0 de incubación fue de 41.46 y 55.79% para BE y BP, respectivamente. Para el día 510, los valores fluctuaron de 46.95 y 57.16% para BE y BP, respectivamente. Meentemeyer (1978) menciona que además del N, la lignina ha sido considerada un indicador de la materia vegetal y por tal motivo el contenido de lignina es uno de los principales predictores de las tasas de degradación. Los resultados se indican en la Figura 10.

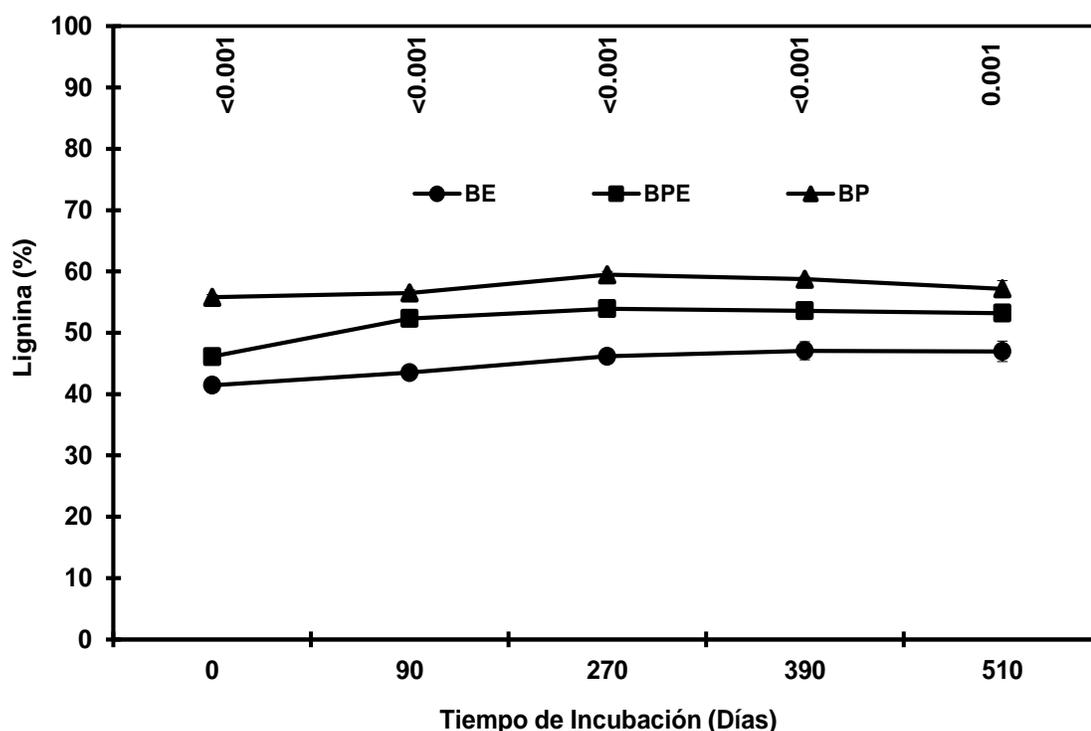


Figura 13. Contenido de lignina en la hojarasca por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques presentes en el sitio de estudio. Cada valor graficado representa la media ($n= 10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la gráfica. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino).

Relación Lignina/Nitrógeno

La relación LN se determinó al dividir el contenido de lignina y el contenido de nitrógeno. Los valores fluctuaron de 34.30 a 98.11 para BE y BP, respectivamente, para el día 0 de incubación. Para el día 510, los valores fluctuaron de 50.14 a 69.67 para BE y BPE (Figura 11). Las relaciones de CN, NP y LN son consideradas como calidad de la hojarasca por lo que pueden determinar la biomasa microbiana y la mineralización de los nutrientes (Castellanos y León, 2011).

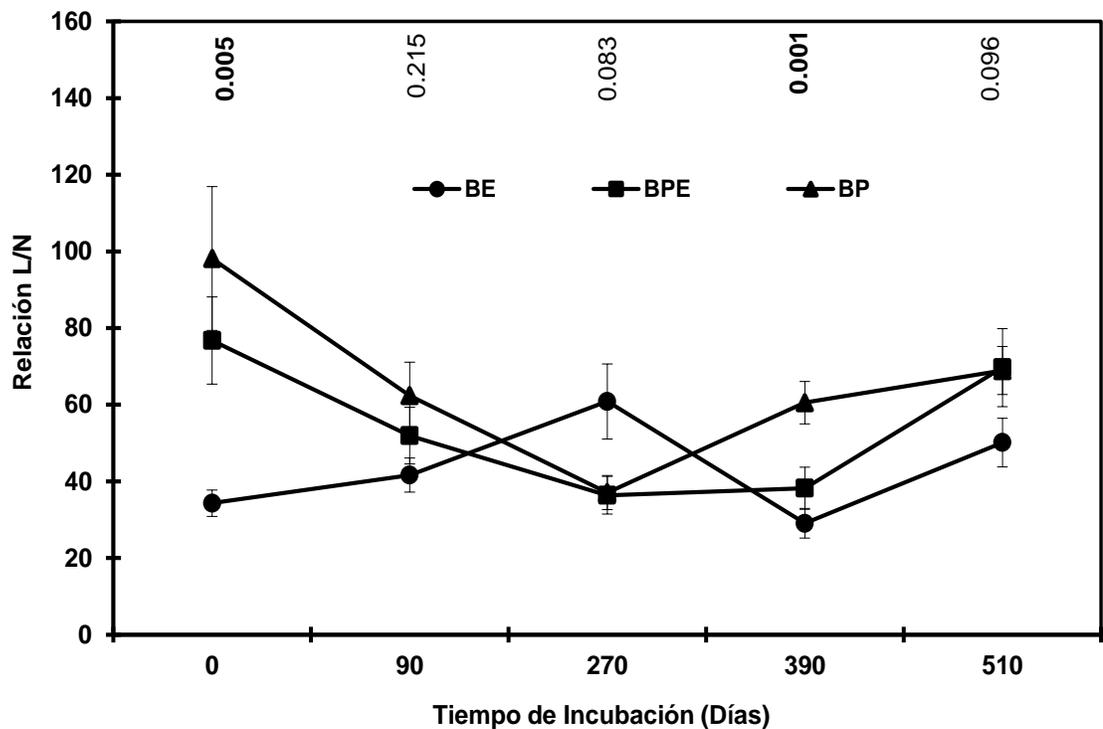


Figura 14. Relación lignina/nitrógeno por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques presentes en el sitio de estudio. Cada valor graficado representa la media ($n= 10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la gráfica. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino).

Contenido de Fósforo

La determinación de fósforo se realizó para los días de incubación 0, 90, 270, 390 y 510. Los resultados encontrados para fósforo en el día 0 de incubación fueron de 0.032 y 0.059% para BP y BE, respectivamente. Para el día 510, los valores fluctuaron de 0.034 y 0.063% para BP y BE, respectivamente. De acuerdo a Álvarez (2001), menciona que el contenido de lignina, fósforo y la relación de LN, son indicadores de poco valor en la descomposición de la hojarasca. Los resultados se muestran en la Figura 12.

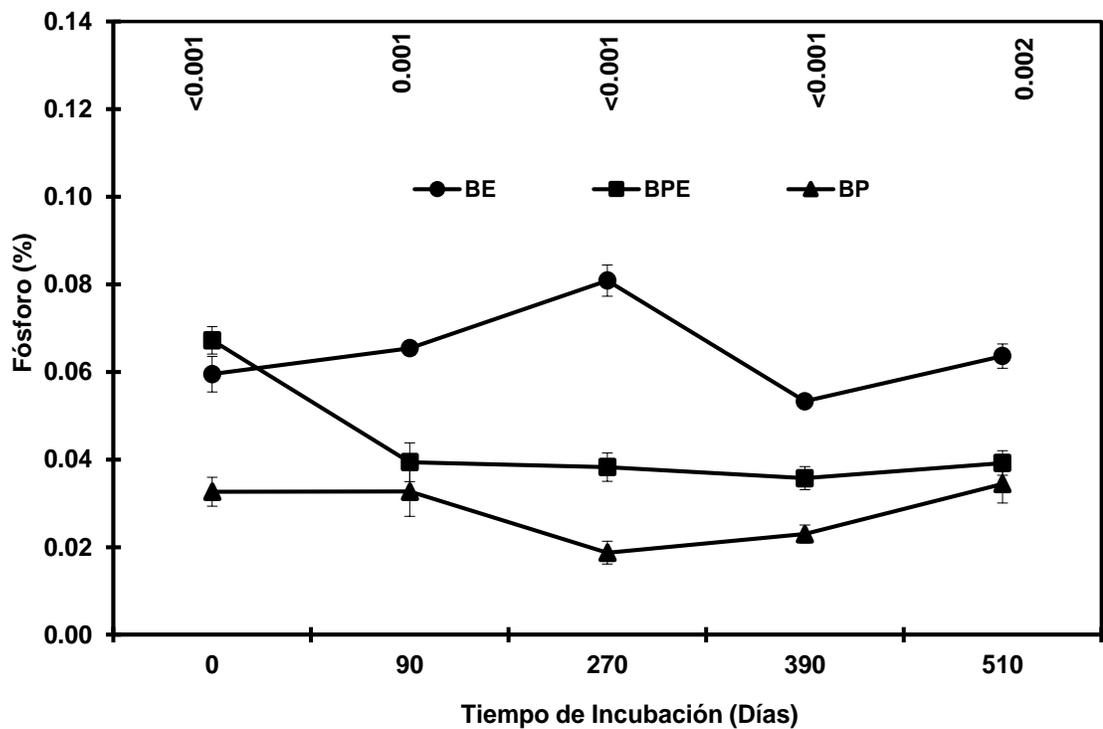


Figura 15. Contenido de fósforo en la hojarasca por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques presentes en el sitio de estudio. Cada valor graficado representa la media ($n= 10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la gráfica. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino).

Relación Nitrógeno/Fósforo

La relación NP se determinó al dividir el contenido de nitrógeno y el contenido de fósforo. Los valores fluctuaron de 11.61 a 30.29 para BPE y BP, respectivamente para el día 0 de incubación. Para el día 510, los valores van de 15.62 a 27.61 para BE y BP (Figura 13).

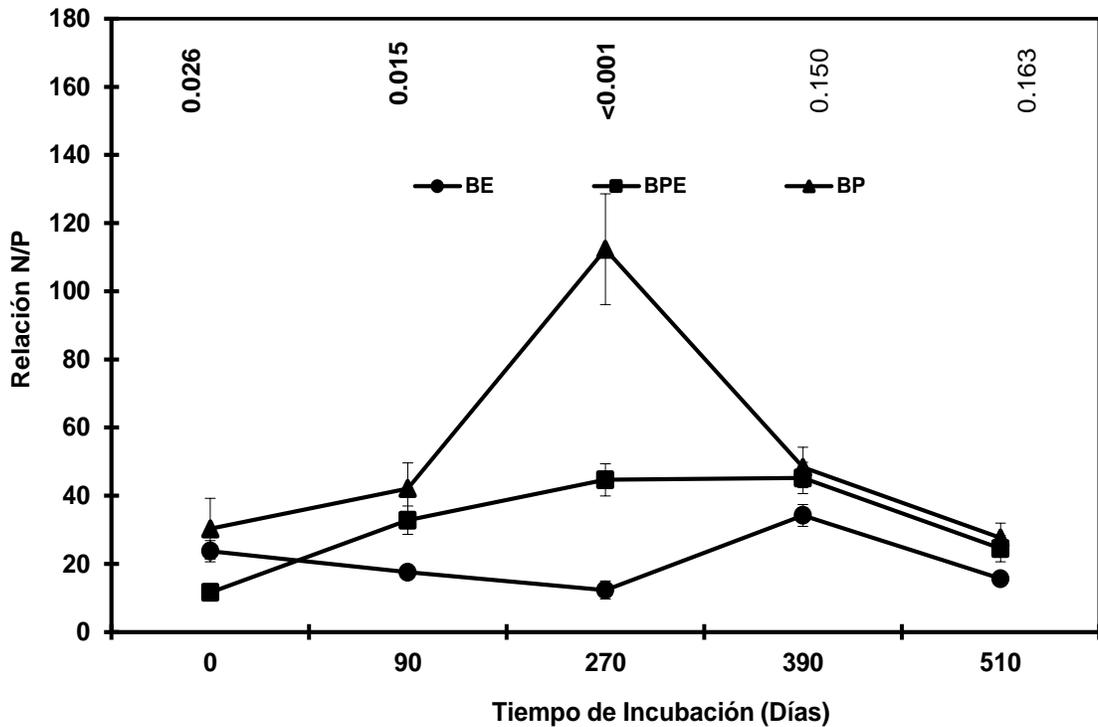


Figura 16. Relación nitrógeno/fósforo por tiempo de incubación en los tres tipos de bosques presentes en el sitio de estudio. Cada valor graficado representa la media ($n= 10$) \pm error estándar. El valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los tres tipos de bosques se muestra para cada tiempo de incubación dentro de la gráfica. Probabilidades estadísticamente significativas ($p < 0.05$) se denotan en negritas. (BE: bosque de encino, BPE: pino-encino y BP: pino).

Correlación entre la masa remanente de la hojarasca, las variables ambientales y la composición química de la hojarasca

La correlación de las variables se presenta de manera general para el ecosistema estudiado. En la tabla 9 se muestra el coeficiente de Spearman y el valor de significancia para las variables ambientales y la composición química asociadas a la masa remanente para los tres tipos de bosques presentes en el sitio de estudio (n= 360).

La masa remanente presentó relaciones positivas con degradación (0.993**), relación CN (0.319***) y relación LN (0.205*); los valores negativos se presentaron con N (-0.135*), P (-0.026), relación NP (-0.158), lignina (-0.059), temperatura del aire (-0.258**), humedad relativa (-0.107*), precipitación (-0.384**) y temperatura del suelo (-0.068).

La degradación mostró correlaciones positivas con relación CN (0.333**) y relación LN (0.210*); las correlaciones negativas se encontraron con N (-0.149**), P (-0.046), relación NP (-0.144), lignina (-0.030), temperatura del aire (-0.262**), humedad relativa (-0.102), precipitación (-0.383**) y temperatura del suelo (-0.067).

El nitrógeno presentó relaciones positivas se presentaron con relación NP (0.724**), lignina (0.049), humedad relativa (0.014) y precipitación (0.038); las relaciones negativas con relación CN (-0.953**), P (-0.081), relación LN (-0.964**), temperatura del aire (-0.015) y temperatura del suelo (-0.013).

La relación CN presentó correlaciones positivas con P (0.237**), relación LN (0.074), temperatura del aire (0.049) y precipitación (0.246**); las correlaciones negativas se observaron con relación NP (-0.245**), lignina (-0.235**), humedad relativa (-0.186*) y temperatura del suelo (-0.067).

El fósforo presentó correlación positiva con temperatura del aire (0.047), humedad relativa (0.111) y temperatura del suelo (0.110); la correlación negativa

se encontraron con relación NP (-0.709**), lignina (-0.748**), relación LN (-0.081) y precipitación (-0.070).

La relación NP presentó la relación positiva con lignina (0.517**) y precipitación (0.129); la relación negativa con relación LN (-0.590**), temperatura del aire (-0.062), humedad relativa (-0.092) y temperatura del suelo (-0.157).

El contenido de lignina presentó una relación positiva con relación LN (0.177*), temperatura del aire (0.095), precipitación (0.124) y temperatura del suelo (0.033); la relación negativa con humedad relativa (-0.082).

La relación LN presentó relación positiva con temperatura del aire (0.037) y temperatura del suelo (0.073); relación negativa con humedad relativa (-0.026) y precipitación (-0.059).

Por otro lado, las variables ambientales tuvieron una relación negativa con la masa remanente y degradación, mostrando diferencias significativas en ambas variables en la temperatura del aire y precipitación, humedad relativa presentó diferencias significativas en la masa remanente.

De acuerdo a los resultados mencionados se acepta que las condiciones ambientales influyen en la descomposición de la hojarasca, como lo indica Marmolejo *et al.* (2013).

Tabla 9. Coeficientes de correlación de Spearman (n=360 para N y CN; n=150 para P, NP, L y LN) entre la masa remanente, degradación, variables ambientales. El valor del coeficiente de correlación se ilustra en la parte superior de la línea y el valor de significancia se presenta en la parte inferior de la línea diagonal.

Variable	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12
V1. Masa Remanente		0.993**	-0.135*	0.319***	-0.026	-0.158	-0.059	0.205*	-0.258**	-0.107*	-0.384**	-0.068
V2. Degradación	<0.001		-0.149**	0.333**	-0.046	-0.144	-0.030	0.210*	-0.262**	-0.102	-0.383**	-0.067
V3. Nitrógeno (N)	0.012	0.005		-0.953**	-0.081	0.724**	0.049	-0.964**	-0.015	0.014	0.038	-0.013
V4. Relación CN	<0.001	<0.001	<0.001		0.237**	-0.245**	-0.235**	0.074	0.049	-0.186*	0.246**	-0.067
V5. Fósforo (P)	0.765	0.595	0.346	0.006		-0.709**	-0.748**	-0.081	0.047	0.111	-0.070	0.110
V6. Relación NP	0.065	0.094	<0.001	0.004	<0.001		0.517**	-0.590**	-0.062	-0.092	0.129	-0.157
V7. Lignina (L)	0.489	0.722	0.568	0.006	<0.001	<0.001		0.177*	0.095	-0.082	0.124	0.033
V8. Relación LN	0.015	0.013	<0.001	0.395	0.348	<0.001	0.037		0.037	-0.026	-0.059	0.073
V9. Temperatura del aire	<0.001	<0.001	0.777	0.566	0.584	0.468	0.262	0.667		-0.100	0.600**	0.900**
V10. Humedad Relativa	0.047	0.058	0.799	0.027	0.192	0.280	0.329	0.763	0.223		-0.700**	0.300**
V11. Precipitación	<0.001	<0.001	0.483	0.003	0.410	0.129	0.140	0.491	<0.001	<0.001		0.200*
V12. Temperatura del suelo	0.211	0.216	0.807	0.426	0.198	0.065	0.700	0.392	<0.001	<0.001	0.014	

CONCLUSIONES

La disponibilidad de nutrientes afecta las relaciones entre suelo-planta, depende principalmente de las condiciones climáticas, la composición de la vegetación y los microorganismos del suelo.

Con la finalidad de conocer el aporte de nutrientes al suelo mediante la cuantificación de la producción de la hojarasca y la tasa de velocidad de degradación se ha logrado entender la dinámica de los nutrientes.

Se recomienda estudiar ampliamente los organismos que habitan en el suelo, debido a que los estudios son limitados, de igual manera son piezas clave en la descomposición de la hojarasca por la importancia que tienen de mineralizar e inmovilizar los nutrientes.

Existen diversos estudios relacionados con la acumulación y descomposición de la hojarasca en diferentes ecosistemas, pero desafortunadamente en el matorral espinoso tamaulipeco existen pocos trabajos que relacionen a los microorganismos y las variables climáticas en el proceso de descomposición y liberación de nutrientes.

Por lo tanto, se sugiere realizar investigaciones en las cuales se determinen las tasas de descomposición, mineralización, disponibilidad de nutrientes, enfocados a las características físicas y químicas del suelo, variables ambientales y microorganismos en el suelo, por lo que serán de gran utilidad en el matorral espinoso tamaulipeco.

El conocimiento integral de todos estos factores involucrados en la descomposición de la hojarasca permitirá entender la dinámica de los nutrientes, uno de los procesos más importantes en el ecosistema. Es de suma importancia conocer lo que sucede en los ecosistemas para poder tomar decisiones acertadamente y no poner en riesgo los recursos naturales.

La descomposición de la hojarasca en los tres tipos de bosque es diferente durante el periodo de estudio. En el encinar se registraron los mejores resultados; por lo tanto, se asume que la calidad de dicho material orgánico influye en el proceso.

Los cuatro modelos utilizados tienen buen ajuste (coeficiente de determinación, raíz del error cuadrático medio y coeficiente de correlación de *Pearson*), para el bosque de encino y el de pino-encino; lo contrario se verifica para el bosque de pino, en el que el coeficiente de determinación es inferior con respecto a los otros dos tipos de bosque. En este sentido, el Modelo Exponencial Negativo Simple presenta el mejor ajuste estadístico y una correlación fuerte del coeficiente de *Pearson*.

Los resultados de la tasa de descomposición de la hojarasca al 50 % hacen suponer que la degradación es más lenta en el bosque de pino, con respecto al bosque de pino-encino y encino, con una diferencia aproximada de un año, lo que se atribuye a la presencia de acículas.

La tasa de descomposición y composición química de la hojarasca fueron diferentes en los tres tipos de bosques estudiados; la tasa de degradación es más alta en el bosque de encino (BE) y la menor en el bosque de pino (BP). Los resultados de la tasa de degradación de la hojarasca al 50%, indican que la degradación es más lenta en el bosque de pino con respecto al bosque de pino-encino y bosque de encino, con una diferencia cercana a un año. La correlación de la calidad de hojarasca con la degradación y masa remanente presentaron mayor valor con relación LN y CN, presentaron diferencias significativas; sin embargo, el comportamiento con el resto de la composición química la relación fue inversa y con diferencias significativas para el contenido de nitrógeno, el resto no presentaron diferencias significativas. Por otro lado, el comportamiento de las variables ambientales con la masa remanente y la descomposición de la hojarasca indican que existe una relación inversa con temperatura del aire, humedad relativa, precipitación y temperatura del suelo, y es estadísticamente

significativa para temperatura del aire y precipitación, siendo esta última la que presenta mayor valor de correlación de Spearman. Esto indica que realmente la precipitación es la que puede estar involucrada en la degradación de la hojarasca de manera inversa. Asimismo, la relación LN y CN son los parámetros que están involucrados en el proceso de la descomposición en el tipo de bosque templado.

BIBLIOGRAFÍA

- Aber, J.D., Melillo, J.M., and McClaugherty, C.A. (1990). Predicting long-term patterns of mass loss, nitrogen dynamics and soil organic matter formation from initial fine litter chemistry in temperate forest ecosystems. *Canadian Journal of Botany*, 68, 2201-2208.
- Aerts, R. (1997). Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos*, 79, 439-449.
- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O., Treviño-Garza, E., Jurado-Ybarra, E. y González-Tagle, M. (2008). Efecto del uso del suelo en la fitodiversidad del matorral espinoso tamaulipeco. *Revista Ciencia UANL*, XI(1), 56-62.
- Álvarez-Sánchez, J. (2001). Descomposición y ciclo de nutrientes en ecosistemas terrestres de México. *Acta Zoológica Mexicana*, 1, 11-27.
- AOAC. (1997). Official Methods of Analysis (16th Ed.). Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.
- Austin, A.T., Vitousek, P.M. (1998). Nutrient dynamics on a rainfall gradient Hawaii. *Oecologia*, 113, 519-529.
- Austin, A.T., Vitousek, P.M. (2000). Precipitation, decomposition and litter decomposability of *Metrosideros polymorpha* in native forest on Hawaii. *Journal of Ecology*, 88, 129-138.
- Benavides, A. (1998). El azufre de las plantas. Departamento de Horticultura. UAAAN, 7 pp.
- Bernabé-Santiago, R., Ávila-Calderón, L.E.A. y Rutiaga-Quiñones, J.G. (2013). Componentes químicos de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán. *Madera y Bosques*, 19(2), 21-35.

Bocock, K.L. and O. J.W. Gilbert. (1957). The disappearance of leaf litter under different woodland conditions. *Plant and Soil*, 9, 179-185.

Bosco-Imbert, J., Blanco, J.A. y Castillo, J.F. (2004). Gestión forestal y ciclos de nutrientes en el marco del cambio global. En: Valladares, F. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*, 479-506.

Boutton, T.W., Archer, S.R., Midwood, A.J. (1999). Stable isotopes in ecosystem science: structure, function and dynamics of subtropical savanna. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 13, 1263-1277.

Bradford, M.A., Berg, B., Maynard, D.S., Wieder, W.R. and Wood, S.A. (2016). Understanding the dominant controls on litter decomposition. *Journal of Ecology*, 104, 229-238.

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.

Bubb, K.A., Z.H. Xu, J.A. Simpson., and P.G. Safigna. (1998). Some nutrient dynamics associated with litterfall and litter decomposition in hoop pine plantations of southeast Queensland, Australia. *Forest Ecology and Management*, 110, 343-352.

Bunnell, F. and D.E.N. Tait. (1974). Mathematical simulation models of decomposition soil organisms and decomposition in tundra, p. 207-225. In A.J. Holding, S.F. Heal, Jr. Maclean & P.W. Flanagan (eds.). Soil organisms and decomposition in tundra. Tundra Biome Steering Committee, Estocolmo.

Cantú-Silva, I., Sánchez-Castillo, L.R.M., González-Rodríguez, H., Kubota, T., Gómez-Meza, M.V. y Domínguez-Gómez, T.G. (2013). Retorno potencial de nutrimentos por componentes secundarios de la hojarasca en comunidades vegetales de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), 138-155.

Cantú-Silva, I. y Yáñez-Díaz, M.I. (2018). Efecto del cambio de uso de suelo en el contenido del carbono orgánico y nitrógeno del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(45), 122-151.

Carnevele, N.J. and Lewis, J.P. (2009). Leaf litter quality and litter decomposition of woody species in a seasonal subtropical forest (Argentina). *Ecotropica*, 15, 23-33.

Castellanos-Barliza, J. y León-Peláez, J.D. (2011). Descomposición de hojarasca y liberación de nutrientes en plantaciones de *Acacia mangium* (Mimosaceae) establecidas en suelos degradados de Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 59(1), 113-128.

Celaya-Michel, H. y Castellanos-Villegas, A.E. (2011). Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*, 29(3), 343-356.

Celentano, D., Zahawi, R.A., Finegan, B., Casanoves, F., Ostertag, R., Cole, R.J. y Holl, K.D. (2011). Restauración ecológica de bosques tropicales en Costa Rica: efecto de varios modelos en la producción, acumulación y descomposición de hojarasca. *Revista de Biología Tropical*, 59(3), 1323-1336.

Cerón-Rincón, L.E. y Aristizábal-Gutiérrez, F.A. (2012). Dinámica del ciclo del Nitrógeno y Fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295.

Cogger, C. and Brown S. (2016). Soil formation and nutrient cycling. Sowing Seeds in the City. *Springer Netherlands*, 25-52. DOI 10.1007/978-94-017-7453-6_2.

Conti, M.E. (2002). Dinámica de la liberación y fijación de potasio en el suelo. Universidad de Buenos Aires, 14 pp.

Couteaux, M., Bottner, P., Berg, B. (1995). Litter decomposition, climate and litter quality. *Tendencias en Ecología y Evolución*, 10, 63-66.

Creamer, C.A., Filley, T.R., Boutton, T.W., Oleynik, S. and Kantola, I.B. (2011). Control on soil carbon accumulation during woody plant encroachment: Evidence from physical fractionation, soil respiration, and $\delta^{13}\text{C}$ of respired CO_2 . *Soil Biology & Biochemistry*, 43, 1678-1687.

Crespo, G. (2013). Funciones de los organismos del suelo en el ecosistema de pastizal. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 47(4), 329-334.

Crespo, G. (2015). Factores que influyen en el reciclaje de nutrientes en pastizales permanentes, avances en el desarrollo de su modelación. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 49(1), 1-10.

De Paz, M., Gobbi, M.E., Raffaele, E. and Buamscha, M.G. (2017). Litter decomposition of woody species in shrublands of NW Patagonia: how much do functional groups and microsite conditions influence decomposition? *Plant Ecology*, 218, 699-710.

Del Valle A., J.I. (2003). Descomposición de la hojarasca fina en bosques pantanosos del pacífico colombiano. *Interciencia*, 28(3), 148-153.

Díaz-Aguirre, S., Alessandrini Díaz, M. y Herrera García, A. (2007). Comportamiento del follaje de *Pinus caribaea* var. *Caribaea* y *Pinus tropicalis* en el desarrollo de una metodología para la obtención de cera conífera, pasta clorofila-caroteno y residuo forrajero a escala de banco. *Revista Cubana de Química*, 19(1), 81-83.

Douce G.K., and Da, Crossley (1982). The effect of soil fauna on litter mass loss and nutrient dynamics in arctic tundra at Barrow, Alaska. *Ecology*, 63, 523-537.

Escudero, A. y Mediavilla, S. (2003). Dinámica interna de los nutrientes. *Ecosistemas*, 12(1), 1-8.

Fernández, R.D. y Aragón, R. (2014). Descomposición de hojarasca de las especies leñosas nativas y exóticas más abundantes del pedemonte de las Yungas, Tucumán, Argentina. *Ecología Austral*, 24, 286-293.

Fernigrini, P., Cámara, O.R. y Oliva, F.Y. (2008). Síntesis y caracterización de distintas apatitas. Su utilización como biomaterial. *2^{do} Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales*, 5 pp

Ferrera-Cerato, R. y Alarcón, A. (2001). La microbiología del suelo en la agricultura sostenible. *Ciencia Ergo Sum*, 8(2), 175-183.

Fuentes-Molina, N. y Rodríguez-Barrios, J.A. (2012). Eficiencia en el retorno potencial de nutrientes vía hojarasca de un bosque tropical de ribera. Sierra Nevada de Santa Marta-Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 17(1), 51-66.

Gallardo, A., Covelo, F., Morillas, L. y Delgado, M. (2009). Ciclos de nutrientes y procesos edáficos en los ecosistemas terrestres: especificidades del caso mediterráneo y sus implicaciones para las relaciones suelo-planta. *Ecosistemas*, 18(2), 4-19.

Gallardo, A. y J. Pino. (1988). Importancia del medio físico en la descomposición de la hoja de especies arbóreas. *Lagascalía*, 15, 541-547.

Gama-Rodrigues, A.C. (2011). Soil organic matter, nutrient cycling and biological dinitrogen-fixation in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 81, 191-193.

Gamarra-Lezcano, C.C., Díaz-Lezcano, M.I., Vera-de Ortíz, M., Galeano, M.P. y Cabrera-Cardús, A.J.N. (2017). Relación carbon-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46), 4-26.

García Y., Ramírez, W. y Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-138.

García-Leaños, M.L. (2008). Materia orgánica: La sangre de la Tierra. *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)*, 1-6.

Gaspar-Santos, E.S., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., Álvarez-Solís, J.D. (2015). Acumulación y descomposición de hojarasca en bosques

secundarios del sur de la Sierra Madre de Chiapas, México. *Bosque*, 36(3), 467-480.

Giri, B., Giang, P.H., Kumari, R., Prasad, R. and Varma, A. (2005). Microbial Diversity in Soils. In: Buscot, F. and Varma, A. (eds.) *Soil Biology. Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions*, 3, 19-55.

González-Rodríguez H., Ramírez-Lozano, R.G., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M.V., Estrada-Castillón, E. y Arévalo, J.R. (2018). Deposition of litter and nutrients in leaves and twigs in different plant communities of northeastern Mexico. *Journal of Forest Research*, 29(5), 1307-1314. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0553-x>.

González-Rodríguez H., Domínguez-Gómez, T.G., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M.V., Ramírez-Lozano, R.G., Pando-Moreno, M. and Fernández, C.J. (2011). Litterfall deposition and leaf litter nutrient return in different locations at Northeastern Mexico. *Plant Ecology*, 212, 1747-1757.

Gutiérrez-Vázquez, M.H., Méndez-González, J., Flores-López, C., Ramírez-Díaz, J.A y Gutiérrez-Vázquez, B.N. (2012). Caída de hojarasca en plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. Y *Pinus cembroides* Zucc., en Coahuila, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(2), 123-133.

Hopkins, D. and Dungait, J.A.J. (2010). In: Dixon, G.R. and Tilston, E.L. (eds.) *Soil Microbiology and Sustainable Crop Production*, Springer Science + Business Media B.V, 59-80.

Ibarra, M., J. Caldentey y A. Promis. (2011). Descomposición de hojarasca en rodales de *Nothofagus pumilio* de la región de Magallanes. *Bosque*, 32(3), 227-233.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Iturbide, Nuevo León. Clave geoestadística 19030. Aguascalientes, Ags., México. 9 p.

Keyser, P., Kirk, T.K., and Zeikus, J.G. (1978). Lignolytic enzyme of *Phanaerochaete chrysosporium* synthesized in the absence of lignin in response to nitrogen starvation. *Journal of Bacteriology*, 135, 780-797.

Kumar, S. and Tewari, L.M. (2014). Pattern of litter fall and litter decomposition in a *Quercus leucotrichophora* A. Camus forest in Kumaun Himalaya. *International Journal of Biodiversity and Conservation*, 6(1), 108-114.

Kyrkby, E. and Römheld, V. (2007). Micronutrients in plants physiology: functions, uptake and mobility. Proceedings 543. The International Fertilizer Society, P.O. Box, York, YO32 5YS. United Kingdom, 52 pp.

Li, X., Hu, Y., Han, S., Liu, y. and Zhang, Y. (2010). Litterfall and litter chemistry change over time in an old-growth temperate forest, northeastern China. *Annals of Forest Science*, 67, 206-213.

Liu, X., Lindemann, W., Whitford, W. and Steiner, R. (2000). Microbial diversity and activity of disturbed soil in the northern Chihuahuan Desert. *Biology and Fertility of Soils*, 32, 243-249.

León, J.D., M.C. Díez, J. Castellanos, L.F. Osorio. y N. Marín. (2008). Grupos funcionales de microorganismos en suelos degradados por minería de aluvi6n plantados con *Acacia mangium*. *Suelos Ecuatoriales*, 38(1), 75-80.

L6pez-Hern6ndez, J.M., H. Gonz6lez-Rodr6guez, R.G. Ram6rez-Lozano, I. Cant6-Silva, M.V. G6mez-Meza, M Pando-Moreno. y A.E. Estrada-Castill6n. (2013). Producci6n de hojarasca y retorno potencial de nutrientes en tres sitios del estado de Nuevo Le6n, M6xico. *Polibot6nica*, 35, 41-64.

L6pez-Hern6ndez, J.M., Gonz6lez-Rodr6guez, H., Ram6rez-Lozano, R.G., del Valle-Arango, J.I., Cant6-Silva, I., Pando-Moreno, M. Estrada-Castill6n, A.E. y G6mez-Meza, M.V. (2015). Producci6n de hojarasca y dep6sito potencial de nutrientes de las hojas en el Matorral Espinoso Tamaulipeco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(30), 74-89.

López-Hernández, J.M., J.J. Corral-Rivas, H. González-Rodríguez, T.G. Domínguez-Gómez, M.V. Gómez-Meza. y I. Cantú-Silva. (2018). Depósito y descomposición de hojarasca de *Pinus cooperi* C.E. Blanco en El Salto, Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50), 201-222.

Mao, Y., Yannarell, A. and Mackie, R. (2011). Changes in N-transforming archaea and bacteria in soil during the establishment of bioenergy crops. *PLoS ONE*, 6(9), 1-12.

Marmolejo-Monsiváis, J.G., C.M. Cantú-Ayala, y M.A. Gutiérrez-Suárez. (2013). Degradación de la hojarasca en sitios con vegetación primaria y secundaria del matorral espinoso tamaulipeco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), 174-181.

Martínez, H.E., Fuentes, E.J.P. y Acevedo, H.E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8(1), 68-96.

Martínez-Yrizar, A., S. Núñez. and A. Búrquez. (2007). Leaf litter decomposition in a southern Sonoran Desert ecosystem, northwestern Mexico: Effects of habitat and litter quality. *Acta Oecologica*, 32, 291-300.

Mc Tiernan, K.B., Couteaux, M.M., Berg, B., Berg, M.P., de Anta, R.C., Gallardo A., Kratz, W., Piussi, P., Remacle, J., de Santo, A.V. (2003). Changes in chemical composition of *Pinus sylvestris* needle litter during decomposition along a European coniferous forest climatic transect. *Soil Biology and Biochemistry*, 35, 801-812.

Meentemeyer, V. (1978). Macroclimate and lignin control of litter decomposition rates. *Ecology*, 59, 465-475.

Mishra, G. and Kumar, R. (2016). Plant litter decomposition: drivers insight to the ecological process. *European Journal of Biological Research*, 6(3), 176-185.

Mogtanini, F. y C.F. Jordan. (2002). Reciclaje de nutrientes. In: Guariguata, MR, Kattan, G (Eds.) *Ecología y Conservación de Bosques Neotropicales*. Pp. 167-191.

Monsalve, C.O.I., Gutiérrez, D.J.S., Cardona, W.A. (2017). Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo. *Una revisión. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 200-209.

Moreno-Valdez, M.E., T.G. Domínguez-Gómez, M.S. Alvarado, J.G. Colín, S. Corral-Rivas. y H. González-Rodríguez. (2018). Aporte y descomposición de hojarasca en bosques templados de la región de El Salto, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 70-93.

Olson, J.S. (1963). Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 44, 322-331.

O'Neill, E.G., Johnson, D.W., Ledford, J., Todd, D.E. (2003). Acute seasonal drought does not permanently alter mass loss and nitrogen dynamics during decomposition of red maple litter. *Global Change Biology*, 9, 117-123.

Osorio, N.W. (2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. *Manejo Integral del Suelo y Nutrición Vegetal*, 1(4), 1-4.

Ott, L. (1993). *An introduction to statistical methods and data analysis*. Duxbury Press. Boston, MA, USA. 775 p.

Ovington, J.D. (1962). Quantitative ecology and the woodland ecosystem concept. *Advances in Ecological Research*, 1, 103-192.

Palma, R.M., J. Prause, A.V. Fontanive. y M.P. Jimenez. (1998). Litter fall and litter decomposition in a forest of the Parque Chaqueño Argentino. *Forest Ecology and Management*, 106, 205-210.

- Pérez-Suárez, M., Arredondo-Moreno, J.T. and Huber-Sannwald, E. (2012). Early stage of single and mixed leaf-litter decomposition in semiarid forest pine-oak: the role of rainfall and microsite. *Biogeochemistry*, 108, 245-258.
- Rawat, N., Nautiyal, B.P. and Nautiyal, M.C. (2009). Litter production pattern and nutrients discharge from decomposing litter in a Himalayan alpine ecosystem. *New York Science Journal*, 2(6), 54-67.
- Rocha-Loredo, A.G., Ramírez, M.N. (2009). Producción y descomposición de hojarasca en diferentes condiciones sucesionales del bosque de pino-encino en Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 84, 1-12.
- Rodríguez, S.M. y Flórez, R.V.J. (2004). Elementos esenciales y beneficiosos. *Tecnologías y programación en agroplasticultura*, 25-36.
- Salete-Capelleso, E., Luana-Scrovonski, K., Zanin, E.M., Ubiritan-Hepp, L., Bayer, C. and Sausen, T.L. (2016). Effects of forest structure on litter production, soil chemical composition and litter-soil interactions. *Acta Botanica Brasilica*, 1-7.
- Salisbury, F.B. and Ross C.W. (1985). *Plant Physiology*. Belmont (CA): Wadsworth Publishing Company, 96-113.
- Sánchez, S., Crespo, G., Hernández, M. y García Y. (2008). Factores bióticos y abióticos que influyen en la descomposición de la hojarasca en pastizales. *Pastos y Forrajes*, 31(2), 99-118.
- Santa Regina, I., Tarazona, T. (2001). Nutrient cycling in a natural beech forest and adjacent planted pine in northern Spain. *Forestry*, 74, 11-28.
- Shi. W. (2011). Agricultural and Ecological significance of soil enzymes: soil carbon sequestration and nutrient cycling. In: Shukla, G. and Varma, A. (eds.) *Soil Enzymology, Soil Biology 22*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 43-60.
- Sierra-Rozo, O., J.E. Mancera-Pineda. y A. Santos-Martínez. (2009). Velocidad de descomposición de la hojarasca en diferentes sustratos de manglar durante

la época de lluvias en San Andrés Isla, Caribe Colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 38(1), 59-84.

Smith, J.L., Norton, J.M., Paul, E.A. (1989). Decomposition of ¹⁴C- and ¹⁵N-labeled organisms in soil under anaerobic conditions. *Plant and Soil*, 116, 115-118.

Statistical Package for the Social Sciences (SPSS). (2016). SPSS Statistics. Standard released (Version 22). For Windows. SPSS Inc. Chicago, IL USA.

Steel, R. G. D. and J. H. Torrie. (1980). Principles and procedures of statistics. A biometrical approach. McGraw-Hill Book Company. New York, NY, USA. 633 p.

Swift, M.J. and Anderson, J.M. (1989). Decomposition. En: Lieth, H., Werger, M.J.A. (Eds.): *Tropical Rain forest Ecosystems. Biogeographical and Ecological Studies* Elsevier. New York, U.S.A, 547-567.

Taiz, L. and Zeiger, E. (2002). *Plant physiology*. The Benjamin/Cummings Publishing Company. California, 67-86.

Triadiati, Tjitrosemito, S., Guhardja, E., Sudarsono, Qayim, I. and Leuschner, C. (2011). Litterfall production and leaf-litter decomposition at natural forest and cacao agroforestry in Central Sulawesi, Indonesia. *Asian Journal of Biological Sciences*, 4(3), 221-234.

Uratani, A., Daimon, H., Ohe, M., Harada, J., Nakayama, Y. and Ohdan, H. (2004). Ecophysiological traits of field-grown *Crotalaria incana* and *C. pallida* as green manure. *Plant Production Science*, 7, 449-455.

Van Soest, P.J., Robertson J.B. y Lewis B.A. (1991). Methods for dietary, neutral detergent fiber, and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. Symposium: carbohydrate methodology, metabolism, and nutritional implications in dairy cattle. *Journal Dairy Sciences*, 74, 3583-3597.

Wang, Q., S. Wang. and Y. Huang. (2008). Comparisons of litter fall, litter decomposition and nutrient return in a monoculture *Cunninghamia lanceolata* and

a mixed stand in southern China. *Forest Ecology and Management*, 255, 1210-1218.

Yáñez-Díaz, M.I., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H., Marmolejo-Monsiváis, J.G., Jurado, E. y Gómez-Meza, M.V. (2017). Respiración del suelo en cuatro sistemas de uso de la tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(42), 123-149.

Yerena-Yamallel, J.I., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O.A., Treviño-Garza, E.J. (2012). Contenido de carbono total en los componentes de especies arbóreas y arbustivas en áreas con diferente uso, en el matorral espinoso tamaulipeco, en México. *Bosque*, 33(2), 145-152.

Zhang, D., Hui, D., Lou, Y. and Zhou, G. (2008). Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. *Journal of Plant Ecology*, 1(2), 85-93.

ANEXOS

Tabla A 1. Resultados de las pruebas de normalidad para el total de observaciones en las variables analizadas. Valores p en negritas ($p < 0.05$), indican que no existe homogeneidad de varianzas ni distribución normal.

Variables analizadas	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	g l	Valor p	Estadístico	g l	Valor p .
Peso Inicial	0.171	340	<0.001	0.738	340	<0.001
Masa Remanente	0.145	340	<0.001	0.915	340	<0.001
Degradación (g)	0.148	340	<0.001	0.902	340	<0.001
Degradación (%)	0.147	340	<0.001	0.902	340	<0.001
X_t/X_0	0.146	340	<0.001	0.902	340	<0.001

a. Corrección de significación de Lilliefors; $n=360$ (total) y casos perdidos $n=20$.

Tabla A 2. Resultados de las pruebas de normalidad, por sitio de estudio y variable analizada. Valores p en negritas ($p < 0.05$), indican que no existe homogeneidad de varianzas ni distribución normal.

Variables analizadas	Sitio	Pruebas de normalidad					
		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	g l	Valor p	Estadístico	g l	Valor p
Peso Inicial	BE	0.151	111	<0.001	0.880	111	<0.001
	BPE	0.114	117	0.001	0.909	117	<0.001
	BP	0.162	112	<0.001	0.759	112	<0.001
Masa Remanente	BE	0.175	111	<0.001	0.886	111	<0.001
	BPE	0.160	117	<0.001	0.902	117	<0.001
	BP	0.104	112	0.005	0.943	112	<0.001
Degradación (g)	BE	0.180	111	<0.001	0.879	111	<0.001
	BPE	0.174	117	<0.001	0.892	117	<0.001
	BP	0.148	112	<0.001	0.923	112	<0.001
Degradación (%)	BE	0.178	111	<0.001	0.879	111	<0.001
	BPE	0.175	117	<0.001	0.892	117	<0.001
	BP	0.149	112	<0.001	0.924	112	<0.001
X_t/X_0	BE	0.177	111	<0.001	0.879	111	<0.001
	BPE	0.176	117	<0.001	0.892	117	<0.001
	BP	0.148	112	<0.001	0.923	112	<0.001

a. Corrección de significación de Lilliefors; $n=120$ (total).

Tabla A 3. Resultados de las pruebas de normalidad para todas las observaciones del contenido de C y N, y Relación CN. Valores p en negritas ($p < 0.05$), indican que no existe homogeneidad de varianzas ni distribución normal.

Variables analizadas	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	g l	Valor p	Estadístico	g l	Valor p
%C	0.117	346	<0.001	0.965	346	<0.001
%N	0.104	346	<0.001	0.882	346	<0.001
Relación CN	0.120	346	<0.001	0.866	346	<0.001

a. Corrección de significación de Lilliefors; $n=360$ (total) y casos perdidos $n=14$.

Tabla A 4. Resultados de las pruebas de normalidad, por sitio de estudio y contenido de C y N, y Relación CN. Valores p en negritas ($p < 0.05$), indican que no existe homogeneidad de varianzas ni distribución normal.

Variables analizadas	Sitio	Pruebas de normalidad					
		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	g l	Valor p	Estadístico	g l	Valor p
% C	BE	0.114	115	0.001	0.952	115	<0.001
	BPE	0.137	118	<0.001	0.969	118	0.007
	BP	0.166	113	<0.001	0.901	113	<0.001
% N	BE	0.146	115	<0.001	0.850	115	<0.001
	BPE	0.076	118	0.089	0.969	118	0.008
	BP	0.164	113	<0.001	0.803	113	<0.001
Relación CN	BE	0.121	115	<0.001	0.913	115	<0.001
	BPE	0.153	118	<0.001	0.826	118	<0.001
	BP	0.120	113	<0.001	0.895	113	<0.001

a. Corrección de significación de Lilliefors; $n=120$ (total).

Tabla A 5. Resultados de las pruebas de normalidad para todas las observaciones del contenido de lignina, N, P, Relación LN y Relación NP. Valores p en negritas ($p < 0.05$), indican que no existe homogeneidad de varianzas ni distribución normal.

Variables analizadas	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	g l	Valor p	Estadístico	g l	Valor p .
%Lignina	0.113	137	<0.001	.954	137	<0.001
%N	0.110	137	<0.001	.939	137	<0.001
%P	0.083	137	0.022	.969	137	0.003
Relación LN	0.171	137	<0.001	.854	137	<0.001
Relación NP	0.172	137	<0.001	.767	137	<0.001

a. Corrección de significación de Lilliefors; n=150 (total) y casos perdidos n=13.

Tabla A 6. Resultados de las pruebas de normalidad, por sitio de estudio y contenido de lignina, N, P, Relación LN y Relación NP. Valores p en negritas ($p < 0.05$), indican que no existe homogeneidad de varianzas ni distribución normal.

Variables analizadas	Sitio	Pruebas de normalidad					
		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	g l	Valor p	Estadístico	g l	Valor p
%Lignina	BE	0.090	45	0.200*	.945	45	0.032
	BPE	0.163	50	0.002	.925	50	0.004
	BP	0.095	42	0.200*	.971	42	0.365
%N	BE	0.129	45	0.059	.937	45	0.017
	BPE	0.116	50	0.087	.947	50	0.026
	BP	0.165	42	0.006	.861	42	<0.001
%P	BE	0.105	45	0.200*	.972	45	0.350
	BPE	0.117	50	0.085	.947	50	0.026
	BP	0.144	42	0.029	.898	42	0.001
Relación LN	BE	0.134	45	0.040	.896	45	0.001
	BPE	0.209	50	<0.001	.847	50	<0.001
	BP	0.122	42	0.123	.872	42	<0.001
Relación NP	BE	0.130	45	0.055	.936	45	0.016
	BPE	0.086	50	0.200*	.967	50	0.182
	BP	0.214	42	<0.001	.849	42	<0.001

*. Límite inferior de la significancia verdadera. a. Corrección de significación de Lilliefors; n=50 (total).