

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



**CONTENIDO DE NUTRIMENTOS MINERALES EN LA HOJARASCA DE
BOSQUES DE PINO, ENCINO Y PINO-ENCINO DURANTE EL PROCESO DE
DESCOMPOSICIÓN**

TESIS DE MAESTRÍA

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

Claudia Irasema Colín Vargas

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

CONTENIDO DE NUTRIMENTOS MINERALES EN LA HOJARASCA DE
BOSQUE DE PINO, ENCINO Y PINO-ENCINO DURANTE EL PROCESO DE
DESCOMPOSICIÓN

TESIS MAESTRÍA


Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES


Presenta:


Claudia Irasema Colín Vargas

COMITÉ DE TESIS


Dr. Humberto González Rodríguez
Director


Dr. Israel Cantú Silva
Co-Director


Dr. Marisela Pando Moreno
Asesor


Dr. Marco Vinicio Gómez Meza
Asesor

Dedicatoria

A DIOS Y A LA VIRGEN DE GUADALUPE, que me han permitido cumplir con esta meta y han estado conmigo en cada momento de mi vida.

A MIS PADRES: Alfredo Colín Esquivel y Ramona Vargas Alemán, que me han apoyado en cada decisión que he tomado, me han inspirado a salir adelante y cumplir con todas mis metas, mil gracias por su cariño y confianza. Los quiero.

A MIS HERMANOS: Yair David, Ángel Rafael, Erik Saúl y Alfredo Guadalupe Colín Vargas, que son mi motor y mi fuerza para cumplir con esta etapa de mi vida.

A MI PRIMA: Nubia Mariela Quiñones Vargas, que me enseñó muchas cosas, siempre estarás en mi mente y en mi corazón.

A MIS ABUELITAS: Irene Colín y Ramona Alemán, que son mis segundas madres gracias por su apoyo y cariño las quiero.

A MI TÍO: Felipe Esquivel Colín, por su confianza y apoyo durante el transcurso de mis estudios.

A MI TÍO: José Guadalupe Colín, por ser mi guía y una de las personas que más admiro.

En nombre de mis tíos Sergio y Anselmo Esquivel Colín dedico esta tesis a todos aquellos que confiaron en mí y me dieron ánimos durante mis estudios.

A MI TÍA: Lorena Vargas Alemán, que es un ejemplo de una mujer fuerte, por su cariño, estar conmigo y contagiarme de tantas cosas buenas.

A José Ángel Luna Campagne, por brindarme su cariño, apoyo incondicional, por motivarme. Te quiero.

Agradecimientos

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACyT) por el apoyo otorgado para la realización de mis estudios de Maestría así como también por financiar esta tesis a través del Fondo de Investigación Científica Básica 2015, Proyecto 250732.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ciencias Forestales, por abrirme las puertas para poder realizar mis estudios de Maestría.

Dr. Humberto González Rodríguez, por ser el director de esta tesis, por transmitirme sus conocimientos y por su paciencia durante esta investigación y por el tiempo en la revisión de dicha investigación.

Dr. Israel Cantú Silva por ser parte del comité de tesis, por las facilidades prestadas para poder realizar los análisis de suelo en el laboratorio, por sus comentarios y sugerencias en los seminarios expuestos para mejorar esta investigación y por el tiempo en la revisión de dicha investigación.

Dra. Marisela Pando Moreno, por formar parte del comité de tesis, por sus comentarios, y sugerencias en cada uno de los seminarios expuesto y en el escrito, para la mejora de esta investigación y por el tiempo dedicado a la revisión de la misma.

Dr. Marco Vinicio Gómez Meza, Profesor investigador de la Facultad de Economía (UANL), por ser parte del comité de tesis y por su tiempo dedicado a la revisión de este trabajo de investigación.

Mc. Perla Cecilia Rodríguez Balboa, por su ayuda, durante la realización de esta tesis.

Sra. Elsa Dolores González Serna por su ayuda en todos los análisis de laboratorio, por su paciencia y asesoría para realizar esta tesis.

Dra. María Inés Yáñez Díaz por su ayuda en laboratorio de suelos, por su asesoría al momento de realizar los análisis.

Dr. Jorge Ignacio Del Socorro Del Valle Arango y Dr. Jeiner Castellanos Barliza de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín por compartirme sus conocimientos para mejorar la presente tesis.

A mis amigos Beatriz, Pablo, Ricardo, Perla y Jonathan que hicieron esta estancia más agradable.

Y a todas esas personas con las que conviví en la Facultad, que involuntariamente omito.

ÍNDICE

| | |
|--|------------|
| ÍNDICE DE FIGURAS | iii |
| ÍNDICE DE TABLAS | iv |
| RESUMEN | v |
| SUMMARY | vi |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 3 |
| 2.1. Objetivo general..... | 3 |
| 2.1.1. Objetivos específicos | 3 |
| 2.1.2. Hipótesis | 3 |
| 3. REVISIÓN DE LITERATURA | 4 |
| 3.1. La hojarasca | 4 |
| 3.2. Degradación de la hojarasca | 5 |
| 3.3. Ciclo de nutrientes | 6 |
| 3.4. Nutrientes esenciales y su funcionamiento en las plantas..... | 8 |
| 3.4.1. Macronutrientes..... | 9 |
| 3.4.1.1. Calcio (Ca)..... | 9 |
| 3.4.1.2. Magnesio (Mg)..... | 9 |
| 3.4.1.3. Potasio (K)..... | 10 |
| 3.4.2. Micronutrientes..... | 10 |
| 3.4.2.1. Cobre (Cu)..... | 10 |
| 3.4.2.2. Hierro (Fe)..... | 10 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4.2.3. Manganese (Mn)..... | 11 |
| 3.4.2.4. Zinc (Zn) | 11 |
| 3.5. Estudios afines sobre la liberación de nutrientes | 11 |
| 4. MATERIALES Y MÉTODOS | 17 |
| 4.1. Localización y descripción del área de estudio..... | 17 |
| 4.2. Colocación y frecuencia de recolecta de las muestras | 18 |
| 4.3. Determinación de los de nutrientes en la hojarasca | 18 |
| 4.4. Determinación de propiedades físicas y químicas del suelo..... | 19 |
| 4.1. Variables ambientales..... | 21 |
| 4.2. Análisis estadístico | 24 |
| 5. RESULTADOS | 25 |
| 5.1. Fluctuación de los Macronutrientes | 29 |
| 5.1.1. Calcio (Ca) | 29 |
| 5.1.2. Magnesio (Mg) | 30 |
| 5.1.3. Potasio (K) | 31 |
| 5.2. Fluctuación de Micronutrientes | 32 |
| 5.2.1. Cobre (Cu) | 32 |
| 5.2.2. Manganese (Mn) | 33 |
| 5.2.3. Hierro (Fe) | 34 |
| 5.2.4. Zinc (Zn)..... | 35 |
| 6. DISCUSIÓN..... | 36 |
| 7. CONCLUSIONES..... | 39 |
| 8. LITERATURA CITADA | 40 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. El ciclo de nutrientes en el bosque (Bosco, et al., 2004)..... | 7 |
| Figura 2. Localización del área de estudio..... | 17 |
| Figura 3. Temperatura ambiente (a), humedad relativa (b) y temperatura del suelo (c) registrada en el sitio de estudio..... | 23 |
| Figura 4. Precipitación (mm) registrada en el sitio de estudio..... | 23 |
| Figura 5. Contenido de Ca en la hojarasca a diferentes tiempos de incubación en tres tipos de bosques durante el proceso de descomposición. Los valores graficados corresponden a la media (n=10) ± error estándar. | 29 |
| Figura 6. Contenido de Mg en la hojarasca a diferentes tiempos de incubación en tres tipos de bosques durante el proceso de descomposición. Los valores graficados corresponden a la media (n=10) ± error estándar. | 30 |
| Figura 7. Contenido de K en la hojarasca a diferentes tiempos de incubación en tres tipos de bosques durante el proceso de descomposición. Los valores graficados corresponden a la media (n=10) ± error estándar. | 31 |
| Figura 8. Contenido de Cu en la hojarasca a diferentes tiempos de incubación en tres tipos de bosques durante el proceso de descomposición. Los valores graficados corresponden a la media (n=10) ± error estándar. | 32 |
| Figura 9. Contenido de Mn en la hojarasca a diferentes tiempos de incubación en tres tipos de bosques durante el proceso de descomposición. Los valores graficados corresponden a la media (n=10) ± error estándar. | 33 |
| Figura 10. Contenido de Fe en la hojarasca a diferentes tiempos de incubación en tres tipos de bosques durante el proceso de descomposición. Los valores graficados corresponden a la media (n=10) ± error estándar. | 34 |

Figura 11. Contenido de Zn en la hojarasca a diferentes tiempos de incubación en tres tipos de bosques durante el proceso de descomposición. Los valores graficados corresponden a la media (n=10) ± error estándar. 35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Métodos empleados para determinar las propiedades físico-químicas del suelo. 20

Tabla 2. Algunas propiedades físicas y químicas del suelo realizadas a una profundidad de 0-10 cm en los ecosistemas forestales estudiados. 21

Tabla 3. Prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas valores de p en negritas (**$p < 0.05$**) indican las diferencias entre los tipos de ecosistema forestal (Pino, Encino y Pino-encino) en el contenido de macronutrientes en la hojarasca sometida a diferentes tiempos de incubación..... 26

Tabla 4. Prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas valores de p en negritas (**$p < 0.05$**) indican las diferencias entre los tipos de ecosistema forestal (Pino, Encino y Pino-Encino) en el contenido de macronutrientes en la hojarasca sometida a diferentes tiempos de incubación..... 27

RESUMEN

El ciclo de los nutrientes es sin duda clave para garantizar el adecuado funcionamiento de los ecosistemas, este ciclo en gran parte está determinado por la descomposición de la hojarasca; proceso en el que se liberan los nutrientes, que pasaran a formar parte del suelo para poder ser absorbidos por las plantas, sin embargo, el comportamiento de los nutrientes es complejo durante este proceso por lo cual el objetivo de esta investigación fue determinar la liberación de nutrientes (Ca, Mg, K, Cu, Mn, Fe y Zn) durante el proceso de degradación de la hojarasca en un bosque de Pino, Encino y Pino-Encino. La dinámica del contenido de nutrientes se estimó a través del uso de bolsas de degradación de hojarasca en los tres sitios de monitoreo durante 510 días (15 de Diciembre de 2016 a 09 de Mayo de 2018). La transferencia de nutrientes al suelo en el bosque de Pino fue del 16.66 mg g⁻¹ para Ca; 1.64 mg g⁻¹ Mg; 0.704 mg g⁻¹ K; mientras que los micronutrientes Cu, Mn, Fe, Zn tienen una tendencia de acumulación. En el bosque de Encino la transferencia de nutrientes al suelo fue 14.75 mg g⁻¹ para Ca; 2.45 mg g⁻¹ Mg; 7.61 mg g⁻¹ K, 7.53 µg g⁻¹ Cu y 71.405 µg g⁻¹ de Mn; la transferencia en el bosque de Pino-Encino fue de 17.87 mg g⁻¹ para Ca; 3.05 mg g⁻¹ Mg; 6.7 mg g⁻¹ K; 10 µg g⁻¹ Cu y 351.51 µg g⁻¹ de Mn; En cuanto al Fe y Zn, se observaron incrementos en su contenido en los tres tipos de ecosistemas, siendo el bosque de Encino el que registró los valores más altos; 1023.39 µg g⁻¹ y 112.73 µg g⁻¹ respectivamente. La liberación de nutrientes, mostró diferencias estadísticas entre los tipos de bosques, obteniendo una dinámica más rápida la hojarasca de Pino-Encino, mientras que la hojarasca de Pino mostró inmovilización en la transferencia de los micronutrientes.

Palabras clave: Hojarasca, bolsas de degradación, transferencia de nutrientes.

SUMMARY

The nutrient cycle is undoubtedly key to ensure the proper functioning of ecosystems, this cycle is largely determined by the decomposition of litter; process in which nutrients will be released, which will become part of the soil to be absorbed by plants, however, the behavior of nutrients is complex during this process so the objective of this research was to determine the release of nutrients. nutrients (Ca, Mg, K, Cu, Mn, Fe and Zn) during the process of degradation of the litter in a forest of Pine, Oak and Pine-Oak. The dynamics of nutrient content were estimated through the use of litter degradation bags at the three monitoring sites during 510 days (December 15, 2016 to May 9, 2018). The transfer of nutrients to the soil in the pine forest was 16.66 mg g⁻¹ for Ca; 1.64 mg g⁻¹ Mg; 0.704 mg g⁻¹ K; While Cu, Mn, Fe, Zn micronutrients have an accumulation tendency. In the Oak forest, the transfer of nutrients to the soil was 14.75 mg g⁻¹ for Ca; 2.45 mg g⁻¹ Mg; 7.61 mg g⁻¹ K, 7.53 µg g⁻¹ Cu and 71,405 µg g⁻¹ of Mn; the transfer in the Pino-Oak forest was 17.87 mg g⁻¹ for Ca; 3.05 mg g⁻¹ Mg; 6.7 mg g⁻¹ K; 10 µg g⁻¹ Cu and 351.51 µg g⁻¹ of Mn; As for Fe and Zn, increases in their content were observed in the three types of ecosystems, with the Oak forest recording the highest values; 1023.39 µg g⁻¹ and 112.73 µg g⁻¹ respectively. The release of nutrients, showed statistical differences between forest types, obtaining a faster dynamics Oak litter, while the litter of Pine showed immobilization in the transfer of micronutrients.

Keywords: *Leaf litter, degradation bags, nutrient transfer*

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques aportan múltiples servicios ecosistémicos como la fertilidad del suelo (Lara *et al.*, 2009). Este proceso está estrechamente ligado con el desarrollo de la cubierta orgánica que resulta de la caída de hojas, ramas, corteza, frutos, entre otros componentes, a cuyo acumulación de restos orgánicos se conoce como hojarasca, y una de sus funciones es retener grandes cantidades de nutrientes (Prause *et al.*, 1997), los cuales pasaran a formar parte del suelo una vez que la hojarasca se descomponga, de tal manera que los nutrientes se encontraran disponibles para las plantas y esta los absorberá por medio de la raíz, a este proceso se le llama ciclo de los nutrientes, constituido por la descomposición y mineralización (Arce, 2007).

La descomposición y liberación de los nutrientes son procesos que garantizan el funcionamiento adecuado de los ciclos biogeoquímicos y favorecen las condiciones químicas, físicas y biológicas de los suelos (León *et al.*, 2008). Cuando existe una lenta degradación de la hojarasca, los nutrientes disponibles para las plantas serán insuficientes, por tal motivo, el crecimiento y el desarrollo de las plantas se verá afectados (Jordan, 1985; Swift y Anderson, 1989; Bubb *et al.*, 1998; Montagnini y Jordan, 2002; Castellanos y León, 2011). Caso contrario, si la descomposición es muy rápida, los nutrimentos se liberaran rápidamente y estos pueden perderse por lixiviación edáfica o por volatilización (Palma *et al.*, 1998; Schlesinger, 2000; Castellanos y León, 2011).

El ciclo de los nutrientes es, sin duda, clave en el buen funcionamiento de los ecosistemas forestales y está presente en el desarrollo de los sistemas ecológicos, tanto en escenarios naturales o bien sometidos a perturbaciones artificiales (Santa Regina y Gallardo, 1989). La sustentabilidad de los sistemas ecológicos radica en la productividad (Cuevas y Medina, 1998), misma que se

encuentra constituida por tres factores cruciales: la disponibilidad de nutrientes, la tasa de absorción y la retraslocación (Nambiar y Fife, 1991; Dalla y Jokela, 1994; Aerts, 1996; Killingbeck, 1996; Cuevas y Medina, 1998; Jokela y Martin, 2000).

Conocer el aporte de los nutrientes de la hojarasca, es práctico para dirigir al bosque y/o las plantaciones hacia un manejo más nutritivo (Moroni y Smethurst, 2003). Sin embargo, el contenido de nutrientes en la hojarasca es muy variable debido a la variación natural, a las concentraciones en el tejido de las plantas, a los cambios de los organismos y a su tasa de descomposición (Aerts y Chapin, 2000).

En el estado de Nuevo León, se han realizado algunos estudios sobre la deposición y descomposición de la hojarasca del matorral espinoso tamaulipeco y su contenido de nutrientes, sin embargo, existen pocos estudios sobre la liberación de los nutrimentos durante el proceso de descomposición de la hojarasca en bosques templados del estado. Por lo cual, este trabajo de investigación podrá servir como base para futuras investigaciones, aplicadas a la producción forestal, restauración y conservación de los bosques.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Cuantificar la liberación de los nutrimentos durante el proceso de degradación de la hojarasca en Bosques de Pino, Encino y Pino-Encino.

2.1.1. Objetivos específicos

- Determinar el contenido de los macronutrimentos (Ca, K, y Mg) en la hojarasca de Bosque de Pino, Encino y Pino-Encino.
- Determinar el contenido de los micronutrimentos (Cu, Fe, Mn y Zn) en la hojarasca en Bosque de Pino, Encino y Pino-Encino.

2.1.2. Hipótesis

No existen diferencias en la liberación de los nutrimentos durante el proceso de la degradación de la hojarasca, en los distintos tiempos de incubación como en los distintos bosques a estudiar.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. La hojarasca

La hojarasca es una capa orgánica constituida por un manto de hojas, ramas, frutos, corteza, etc., que se depositan en la parte superficial del suelo forestal, dando como resultado un suelo con peculiar microclima (Pritchett, 1991). Cabe mencionar que esta cubierta orgánica es la principal fuente de nutrientes en los ecosistemas forestales (Vitousek y Sanford, 1986; Landsberg y Gower, 1997), representando así el 80% de estos (Santa Regina y Tarazona, 2001).

Los nutrientes más comunes en la hojarasca son N, P, K y Ca, encontrándose el N en mayores cantidades (Finér, 1996; Kavvadias *et al.*, 2001; González *et al.*, 2008). Estos elementos se liberan gradualmente, garantizando así una contribución permanente de nutrientes al suelo (Palma *et al.*, 1998). Además de ser una fuente importante de nutrientes para los suelos forestales, esta capa orgánica, regula la mayor parte de los procesos que ocurren en los ecosistemas forestales, debido a que actúa como una capa protectora del suelo protegiéndolo así de cambios extremos de humedad y temperatura; al mismo tiempo, resguarda al suelo de la erosión y de las heladas, también mejora la infiltración del agua (Gallardo *et al.*, 1998). Por otro lado, la hojarasca constituye una base fundamental para entender la capacidad de almacenamiento de la biomasa en los ecosistemas forestales, lo cual es importante por su relación con el aumento de CO₂ atmosférico, debido al papel que tienen los bosques como sumideros y reservorios de carbono (Quinto *et al.*, 2007).

Huber y Oyarzún (1983), mencionan que la caída de acículas y partes vegetales mayores, están directamente causadas por la velocidad del viento. Por otra lado, diversos autores mencionan que la caída de hojarasca está regulada por las

variables climáticas tales como la temperatura y precipitación (Prause *et al.*, 2003a; Zaldívar *et al.*, 2004; Pavón *et al.*, 2005).

3.2. Degradación de la hojarasca

La descomposición o degradación de la hojarasca es un proceso indispensable para mantener la vida en los ecosistemas ya que permite el reciclaje de los elementos químicos en el mismo (Sánchez *et al.*, 2008). El proceso de descomposición se inicia cuando la hojarasca cae al suelo (Coûteaux *et al.*, 1995). Posteriormente, ocurren tanto procesos físicos como químicos, mediante los cuales la hojarasca se va reduciendo en sus constituyentes químicos elementales (Aerts, 1997). Es por ello, que la descomposición se cuantifica mediante el peso perdido de la misma a través del tiempo (Villavicencio, 2012), lo que depende de la interacción de factores como los tratamientos silvícolas aplicados en el bosque (Caldentey *et al.*, 2001), condiciones climáticas y micro climáticas, las propiedades físicas-químicas de la hojarasca, así como también los microorganismos que se encuentran en el suelo (Kochy y Wilson, 1997; Berg, 2000), y la calidad de la hojarasca, la cual está definida por los constituyentes orgánicos y el contenido de nutrientes (Gelvez-Pardo, 2008); por ejemplo, la relación C/N es uno de los parámetros más conocidos para determinar la calidad de la hojarasca (Meentemeyer, 1984; Sariyildiz *et al.*, 2005; Zhou *et al.*, 2008). La relación C/N está determinada por la composición de las especies forestales (Xuluc-Tolosa *et al.*, 2003). Las especies caducifolias aportan mayor biomasa y su descomposición suele ser más rápida (Dziadowiec, 1987).

La descomposición de la hojarasca se puede distinguir por tres fases: la primera de fácil descomposición, soluble y labiales (azúcares y proteínas); la segunda insolubles, pero igual fácilmente de degradar compuesta de hemicelulosa y celulosa; y la última fase, permanece por más tiempo y está formada por ceras, lípidos, ligninas y carbohidratos lignificados (Heal *et al.*, 1997). Por su parte, Aerts (1997) y Swift & Anderson (1989), dividen el proceso de descomposición en dos

etapas básicas: en la primera, involucran la desintegración física y química que sufre la materia orgánica a causa de herbívoros, pequeños, insectos, entre otros. Posteriormente, entran los microorganismos como bacterias y hongos que reducen más la materia, la cual se mineraliza en moléculas básicas como fosfato, y agua, que permanecerán disponibles para las plantas y una segunda etapa, donde la materia orgánica se divide en partes aún más pequeñas, a través de los procesos químicos; a esta etapa se le conoce como catabolismo.

3.3. Ciclo de nutrientes

La raíces profundas de los árboles y arbustos, contribuyen en el ciclo de los nutrientes, debido a que absorben los nutrientes de las partes más profunda del suelo y los depositan en la superficie al momento que las hojas caen al suelo (Altieri, 1997). El reciclaje y la pérdida de nutrientes del suelo en los bosques, han manifestado ser criterios que garantizan, el apropiado funcionamiento de las plantaciones forestales, debido a que la pérdida de nutrientes y la discontinuidad de los procesos de reciclaje y captura, pueden estar asociados con una baja productividad forestal (Londoño *et al.*, 2007). Por lo tanto, en los ecosistemas forestales es fundamental estudiar el ciclo de los nutrientes para comprender la dinámica de los elementos y su disponibilidad en los ecosistemas (Cardona y Sadeghian, 2005).

El ciclo externo o ciclo geoquímico y el ciclo interno también conocido como ciclo biogeoquímico conforman el ciclo de los nutrientes (Bosco *et al.*, 2004).

La entrada y salida de los nutrientes en el ecosistemas forman parte del ciclo externo, la entrada resultan de la precipitaciones sólida (partículas y aerosoles), líquida (lluvia y nieve), la fijación del N₂ atmosférico por los microorganismos fijadores, la meteorización de la roca madre y la extracción por raíces profundas (Ovington, 1962). La salida de nutrientes del ecosistema pueden ser lixiviados

hacia las aguas de los ríos, siendo el nitrato y el nitrógeno los principales lixiviados; además, el agua de escorrentía puede arrastrar gran parte de los materiales resultantes de la erosión, causada por las actividad forestales (Bosco *et al.*, 2004).

El ciclo interno o biogeoquímico corresponde al retorno de nutrientes entre el suelo y las plantas y está conformado por la absorción de nutrientes a través de las raíces de la vegetación, misma que se encuentra definida por la velocidad de descomposición, la mineralización, la capacidad de intercambio catiónico y la competencia con los microorganismos (Bosco *et al.*, 2004). La retranslocación de nutrientes consiste en la reabsorción y/o transferencia de nutrientes solubles del tejido, envejecido a través del floema, el lavado de nutrientes de las hojas que comprende el 15% de promedio anual de los nutrientes de la biomasa vegetal aérea hacia el suelo forestal (Chapin *et al.*, 2002), pérdidas por herbivoría, desfronde y descomposición (Figura 1) (Bosco *et al.*, 2004).

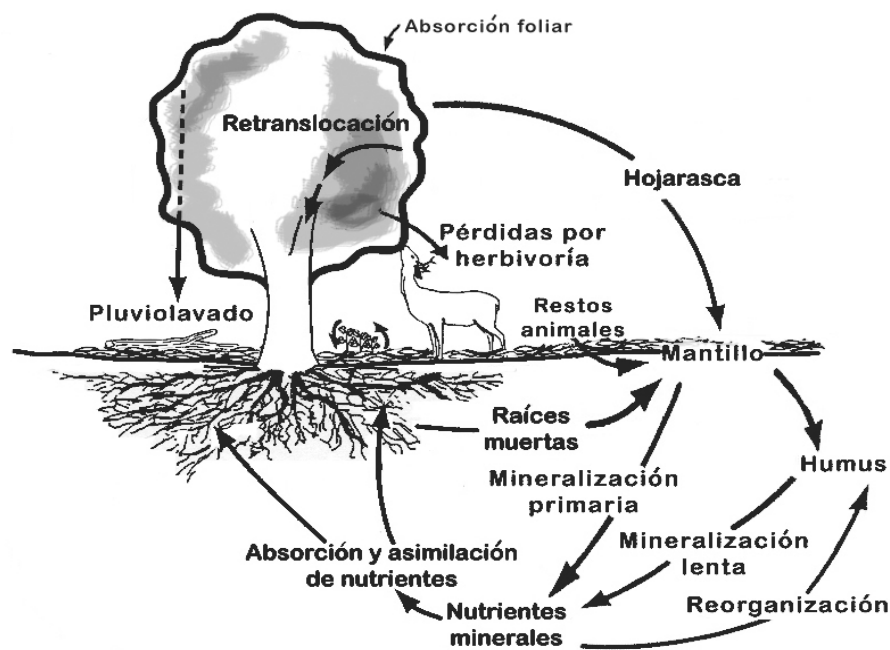


Figura 1. El ciclo de nutrientes en el bosque (Bosco, et al., 2004).

3.4. Nutrientes esenciales y su funcionamiento en las plantas

Los nutrientes minerales ayudan en el crecimiento normal de los árboles, por tanto, si un nutriente no se encuentra disponible para el árbol ocasionará una disminución en su crecimiento (Aristizábal, 2003 Mencionado por Rojas, 2015). Cuando el árbol está creciendo pasa por la fase vegetativa; donde las plantas desarrollan la raíz (sistema de absorción y anclaje), el tallo, ramas (sistema de soporte y conducción) y las hojas (sistema fotosintético). Posteriormente, entran a la fase reproductiva, donde ocurre la formación de flores y frutos con semillas (Aristizábal, 2003 Mencionado por Rojas, 2015).

Bertsch (1998). menciona que existen 16 elementos considerados como esenciales para las plantas; el carbón (C), hidrogeno (H) y oxígeno (O) que son los que necesita en mayor proporción y los obtiene principalmente del agua y el aire. En seguida, los nutrientes que las planta absorben del suelo en grandes cantidades como; el nitrógeno (N), potasio (K), fósforo (P) y el magnesio (Mg), calcio (Ca) y azufre (S), se consideran medios por que la planta las consume en menor cantidad que los nutrientes antes mencionados y por último, los elementos que requieren las plantas en menores cantidades, los denominados micronutrientes (Cu, Fe, Mn, Zn, B, Mo, Cl y Ni).

Son considerados como nutrientes esenciales porque en ausencia de cualquiera, de uno de estos elementos las plantas no pueden completar su ciclo de vida, la función del nutriente no puede ser substituido por otro, además de formar parte de alguna de las moléculas o constituyentes de las plantas, que en sí son esenciales para éstas; por ejemplo el nitrógeno en las proteínas o el magnesio en la clorofila (Salisbury y Ross, 1991).

3.4.1. Macronutrientes

3.4.1.1. Calcio (Ca)

Es un elemento abundante en la litosfera, sus proporciones en el suelo depende de la roca madre y se encuentran de forma mineral como carbonatos, fosfatos, sulfatos y algunos silicatos; los dos primeros tienen una solubilidad muy dinámica y el resto son insolubles (Monge *et al.*, 1994). El calcio es requerido por las plantas para el funcionamiento normal de la membrana vegetal y ha sido participativo como mensajero, por lo que los iones de calcio se pueden unir a la calmodulina, la cual es una proteína que se encuentra en el citosol de las células vegetales, como intermediario de señalización por Ca^{2+} y participa en la regulación de muchas funciones celulares. Además, interviene en el desarrollo de las raíces, hojas, en la conformación de mitocondrias y el núcleo (Ramírez y González, 2017). La deficiencia de este elemento afecta las partes en formación y meristemas en crecimiento, quedando prácticamente inmóvil en las paredes celulares, debido a que este macronutriente se acumula en los órganos más maduros, donde se encuentra poco inmóvil, mientras que los órganos con mayor actividad metabólica (hojas en crecimiento, flores, frutos y meristemas apicales) son los que necesitan mayor aporte de calcio (Chiu y Bould, 1977).

3.4.1.2. Magnesio (Mg)

El magnesio es el segundo catión más abundante en las plantas (Senbayram *et al.*, 2015) las cuales lo absorben como un catión divalente (Mg^{2+}) (Lora, 1994), participa en la fotosíntesis, en la activación de enzimas y la síntesis de ácidos nucleicos y proteínas (Cowan, 2002; Marschner, 2012; Shaul, 2002) y se encuentra en parte central de la molécula de clorofila (Marschner, 1998). Por lo que su deficiencia afecta la tasa fotosintética, además de alterar el metabolismo de la planta. El Mg es un macronutriente móvil en las plantas, por lo cual los primeros indicios de deficiencia son habitualmente visuales y se presentan en las hojas más viejas (Cakmak y Kirkby, 2008; Bergmann, 1994).

3.4.1.3. Potasio (K)

El potasio es el catión más frecuente en las rutas metabólicas de los vegetales, contribuye en los procesos fotosintéticos promoviendo un mayor aprovechamiento de CO₂, promoviendo así la fabricación de azúcares. Además, este macronutriente mejora la tolerancia de las plantas al estrés hídrico e interviene en la activación de varias enzimas relacionadas con el desarrollo de la planta. Sin embargo, la baja disponibilidad de este catión puede provocar la falta de tolerancia de las plantas a los cambios que sucedan en el ambiente y al estrés hídrico (Ramírez y González, 2017).

3.4.2. Micronutrientes

3.4.2.1. Cobre (Cu)

El cobre es un elemento esencial que participa en muchos procesos fisiológicos en las plantas. Fisiológicamente se encuentra como Cu²⁺ y Cu (Yruela, 2005). Interviene en el transporte de electrones fotosintéticos, en la respiración de la mitocondria (Marschner, 1995 citado por Yruela, 2005) y se encuentra unido a las proteínas en las células, ya que puede ocasionar estrés oxidativo y causar graves daños a las moléculas como ion libre (Ducic y Polle, 2005). Cuando hay deficiencia de cobre las hojas jóvenes de las plantas adquieren un color verde oscuro y algunas veces presentan manchones necróticos aunque rara vez se presenta la deficiencia porque las plantas lo requieren en cantidades muy pequeñas (Salisbury y Ross, 1991).

3.4.2.2. Hierro (Fe)

El hierro en las planta, principalmente participa como un catalizador en el proceso de síntesis de clorofila (Razeto, 1993). Además, tiene una relación fuerte con el metabolismo de las proteínas (Uchida, 2000). La ausencia de hierro provoca una clorosis férrica (Razeto, 1993), que normalmente se presenta en el tejido foliar recién formado (Ramírez y González, 2017). Probablemente, este micronutriente

se almacena en las hojas más antiguas y es relativamente inmóvil en el floema, al igual que en el suelo debido a que se precipita internamente en las células de las hojas como un óxido insoluble o en la forma de compuestos como los fosfatos férricos orgánicos o inorgánicos (Salisbury y Ross, 1991).

3.4.2.3. Manganeso (Mn)

El manganeso se presenta en tres estados de oxidación (Mn^{2+} , Mn^{3+} y Mn^{4+}) insolubles en el suelo y también como quelato; es absorbido como el catión manganesoso divalente (Mn^{2+}) después de haber sido liberado de un quelato (Salisbury y Ross, 1992). El Mn es esencial para las plantas, debido a que actúa en la fotosíntesis, además de que ayuda a transformar el nitrógeno en nitratos para que las plantas lo puedan absorber; por ello, se dice que juega un papel importante en los procesos metabólicos de las plantas (Ramírez y González, 2017).

3.4.2.4. Zinc (Zn)

El Zinc es un micronutriente transportado vía xilema, poco móvil en el interior de la planta, es constituyente de la enzima anhidrasa carbónica, que se localiza tanto en el cloroplasto como en el citoplasma, la cual es una enzima que cataliza la formación de ácido carbónico a partir de CO_2 y agua (Marschner, 1995). También, participa en la formación del aminoácido triptófano que es el antecesor importante de las auxinas la cual es la promotora del desarrollo de las plantas (Ramírez y González, 2017).

3.5. Estudios afines sobre la liberación de nutrientes

Lisanewick y Michelsen (1993) analizaron la tasa de degradación y liberación de nutrientes de la hojarasca de *Cupressus lusitanica*, *Eucalyptus globulus* y *Juniperus procera* y lo compararon con un bosque adyacente de *Juniperus-Olea-Pocarpus* y al término de 12 meses encontraron el siguiente patrón de liberación de nutrientes por sitio $J. procera = C. lusitanica > Eucalyptus globulus =$ bosque

natural, ambos sitios presentaron el siguiente orden de liberación, K> Mg> Ca> N = P.

Rustad (1994) determinó el contenido de los nutrientes (C, N, P, Ca, Mg, Mn, Fe y Al) a lo largo de la descomposición de la hojarasca en un ecosistema de abeto rojo en Maine durante 57 meses. Sus resultados arrojaron una pérdida de hojarasca del 63% de la masa original y una liberación del 65% de C, 17% de N, 79% de P, 50% de Ca, 80% de Mg y 74% de Mn, mientras que Al y Fe no presentaron liberación, sino una acumulación de 431 y 353%, respectivamente.

Hernández *et al.* (1995), determinaron la dinámica de los bioelementos durante la descomposición de la hojarasca en un bosque de *Quercus rotundifolia* (roble perenne), un bosque de paraclimax de *Pinus pinea* (pino piñonero) y un bosque de disclimax de *P. pinaster* (pino marítimo). En dicho estudio, se observó una pérdida progresiva de C, P y Mg en las hojas de roble y acículas de pino en descomposición, y una pérdida aguda de K. En cuanto a N y Ca, se observó una inmovilidad. El bosque de *Pinus pinaster* tuvo el retorno anual más bajo de N y P.

Moro y Domingo (1996) estudiaron la pérdida de peso y la liberación de N, P, K, Mg y Ca de la hojarasca de *Adenocarpus decorticans* Boiss, durante 828 días. Obtuvieron una tasa de descomposición estimada de -0.82 el primer año, mientras para el en el segundo año fue de -0.62 y -0.53. En cuanto a la liberación neta de nutrientes a cabo de 1.5 años, encontraron el siguiente patrón: K>Mg>Ca>P>N y su tasa de liberación de nutrientes estimadas a partir de ajustes exponenciales simples fue de -0.31% (N), -1.69% (K), -0.96% (Mg) y -0.68% (Ca).

Ribeiro *et al.* (2002) estudiaron la descomposición y la liberación de los nutrientes (N, P, S, K, Ca, y Mg) de la hojarasca de *Eucalyptus globulus* en diferentes parcelas: de control, parcela sin ningún tratamiento (C), parcelas fertilizadas (F), parcelas irrigadas (I) y parcelas irrigadas y fertilizadas (IL e ILN). Obtuvieron que la tasa de descomposición de la hojarasca fue 0.37 años en las parcelas que no reciben tratamiento y 0.42 años en las parcelas fertilizadas. En cuanto a la liberación de los nutrientes durante los primeros 133 días: N, P y Ca presentaron una correlación positivamente con su concentración inicial y al final del estudio, la cantidad de N, P, Mg y K fue similar a la determinada después de las etapas iniciales de descomposición con excepción del S y Ca.

Prause *et al.* (2003b) determinaron la cantidad total y liberación de los elementos N, P, K de las hojas de Quebracho colorado chaqueño (*Schinopsis balansae* Engl.) durante el proceso de descomposición, por lo que utilizaron el método de las bolsitas de descomposición. Sus resultados presentan una liberación rápida de N y K durante la descomposición de las hojas mientras que el elemento más retenido por el material vegetal fue el fósforo.

Barrera *et al.* (2004) estudiaron la descomposición de la hojarasca de tres rodales maduros de *Austrocedrus chilensis*. Observaron que la tasa de descomposición (k) promedio fue de 0.27 años^{-1} por lo cual concluyen que no se presentaron diferencias significativas entre los rodales. En cuanto a los nutrientes, el N no presentó liberación. Mientras que la tasa de liberación de otros elementos presentó el siguiente patrón: $K (0.60) \geq P (0.59) > Mg (0.40) > S (0.21) > Ca (0.10)$.

Yang *et al.* (2004), determinaron la cantidad y el patrón de caída de hojarasca, su retorno de nutrientes y la dinámica de N, P y K asociada con la descomposición de hojarasca en plantaciones de 33 años de edad de dos árboles

coníferos; el abeto chino (*Cunninghamia lanceolata*, CF) y *Fokienia hodginsii* (FH), y dos árboles de hoja ancha, *Ormosia xylocarpa* (OX) y *Castanopsis kawakamii* (CK) y lo compararon con los de un bosque natural adyacente de *Castanopsis kawakamii*. La caída de hojarasca en el OX, CK y NF mostró un patrón de distribución unimodal, mientras que CF y FH, presentó un patrón de caída de la hojarasca múltiple. Los rendimientos anuales más altos de Ca y Mg fueron más notaron en la FH y en la CK, respectivamente. Las cantidades de N, P y K que potencialmente regresaron al suelo. Las tasas anuales de descomposición de la materia seca (k) fluctuaron entre 1.157 en CF y 4.619 en OX). Las constantes de descomposición de los nutrientes durante la descomposición de la hojarasca presentó la siguiente orden $kK > kP > kN$, con excepción de la hojarasca de OX presentado el siguiente patrón $kK > kN > kP$.

Farfán (2007), valoró la degradación de la materia seca y la transferencia de nutrientes de *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis* en sistemas agroforestales con café. En dicho estudio se obtuvo una tasa de descomposición mensual (K) que fluctuó entre 0.87 a 1.08, 0.78, 0.26 y 0.72 en café, *C. alliodora*, *P. oocarpa* y *E. grandis*, respectivamente. La aportación de nutrientes al suelo por café fue de 64.8% de N, 82.9% P, 96.7% K, 34.3% Ca y 63.1% Mg; la transferencia por *C. alliodora* fue del 33.3%, 54.4%, 93.6% 54.0% y 67.4%, respectivamente. En cuanto al *E. grandis* fue del 23,6%; 35,5%; 89,3%; 28,5% y 39,9%, respectivamente; mientras que *P. oocarpa* solo aportó 64.5% de K.

Wang *et al.* (2008), compararon la producción, descomposición y el retorno de nutrientes en un monocultivo de *Cunninghamia lanceolata* con un rodal mixto en el sur de China. En dicho estudio se observó que la producción media anual de hojarasca fue significativamente mayor en un 24% en el rodal mixto que en el monocultivo de *C. lanceolata*. Cabe mencionar que dentro de la base mixta, alrededor del 38% del total de la caída de la hojarasca fue de *Michelia macclurei* (árbol de hoja ancha). En cuanto a la tasa de descomposición la hojarasca mixta

fue leve, pero no significativamente más rápida que en la hojarasca pura. Los rendimientos de N, P y K a través de la hojarasca fueron significativamente más altos en el rodal mixto que en el rodal puro, pero los rendimientos de C, Ca y Mg entre ambos rodales no difirieron significativamente. El porcentaje de contribución de la hojarasca de *M. macclurei* al retorno total de nutrientes varió de 23% al 79% en el grupo mixto.

Alvarez *et al.* (2008), estudiaron la descomposición y dinámica de los elementos nutritivos en la hojarasca de *Quercus robur*, *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens* en suelos desarrollados a partir de granodiorita, pizarra y piedra caliza en Galicia, noroeste de España. Los resultados arrojaron una liberación de nutrientes mayor en las especies de hoja ancha (eucalipto y roble). Los elementos K y S se liberaron de manera rápida en los tres tipos de vegetación, mientras que Ca y Mg mostraron la mayor tendencia a inmovilizarse.

Goya *et al.* (2008), estimaron la tasa de degradación de la materia orgánica y la liberación e inmovilización de los nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe y Al) de la hojarasca de *Eucalyptus grandis*, en tres diferentes tipos de suelo y obtuvieron que la tasa anual de descomposición en el suelo arcilloso fue más rápida (0.44 años) que en los suelos arenoso y mestizo (0.30). La cantidad de Ca, Mg y Mn presentaron diferentes fluctuaciones en cada tipo de suelo, mientras que el Fe y Al aumentaron de manera similar y en el caso de N y P, no presentó movilidad en el suelo arcilloso, más rico en nutrientes.

Castellanos y León (2011), estudiaron el efecto de la precipitación y el tratamiento de subsolado del suelo en plantaciones de *Acacia mangium*, durante seis meses y obtuvieron que la materia seca residual promedio (MSR) fue del 47%. En cuanto a los nutrientes N, Ca y Mg en la hojarasca de *A. mangium* presentaron lenta

liberación, mientras que P mostró un proceso dominante de inmovilización, por lo cual se lo atribuyeron a su baja disponibilidad en el suelo.

Ghasemi *et al.* (2016), cuantificaron la pérdida de masa y la dinámica de nutrientes de las acículas de abeto de Noruega y combinadas con la hojarasca de *Fagus orientalis* durante 400 días. Los resultados que obtuvieron mostraron que la tasa de descomposición de las acículas de abeto generalmente es más baja que cuando se combina con la hojarasca de *F. orientalis*. En cuanto a la concentración de N, P, K, Mg, Mn y Ca en la hojarasca de abeto combinada con la hojarasca *F. orientalis* generalmente es mayor en comparación con la de abeto y al final del período de descomposición. La liberación de Mn y N fue significativamente mayor en las acículas de abeto combinadas con *F. orientalis* que cuando se descompuso sola. Por lo que concluyeron que combinar la plantación de abeto noruego con *F. orientalis* regulan la tasa de descomposición de la hojarasca y del ciclo de nutrientes.

Colín *et al.* (2018), determinaron el contenido de los macro (Ca, K, P y Mg) y micronutrientes (Cu, Fe, Mn y Zn) durante el proceso de degradación de la hojarasca del matorral espinoso tamaulipeco y compararon su dinámica en dos estaciones del año (invierno y primavera). Los resultados arrojaron que la hojarasca en la estación de primavera se degrada $0.001 \text{ g g}^{-1} \text{ año}^{-1}$ más rápido que en la estación de invierno, en cuanto a los nutrientes, K y Mg presentaron liberación en ambas estaciones, mientras que Ca y P no presentaron liberación. En el caso de los micronutrientes, Cu, Fe, Mn y Zn no presentaron liberación con excepción del Cu que solo en la estación de invierno tuvo una tendencia de liberación.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Localización y descripción del área de estudio

La investigación se realizó en el Campus Ecológico Bosque Escuela de la Universidad Autónoma de Nuevo León, localizado en el municipio de Iturbide, Nuevo León. La ubicación geográfica es $24^{\circ}42'28''$ N; $99^{\circ}51'43''$ O; con una altitud de 1,600 msnm (Bravo-Garza, 1999). La vegetación predominante corresponde a Bosques mixtos de Pino-Encino (Bravo-Garza, 1999). Los tipos de suelo son Castañozem y Leptosol. La temperatura promedio anual es de 14°C y la precipitación promedio anual es de 635 mm (Bravo-Garza, 1999).

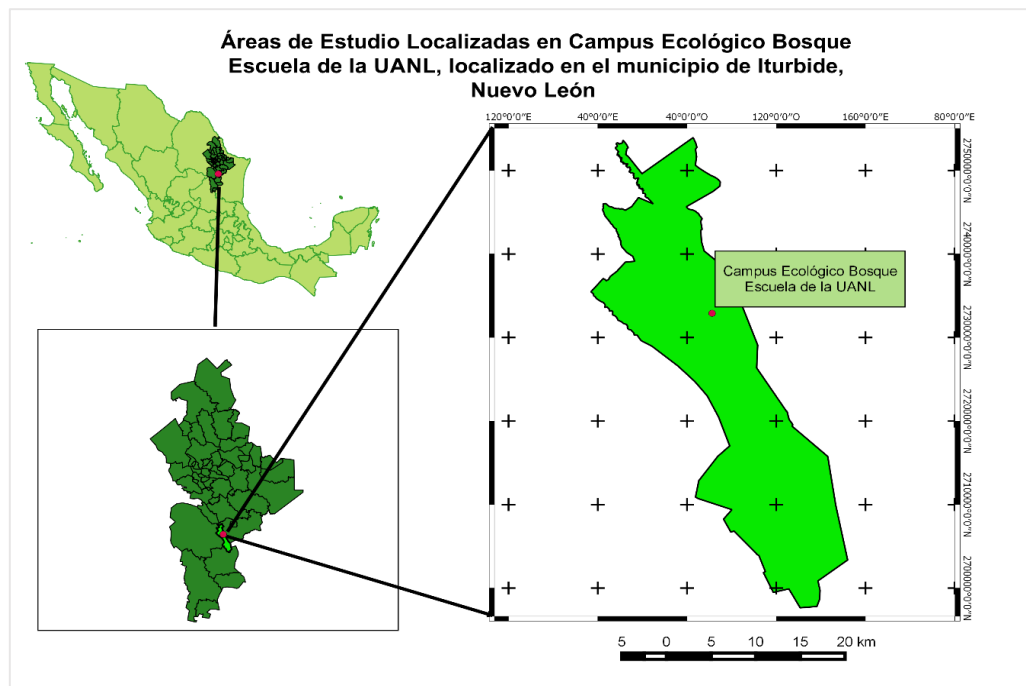


Figura 2. Localización del área de estudio.

4.2. Colocación y frecuencia de recolecta de las muestras

Se empleó el método de la bolsa de hojarasca (“litter bag”) (Bocock y Gilbert, 1957); consistió en colocar 5.0 g de hojarasca recién caída en bolsas de 25 cm x 20 cm de tela nylon con una apertura de 1 mm². En cada bolsa, se depositó una mezcla homogénea de los componentes de la hojarasca (hojas, ramas, estructuras reproductivas y otros componentes de la hojarasca) en tres ecosistemas: Bosque de Pino, Encino y Pino-Encino. Colocando un total de 120 bolsas sobre el suelo forestal, distribuidas en cinco parcelas experimentales (20 m x 20 m) por cada tipo de ecosistema forestal. Posteriormente, se recolectaron dos bolsas de hojarasca por parcela a los 15, 30, 60, 90, 150, 210, 270, 330, 390, 450, y 510 días, durante el 15 Diciembre de 2016 al 09 de Mayo de 2018. A cada tiempo de incubación se colectaron un total de 10 bolsas por sitio (Pino, Encino y Pino-Encino). Las muestras fueron trasladadas a el Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL, donde fueron puestas a secar a una temperatura de 60°C, hasta llegar a su peso constante y obtener la materia seca residul. Posteriormente, las muestras fueron molidas en el molino Thomas Willey mini mil (*Thomas Scientific Apparatus*, modelo 3383) con una malla del número 20 (0.85 mm²) y se depositaron en bolsas tipo *Ziploc*®, previamente etiquetadas por fecha, repetición y tipo de bosque muestreado, para su posterior análisis químico.

4.3. Determinación de los de nutrientes en la hojarasca

La cuantificación del contenido de nutrientes, por cada tipo de ecosistema forestal estudiado y tiempo de incubación, se realizó en diez repeticiones de las muestras correspondientes a los tiempos de incubación 0, 15, 30, 60, 90, 180, 210, 270, 330, 390, 450 y 510 días.

La preparación de los extractos para obtener el contenido de nutrientes en la hojarasca se realizó mediante las técnicas analíticas de digestión descritas en AOAC (1990) la cual consiste en pesar 1.0 g de la muestra y colocarla en crisoles

previamente rotulados y puesto a secar en una estufa (Felisa, FE-292AD) de aire forzada a 105°C para obtener el peso seco. Posteriormente, las muestras se incineraron en la mufla (Thermo Scientific, modelo F-48010) a 550°C durante 4 h. Una vez obtenidas las cenizas, se enfriaron a temperatura ambiente y estas se diluyeron con 20 mL de agua destilada en vasos de precipitado de 50 mL, en seguida se agregaron 2.5 mL ácido clorhídrico (HCl) y 0.5 mL de ácido nítrico (HNO₃) y fueron puestas a calentar en parrillas de calentamiento hasta obtener un volumen de 10 mL. Nuevamente se permitió enfriar y se les agregó 10 mL más de agua destilada y posteriormente se colocaron en la parrilla de 2 a 3 minutos, se retiraron y puestas a enfriar. Una vez estando las muestras a temperatura ambiente, se filtró el extracto usando papel filtro Watham No. 40 Watham, en un matraz volumétrico de 25 mL y se aforaron con agua destilada. Posteriormente, las muestras fueron refrigeradas hasta realizar los análisis cuantitativos de cada nutriente.

Las concentraciones de Ca, K, Mg, Cu, Fe, Mn y Zn se analizaron por espectrofotometría de absorción atómica, mediante un espectrofotómetro marca Perkin-Elmer, modelo PinAAcle 900F. Las concentración de Ca se cuantificaron con óxido nitroso/flama de acetileno, mientras que el K, Mg, Cu, Mn, Fe y Zn por medio de aire/flama de acetileno, según las especificaciones del instrumento.

4.4. Determinación de propiedades físicas y químicas del suelo

Con el fin de determinar algunas de las propiedades físico-químicas del suelo, se colectaron muestras de suelo a una profundidad de 0-10 cm de cada una de las 15 parcelas distribuidas en los tres tipos de ecosistemas forestales (Pino, Encino y Pino-Encino). Las muestras fueron colocadas en bolsas de polietileno previamente marcadas para trasladarlas al Laboratorio de Suelos y Nutrición Forestal de la Facultad de Ciencias Forestales de UANL, donde fueron puestas a secar al aire libre y posteriormente se molieron con un mazo de madera y su

tamizado a 2 mm con la finalidad de obtener el suelo fino. Una vez realizado este procedimiento, se determinó la textura, materia orgánica (MO, %), carbono orgánico (CO, %), pH, conductividad eléctrica (CE, $\mu\text{s}/\text{cm}$), así como también, el contenido de macro-nutrientes (Ca, Mg y K) y micro-nutrientes (Cu, Mn, Fe y Zn) de acuerdo al manual de suelos descrito por Woerner (1989). Los métodos empleados se ilustran en la Tabla 1 y los resultados obtenidos de las propiedades físico-químicas del suelo por tipo de ecosistema forestal se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1. Métodos empleados para determinar las propiedades físico-químicas del suelo.

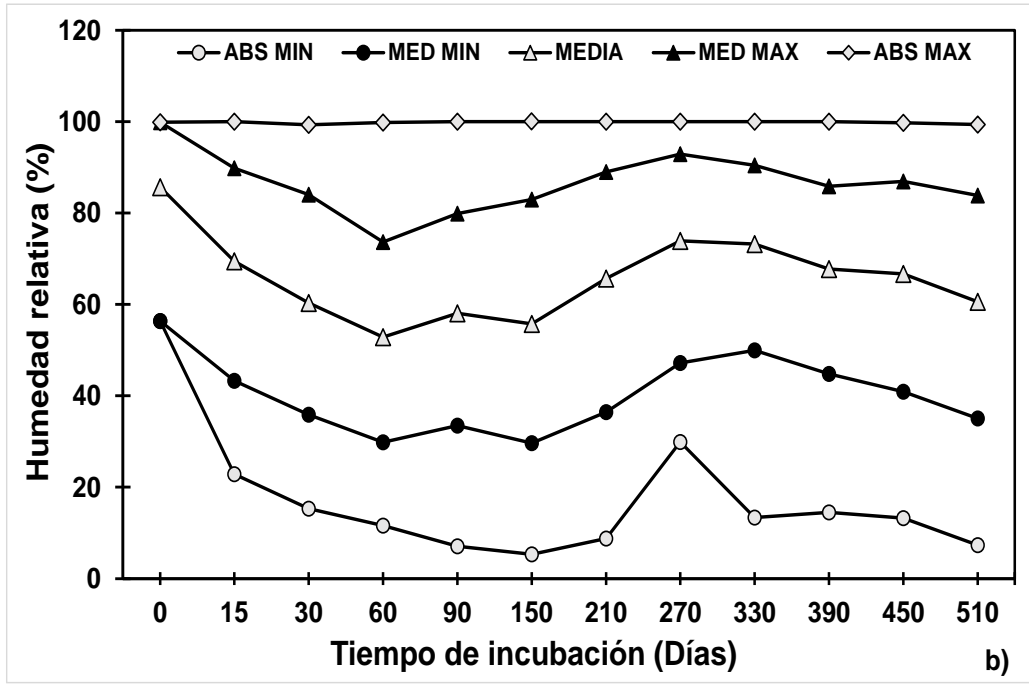
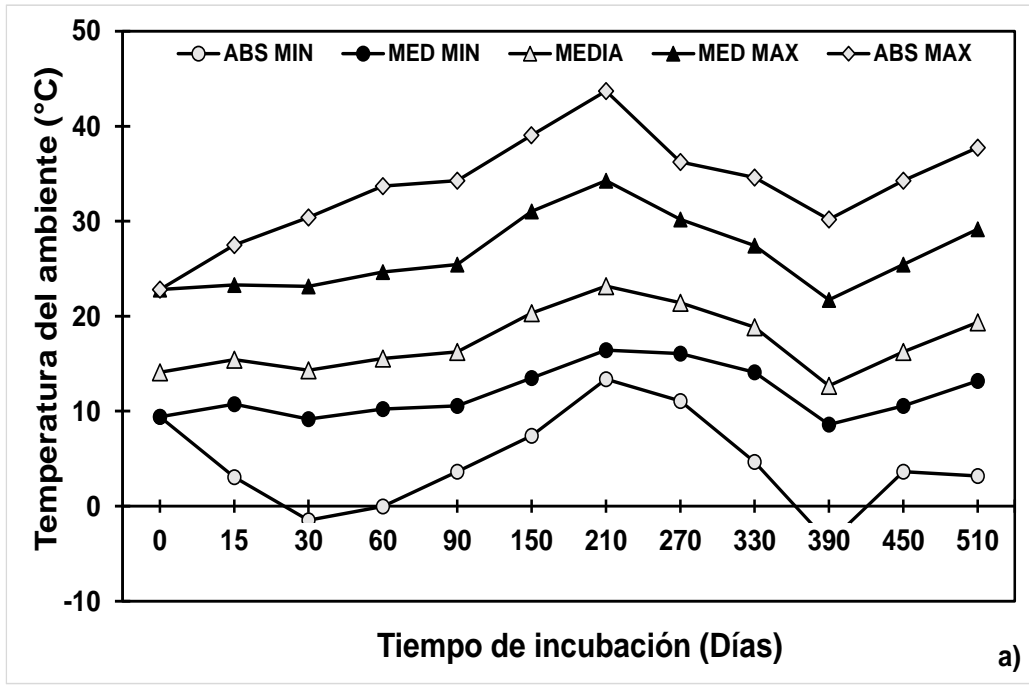
| Técnica analítica | Método |
|--------------------------|--|
| Textura | Textura del suelo, procedimiento de Bouyoucos (As-09 NOM-21-RECNAT-2000). |
| Materia Orgánica (MO) | Método de combustión húmeda según Walkley-Black (Woerner, 1989). |
| Carbono orgánico (CO) | Método de combustión húmeda según Walkley-Black (Woerner, 1989). |
| pH (reacción del suelo) | Potenciómetro en suspensión de suelo - CaCl_2 0.01 M relación 1:2.5 (Woerner, 1989). |
| Conductividad eléctrica | Celda de conductividad en suspensión suelo-agua 1:5 (Woerner, 1989). |
| Macro-nutrientes | Extracción de Ca, Mg y K con acetato de amonio pH 7.0 y determinación mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (Woerner, 1989). |
| Fósforo | Método de Ácido Ascórbico (HACH, 1999c). |
| Micro-nutrientes | Extracción de Fe, Mn, Zn y Cu con DTPA-TEA- CaCl_2 y la determinación mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (Woerner, 1989). |

Tabla 2. Algunas propiedades físicas y químicas del suelo realizadas a una profundidad de 0-10 cm en los ecosistemas forestales estudiados.

| Propiedades | Ecosistema Forestal | | |
|-------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------|
| | Pino | Encino | Pino-Encino |
| Textura | Franco-limoso | Franco-limoso | Franco-limoso |
| MO (%) | 8.33 | 10.19 | 9.43 |
| CO (%) | 4.83 | 5.91 | 5.47 |
| pH | 7.46 | 7.23 | 6.85 |
| CE ($\mu\text{s/cm}$) | 153.11 | 211.29 | 160.72 |
| | | (mg kg ⁻¹ suelo) | |
| Ca | 936.64 | 1069.84 | 8487.20 |
| Mg | 94.04 | 130.64 | 132.20 |
| K | 250.92 | 315.36 | 457.00 |
| P | 12.25 | 11.03 | 17.55 |
| Cu | 1.44 | 2.07 | 1.84 |
| Mn | 36.80 | 182.06 | 29.75 |
| Fe | 54.08 | 44.49 | 27.75 |
| Zn | 1.23 | 3.03 | 5.46 |

4.1. Variables ambientales

Se instalaron sensores automatizados tipo HOBO (Familia H8, Forestry Suppliers, Inc.). Para registrar las variables ambientales como temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%) y temperatura del suelo ($^{\circ}\text{C}$) en los tres sitios se usó el sensor HOBO Pro v2 Series Onset Temp/RH y Temp/Ext Temp (Forestry Suppliers, Inc.), los cuales fueron programados, de tal manera que los datos se registraran cada hora y la cantidad diaria de precipitación pluvial (mm) se cuantificó durante el periodo de estudio mediante un pluviómetro automatizado marca HOBO, conectado a un registrador HOBO Event Onset_i (Figuras 3a, 3b, 3c y 4).



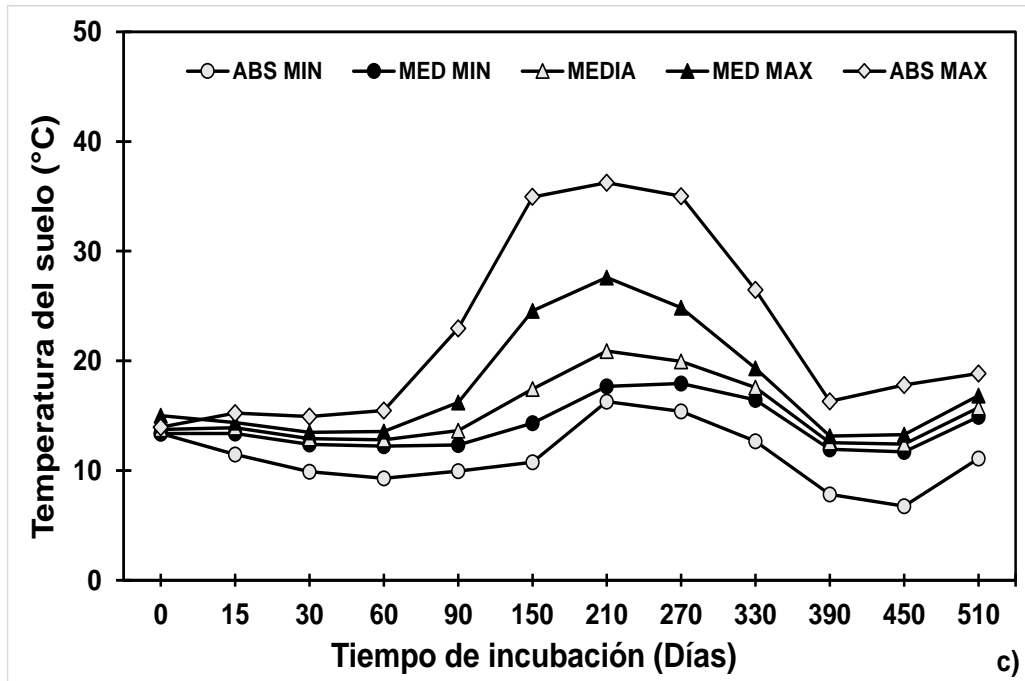


Figura 3. Temperatura ambiente (a), humedad relativa (b) y temperatura del suelo (c) registrada en el sitio de estudio.

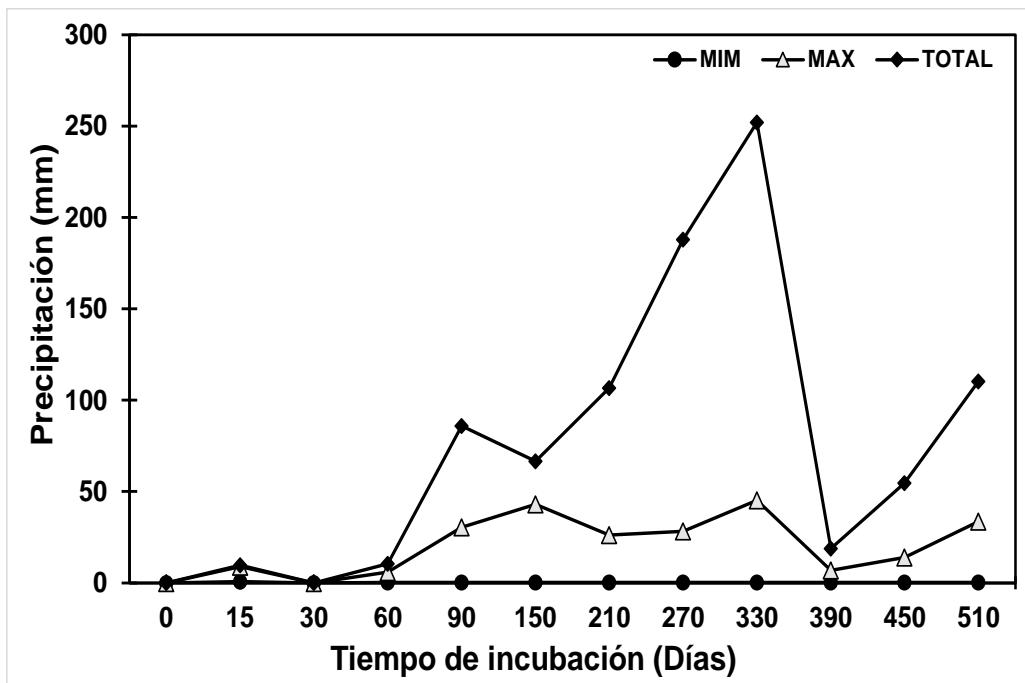


Figura 4. Precipitación (mm) registrada en el sitio de estudio.

4.2. Análisis estadístico

Se utilizó tanto estadística descriptiva como inferencial (Ott, 1993). Para probar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza de los datos, correspondientes al contenido de nutrientes vía descomposición de la hojarasca, por tiempo de incubación y ecosistema de muestro, por lo que fueron sometidos a las pruebas estadísticas de Kolmogorov-Smirnov, Shapiro Wilk y Levene (Steel y Torrie, 1980). Como los resultados del análisis estadístico no cumplieron los supuestos de homogeneidad de varianza y no se distribuyeron normalmente, se empleó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis con un nivel de significancia de $p < 0.05$ (Ott, 1993) para detectar las diferencias significativas entre los tipos de ecosistemas forestales a cada tiempo de incubación en el contenido de nutrientes. La liberación de los nutrientes se calculó mediante el producto de la MRS por la concentración de nutriente al tiempo (C_t) y concentración inicial (C_i) o en el día cero (0). Para obtener la diferencia de $C_t \neq C_i$ (Castellanos y León, 2011). Todos los análisis estadísticos se ejecutaron en el paquete computacional Statistical Package for the Social Sciences versión 22.0 para Windows, con sus siglas en ingles SPSS®.

5. RESULTADOS

En las Tablas 3 y 4 se ilustran los resultados de la prueba de *Kruskal-Wallis* para detectar las diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tres tipos de ecosistemas forestales estudiados (Pino, Encino y Pino-Encino) y su contenido de macro y micronutrientes durante el proceso de descomposición de la hojarasca, a diferentes tiempos (días) de incubación (0, 15, 30, 90, 120, 150, 210, 270, 330, 390, 450 y 510) comprendidos del 15 de Diciembre de 2016 al 09 de Mayo de 2018.

El macronutriente Ca presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) en diez tiempos de incubación (0, 15, 30, 90, 150, 210, 270, 330, 390 y 450 días) de doce, mientras que el Mg en los doce tiempos de incubación presentó diferencias significativas ($p < 0.05$), de igual manera el K mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) en ocho tiempos de incubación (0, 15, 30, 90, 150, 210 y 270 días) (Tabla 3). En cuanto a los micronutrientes Cu y Mn en los doce tiempos de incubación mostró diferencias significativas ($p < 0.05$), mientras que el micronutriente Fe presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) en nueve tiempos de incubación (30, 90, 150, 210, 270, 330, 390, 450 y 510 días), y por su parte el micronutriente Zn, no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$) en tres tiempos de incubación (0, 60 y 450 días).

Tabla 3. Prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas valores de p en negritas ($p < 0.05$) indican las diferencias entre los tipos de ecosistema forestal (Pino, Encino y Pino-encino) en el contenido de macronutrientes en la hojarasca sometida a diferentes tiempos de incubación.

| Fecha de muestreo | Tiempo de Incubación (días) | Estadístico | Macronutriente | | |
|-------------------|-----------------------------|-------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | Ca | Mg | K |
| 15-dic-16 | 0 | χ^2 | 7.951 | 15.579 | 18.289 |
| | | Valor p | .019 | <0.001 | <0.001 |
| 30-dic-16 | 15 | χ^2 | 6.029 | 23.101 | 21.369 |
| | | Valor p | .049 | <0.001 | <0.001 |
| 14-ene-17 | 30 | χ^2 | 8.178 | 14.259 | 9.610 |
| | | Valor p | .017 | .001 | .008 |
| 13-feb-17 | 60 | χ^2 | .519 | 17.168 | 21.293 |
| | | Valor p | .772 | <0.001 | <0.001 |
| 15-mar-17 | 90 | χ^2 | 19.355 | 22.315 | 16.888 |
| | | Valor p | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| 14-may-17 | 150 | χ^2 | 17.613 | 22.165 | 14.785 |
| | | Valor p | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| 13-jul-17 | 210 | χ^2 | 24.785 | 22.195 | 18.415 |
| | | Valor p | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| 11-sep-17 | 270 | χ^2 | 14.234 | 20.207 | 17.876 |
| | | Valor p | .001 | <0.001 | <0.001 |
| 10-nov-17 | 330 | χ^2 | 17.393 | 17.448 | 4.060 |
| | | Valor p | <0.001 | <0.001 | .131 |
| 09-ene-18 | 390 | χ^2 | 9.618 | 16.849 | 3.585 |
| | | Valor p | .008 | <0.001 | .167 |
| 10-mar-18 | 450 | χ^2 | 6.704 | 14.509 | 2.725 |
| | | Valor p | .035 | .001 | .256 |
| 09-may-18 | 510 | χ^2 | 2.662 | 14.963 | 1.904 |
| | | Valor p | .264 | .001 | .386 |

Tabla 4. Prueba de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas valores de p en negritas ($p < 0.05$) indican las diferencias entre los tipos de ecosistema forestal (Pino, Encino y Pino-Encino) en el contenido de macronutrientes en la hojarasca sometida a diferentes tiempos de incubación.

| Fecha de muestreo | Tiempo de Incubación (días) | Micronutrientes | | | | |
|-------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | Estadístico | Cu | Mn | Fe | Zn |
| 15-dic-17 | 0 | χ^2 | 24.815 | 24.351 | 3.894 | 1.946 |
| | | Valor p | <0.001 | <0.001 | .143 | .378 |
| 30-dic-16 | 15 | χ^2 | 20.782 | 20.168 | 5.141 | 13.412 |
| | | Valor p | <0.001 | <0.001 | .076 | .001 |
| 14-ene-17 | 30 | χ^2 | 21.185 | 22.530 | 7.598 | 15.476 |
| | | Valor p | <0.001 | <0.001 | .022 | <0.001 |
| 13-feb-17 | 60 | χ^2 | 10.044 | 15.380 | 3.317 | 2.805 |
| | | Valor p | .007 | <0.001 | .190 | .246 |
| 15-mar-17 | 90 | χ^2 | 25.806 | 17.908 | 10.463 | 16.640 |
| | | Valor p | <0.001 | <0.001 | .005 | <0.001 |
| 14-may-17 | 150 | χ^2 | 20.689 | 20.820 | 14.195 | 19.156 |
| | | Valor p | <0.001 | <0.001 | .001 | <0.001 |
| 13-jul-17 | 210 | χ^2 | 25.806 | 21.613 | 9.900 | 10.655 |
| | | Valor p | <0.001 | <0.001 | .007 | .005 |
| 11-sep-17 | 270 | χ^2 | 24.007 | 19.745 | 10.951 | 11.129 |
| | | Valor p | <0.001 | <0.001 | .004 | .004 |
| 10-nov-17 | 330 | χ^2 | 21.920 | 15.854 | 7.224 | 17.859 |
| | | Valor p | <0.001 | <0.001 | .027 | <0.001 |
| 09-ene-18 | 390 | χ^2 | 23.048 | 20.868 | 15.627 | 13.427 |
| | | Valor p | <0.001 | <0.001 | <0.001 | .001 |
| 10-mar-18 | 450 | χ^2 | 12.715 | 14.730 | 10.521 | .628 |
| | | Valor p | .002 | .001 | .005 | .730 |
| 09-may-18 | 510 | χ^2 | 11.832 | 11.800 | 11.526 | 6.017 |
| | | Valor p | .003 | .003 | .003 | .049 |

5.1. Fluctuación de los Macronutrientes

5.1.1. Calcio (Ca)

El elemento Ca en los tres ecosistemas de estudio, evidenció una liberación que fluctuó de 26.09 a 9.43 mg·g⁻¹ para Pino, de 23.54 a 8.79 mg·g⁻¹ en Encino y de 27.20 a 9.33 mg·g⁻¹ para Pino-Encino. Lo que indica que en los tres ecosistemas este elemento tendió a liberarse, presentándose el siguiente orden 16.66, 14.75 y 17.87 mg·g⁻¹, respectivamente, equivalentes en porcentaje al 64%, 62% y 65% para Pino, Encino y Pino-Encino, respectivamente (Figura 5).

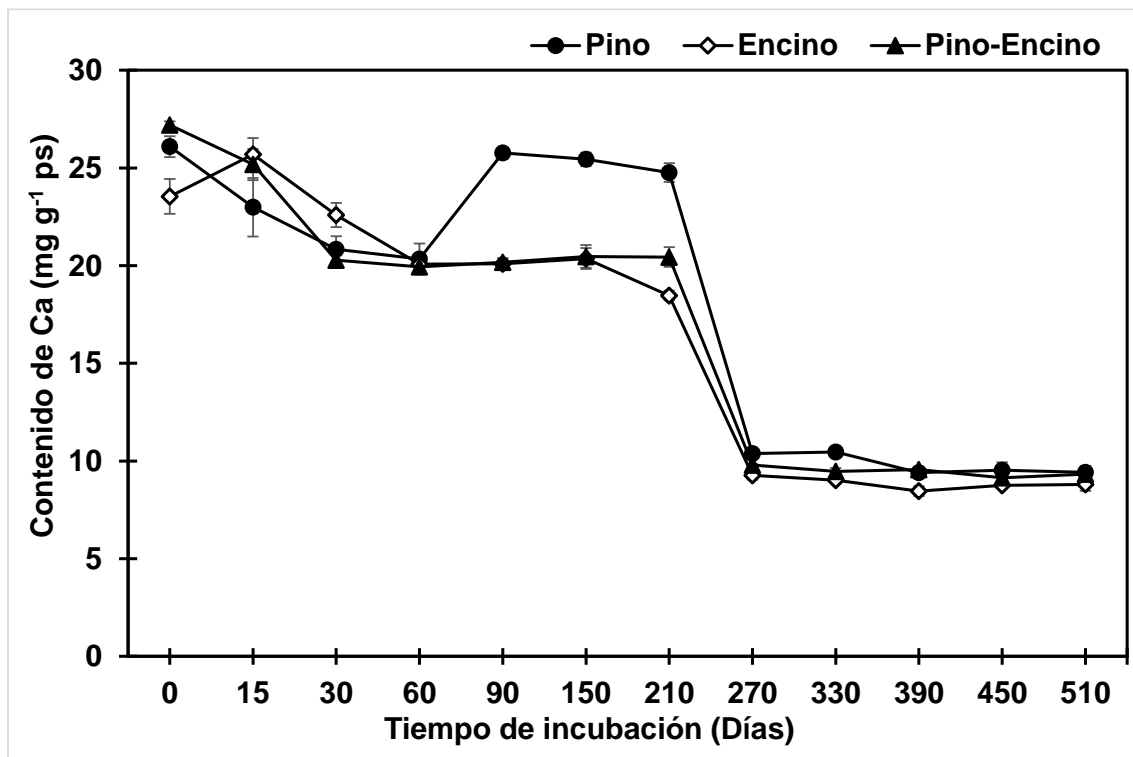


Figura 5. Contenido de Ca en la hojarasca a diferentes tiempos de incubación en tres tipos de bosques durante el proceso de descomposición. Los valores graficados corresponden a la media (n=10) ± error estándar.

5.1.2. Magnesio (Mg)

La dinámica del macro elemento Mg se ilustra en la Figura 6, mostrando una fluctuación de 4.42 a 2.78 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ en Pino, de 7.46 a 5.01 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ en Encino y de 6.97 a 3.92 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ para Pino-Encino. Al igual que el Ca, este elemento presentó liberación en los tres ecosistemas evaluados. La liberación de Mg en la hojarasca de Pino, Encino y Pino-Encino fue del 37% ($1.64 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), 33% ($2.45 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) y 44% ($3.05 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), respectivamente.

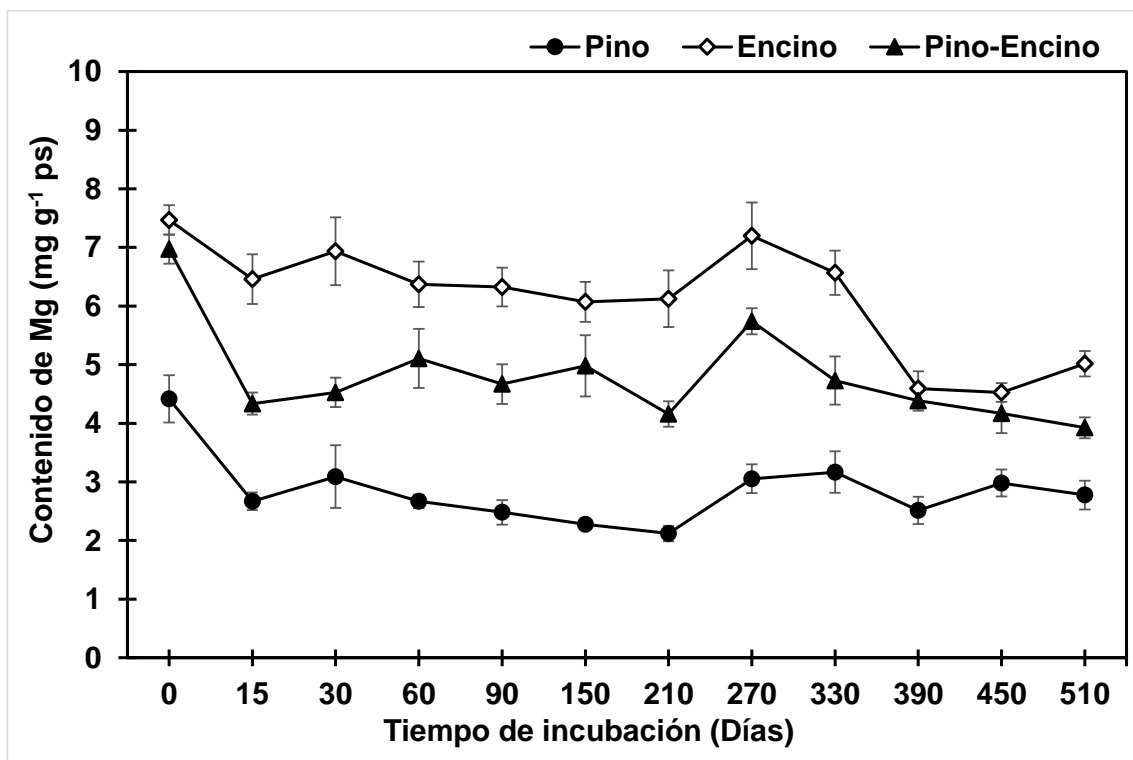


Figura 6. Contenido de Mg en la hojarasca a diferentes tiempos de incubación en tres tipos de bosques durante el proceso de descomposición. Los valores graficados corresponden a la media ($n=10$) \pm error estándar.

5.1.3. Potasio (K)

El contenido de K en la hojarasca de Pino tuvo una fluctuación de 5.77 a 5.06 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, presentando una liberación de 12% ($0.704 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$). En Encino y Pino-Encino tuvo una fluctuación de 12.19 a $4.58 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ y de 12.62 a $5.92 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente. Por tanto, de acuerdo a la Figura 7, este elemento tendió a liberar el 62% ($7.61 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) en la hojarasca de Encino y 53% ($6.7 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) en Pino-Encino.

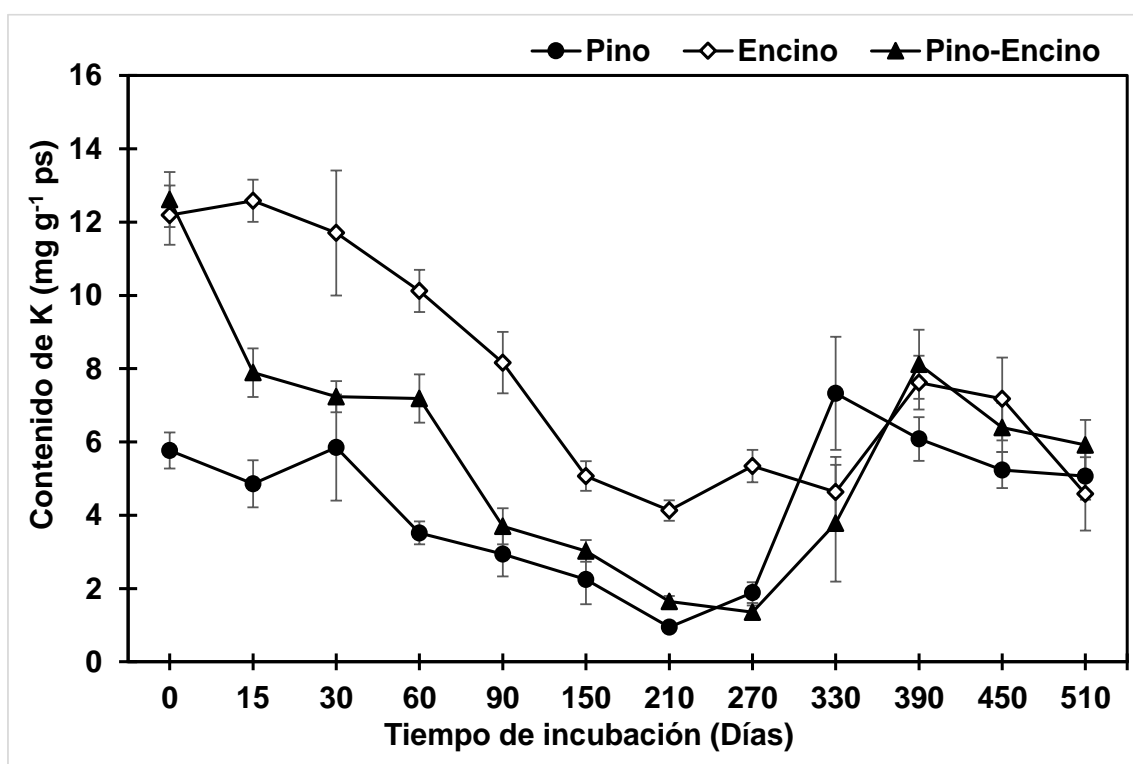


Figura 7. Contenido de K en la hojarasca a diferentes tiempos de incubación en tres tipos de bosques durante el proceso de descomposición. Los valores graficados corresponden a la media ($n=10$) \pm error estándar.

5.2. Fluctuación de Micronutrientes

5.2.1. Cobre (Cu)

El contenido de Cu en la hojarasca de Pino, presentó una fluctuación de 7.19 a 10.68 $\mu\text{g g}^{-1}$ teniendo un incremento de 3.58 $\mu\text{g g}^{-1}$, el cual fue del orden de 33% con respecto al valor inicial. El contenido de Cu en encino mostró una fluctuación de 24.73 a 17.20 , presentándose la mayor liberación a los 60 días de 10.61 $\mu\text{g g}^{-1}$ (57%) y el cobre en Pino-Encino fluctuó de 19.57 a 9.57 presentando liberación a los 90 días (9.69 $\mu\text{g g}^{-1}$). En la Figura 8 se ilustra que al final del período de incubación, el Cu mostró un liberación de 7.53 (30%) y 10 (51%) $\mu\text{g g}^{-1}$, en Encino y Pino-Encino, respectivamente.

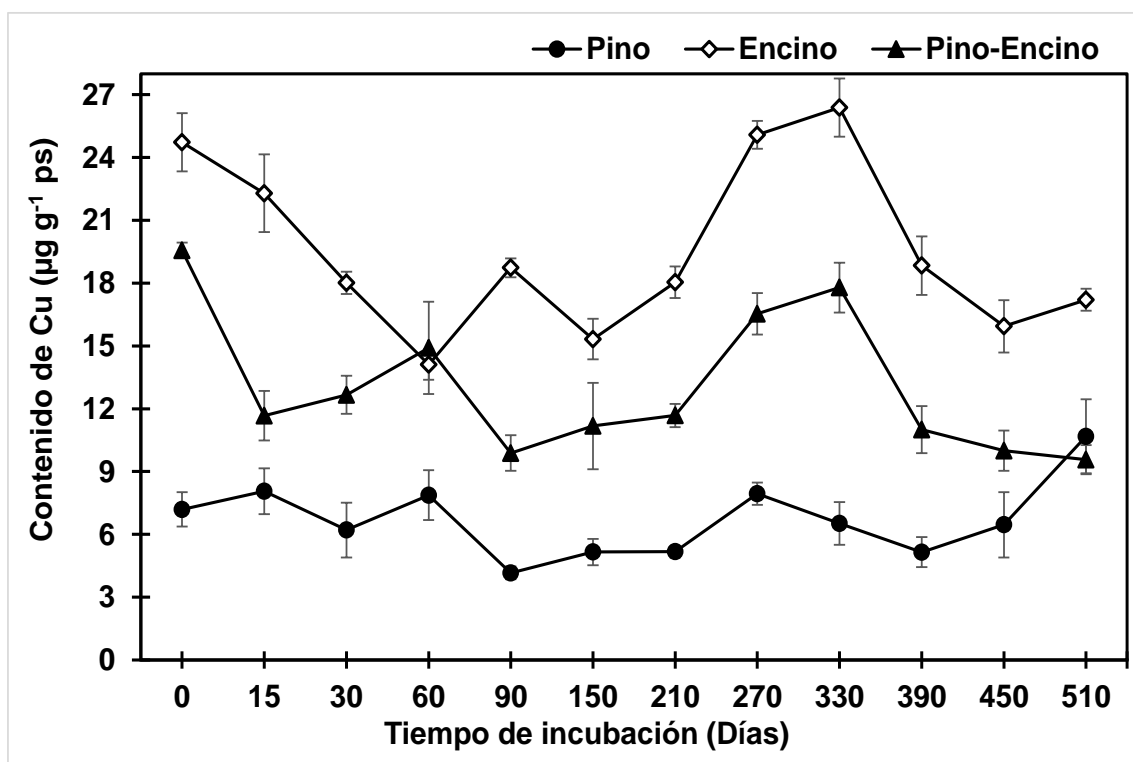


Figura 8. Contenido de Cu en la hojarasca a diferentes tiempos de incubación en tres tipos de bosques durante el proceso de descomposición. Los valores graficados corresponden a la media ($n=10$) \pm error estándar.

5.2.2. Manganeso (Mn)

El contenido de Mn en la hojarasca de Pino tuvo una fluctuación de 77.65 a 103.20 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, presentando una acumulación del 33% (25.55 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) a los 510 días con respecto al valor inicial. El contenido de Mn en Encino y Pino-Encino, tuvo una fluctuación de 1418.24 a 769.95 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ y de 922.85 a 571.34 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente. Por tanto, de acuerdo a la Figura 9, este elemento tendió a liberar 46% (71.405 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) de su contenido inicial en la hojarasca de Encino y 38% (351.51 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) en Pino-Encino.

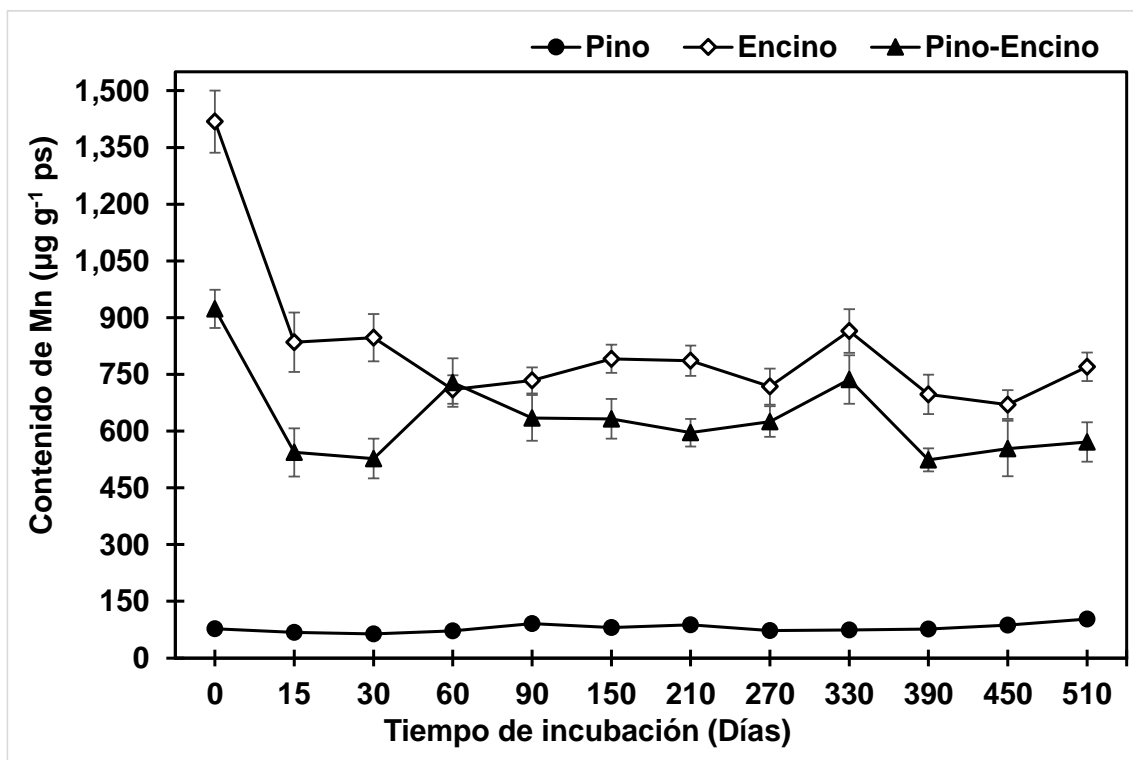


Figura 9. Contenido de Mn en la hojarasca a diferentes tiempos de incubación en tres tipos de bosques durante el proceso de descomposición. Los valores graficados corresponden a la media ($n=10$) \pm error estándar.

5.2.3. Hierro (Fe)

El elemento Fe mostró una fluctuación de 509.89 a 682.94 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ para el sitio Pino, 537.16 a 1560.55 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ en Encino y Pino-Encino de 658.79 a 921.11 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Independientemente, de los tres ecosistemas forestales, no existió liberación de Fe a lo largo del periodo experimental, encontrándose los valores más altos a los 330 días. En la Figura 10 se ilustra que al final del período de incubación, el Fe mostró un incremento del 34% (173.05 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 191% (1023.39 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) y 40% (262.32 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), en Pino, Encino y Pino-Encino, respectivamente.

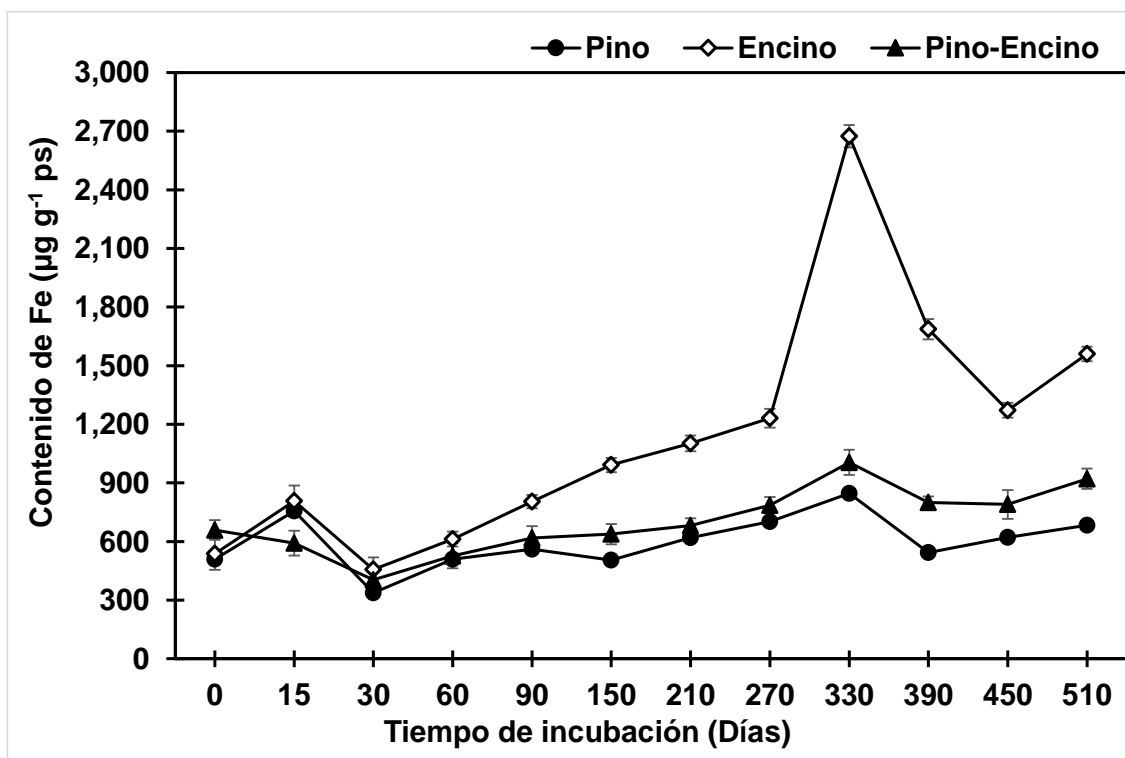


Figura 10. Contenido de Fe en la hojarasca a diferentes tiempos de incubación en tres tipos de bosques durante el proceso de descomposición. Los valores graficados corresponden a la media ($n=10$) \pm error estándar.

5.2.4. Zinc (Zn)

El microelemento Zn mostró una acumulación durante todo el periodo de estudio, con fluctuaciones de 102.97 a 163.87 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ para Pino, de 113.02 a 225.75 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ en Encino y de 108.01 a 189.56 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ para Pino-Encino; representando una acumulación a razón de 60.9, 112.73 y 81.55 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, que equivalen al 59, 99 y 75%, respectivamente (Figura 11).

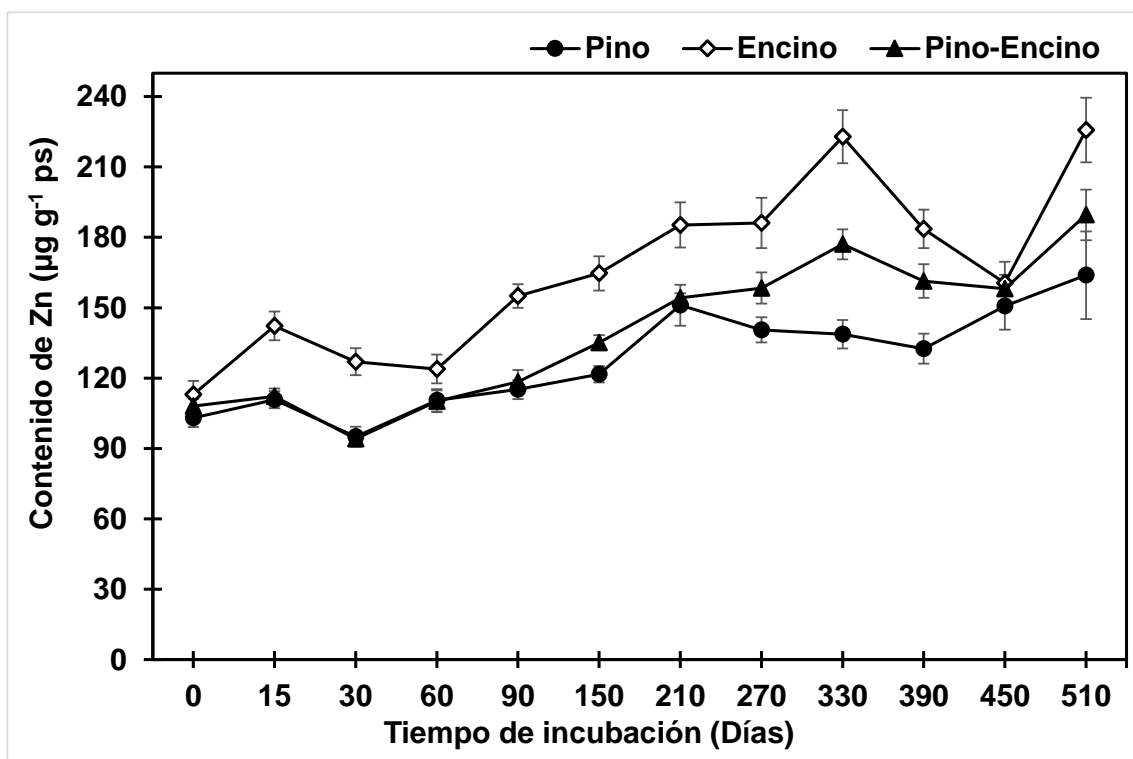


Figura 11. Contenido de Zn en la hojarasca a diferentes tiempos de incubación en tres tipos de bosques durante el proceso de descomposición. Los valores graficados corresponden a la media ($n=10$) \pm error estándar.

6. DISCUSIÓN

En el presente estudio se encontraron diferencias significativas entre los sitios a estudiar con el contenido de nutrientes siendo el sitio de Pino-Encino el que mayor cantidad de nutrientes aportó al suelo en comparación con los sitios de Pino y Encino. Estas diferencias concuerdan con lo encontrado por Ghasemi *et al.* (2016) en un estudio realizado en abeto y *Fagus orientalis* donde encontraron que al combinar la hojarasca de ambas especies éstas aportan más cantidad de nutrientes al suelo, que al encontrarse solas. De igual manera, Wang (2008), menciona que incorporar coníferas con especies de hoja ancha contribuye a un mayor retorno de nutrientes en el ecosistema.

Calcio (Ca)

El macronutriente calcio durante la descomposición de la hojarasca presentó una liberación en Pino del 64% en Encino de 62% y Pino-Encino de 65% resultados similares a lo encontrado por Rustad (1994) en la hojarasca de abeto rojo donde registró una liberación del 50% de este elemento. De igual manera, Moro y Domingo (1996), registraron que la hojarasca de *Adenocarpus decorticans* en la Sierra de los Filabres (Almería), aporta el 68% de calcio al suelo, Castellanos y León (2011) reportaron una lenta liberación de Ca en la hojarasca de *Acacia mangium*. Sin embargo, los resultados del presente trabajo difieren de los resultados obtenidos por Farfán (2007), en la hojarasca de *Pinus oocarpa* donde Ca no presentó liberación. Sin embargo, el mismo autor registra una liberación del 34.3% y 28.5% de Ca en la hojarasca de *Cordia alliodora* y *Eucalyptus grandis*, respectivamente.

Magnesio (Mg)

Magnesio presentó un patrón de lenta liberación en la hojarasca de Pino, Encino y Pino-Encino con los siguientes valores 37%, 33% y 44%, respectivamente,

coincidiendo con lo encontrado por Maine y Barrera *et al.* (2004), reporta una liberación de 40% en la hojarasca de *Austrocedrus chilensis*. De igual manera, Castellanos y León (2011) observaron una lenta liberación en de Mg en la hojarasca de *Acacia mangium*, mientras que Moro y Domingo (1996) reportan una liberación 96% en *Adenocarpus decorticans*. Rustad (1994), registró un aporte del 80% de Mg al suelo por la hojarasca de abeto rojo. Colín *et al.*, (2018), en un estudio realizado durante dos estaciones del año (invierno y primavera) en la hojarasca del Matorral Espinoso Tamaulipeco reporta un patrón de lenta liberación de 9% y 12%, respectivamente.

Potasio (K)

Durante el proceso de descomposición de la hojarasca, el potasio tendió a liberar el 12% en Pino, 62% en Encino y 53% en Pino-Encino, tendencia similar a un estudio realizado en la hojarasca de *C. alliodora*, *E. grandis* y *Pinus oocarpa*, donde registraron los siguientes valores de liberación 93.6%, 89.3% y 64.5%, respectivamente (Farfán, 2007). Barrera *et al.* (2004) observó una liberación de K (60%) en la hojarasca de *Austrocedrus chilensis*. De igual manera, Lisanework y Michelsen (1993), reportan que en la hojarasca de *Cupressus lusitanica*, *Eucalyptus globulus*, *Juniperus procera* y en la de un bosque adyacente de *Juniperus-olea-pocarpus*, el elemento potasio presentó una rápida liberación, situación semejante a lo reportado por Alvarez *et al.* (2008) en *Quercus robur*, *Pinus radiata* y *Eucalyptus nitens*, donde el K se liberó de manera rápida. Attiwill, 1968; Tukey, 1970; Parker, 1983 atribuyen que la rapidez liberación de Potasio es dada a su carácter móvil, resultado de no estar incluido a las estructuras orgánicas, sino en forma libre, por lo cual es fácilmente de remover.

Cobre (Cu)

El micronutriente Cu en la hojarasca de Pino, presentó un incremento del 33% con respecto al valor inicial, caso contrario a lo ocurrido en la hojarasca de Encino y Pino-Encino donde se encontró una disminución de 30 y 44% de Cu, respectivamente. Estos resultados fueron similares al estudio realizado durante invierno y primavera en la hojarasca del Matorral Espinoso Tamaulipeco en la que reporta una acumulación 78.8% en la estación de primavera y una liberación de Cu del 28% en la estación de invierno (Colín *et al.* 2018).

Manganeso (Mn)

El Mn en la hojarasca de Pino mostró una acumulación de 33% mientras que en la hojarasca de Encino presentó una liberación del 46% y en Pino-Encino del 38%. Esta situación fue similar a lo reportado por Ghasemi *et al.* (2016), quienes observaron que tanto la hojarasca de *Fagus orientalis* mezclada con la de abeto y la hojarasca solo de abeto tienden a liberar Mn. En tanto, Goya *et al.* (2008), reportan una inmovilización de Mn en *Eucalyptus grandis*. De igual manera, Colín *et al.* (2018), mencionan que en la hojarasca del Matorral Espinoso Tamaulipeco no se presenta liberación de este microelemento.

Fierro (Fe)

El elemento Fe mostró un incremento del 34% en Pino, 191% en Encino y 40% Pino-Encino, resultados que concuerdan con un estudio realizado en *Eucalyptus grandis* donde Goya *et al.* (2008) observaron que el elemento Fe tiende a incrementar a lo largo del proceso de descomposición de la hojarasca. De igual manera, Colín *et al.* (2018) reportan una acumulación de Fe en la hojarasca del Matorral Espinoso Tamaulipeco. Clemens *et al.*, (2002) atribuyen que la tasa de acumulación del Fe en las plantas se ve influenciada por la movilidad y la absorción del suelo y su almacenamiento en las células de las hojas. Por lo que se infiere que las hojas de Encino absorben más Fe que las hojas de Pino.

Zinc (Zn)

El Zn mostró una acumulación durante periodo de estudio del 59% en Pino, de 99% en encino y 75% en Pino-Encino, lo que indica que durante el proceso de descomposición en un periodo de 510 días la hojarasca de Pino, Encino y Pino-Encino no aporta Zn al suelo, situación similar a lo reportado por Colín *et al.* (2018) donde observaron que durante la descomposición la hojarasca del Matorral Espinoso Tamaulipeco no presenta liberación de este micronutriente, por lo tanto no hay un aporte de Zn al suelo.

7. CONCLUSIONES

Los resultados emanados de la prueba estadística muestran diferencias significativas entre los ecosistemas estudiados en su contenido de nutrientes en los diferentes tiempos de incubación, siendo la hojarasca de Pino-Encino la que presentó las tasas más altas de liberación de nutrientes. Por lo cual al combinar las coníferas con vegetación de hoja ancha esta aumenta el reciclaje de nutrientes, lo cual contribuye a mejorar la fertilidad del suelo.

Al final del estudio, la transferencia de los macronutrientes al suelo mostró el orden de $Ca > Mg > K$ para el bosque de Pino, mientras que en los bosques de Encino y Pino-Encino se presentó en el siguiente orden $Ca > K > Mg$.

En el caso de los micronutrientes, el orden de mayor a menor liberación fue $Mn > Cu$ en la hojarasca de Encino y Pino-Encino, en cambio, en Pino ambos elementos presentaron acumulación. Con relación al Fe y Zn, tendieron a presentar acumulación durante todo el periodo experimental en los tres sitios de estudio.

8. LITERATURA CITADA

- Aerts, R. 1996. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: Are there general patterns?. *Journal of Ecology*, 84(4): 597-608.
- Aerts, R. 1997. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems, a triangular relationship. *Oikos*, 79(3): 439-449.
- Aerts, R. and Chapin, F. 2000. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. In a H. Fitter & D.G. Raffaelli (eds). *Advances in Ecological Research Academic*, 30(1): 1-67.
- Altieri, M. 1997. Agroecología. Bases Científicas para una Agricultura Sustentable. Ed. CIED. Lima.
- Alvarez, E., Fernández, M.L., Torrado, M. and Fernández, M.J. 2008. Dynamics of macronutrients during the first stages of litter decomposition from forest species in a temperate area (Galicia, NW Spain). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 80(3): 243-256.
- AOAC. 1990. Official Methods of Analysis (15th Ed.). Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC. 832 pp.
- Arce, U.C. 2007. Dinámica de descomposición y mineralización de macro nutrientes en hojarasca de plantaciones de *Ormosia coccinea* (Aubl.) Jackson, " Huayruro" y *Vochysia lomatophylla* Standl, " Quillosisa", Iquitos, Loreto, Perú. *Folia Amozónica*, 16(1-2): 101-106.
- Aristizábal-Loaiza M. 2003 Fisiología vegetal en Colombia ed. Artes Gráficas Tizan ISBN: 9583354171 v. 1 p.306.
- Attwill, P.M. 1968. The loss of elements from decomposing litter. *Ecology*. 49(1), 142-145.
- Barrera, M.D., Frangi, J.L., Ferrando, J.J. y Goya, J.F. 2004. Descomposición del mantillo y liberación foliar neta de nutrientes de *Austrocedrus chilensis* (D.

- Don) Pic. Serm. Et Bizzarri en El Bolsón, Río Negro. *Ecología Austral*, 14(1): 99-112.
- Berg, B. 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management*, 133(2): 13-22.
- Bergmann, W. 1994. Nutritional Disorders of Plants-development, Visual and Analytical Diagnosis. Gustav Fischer Verlag, Germany.
- Bernhard, R.F, Loumeto, J.J. and Laclau, J.P. 2001. Litterfall, litter quality and decomposition changes with Eucalypt hybrids and plantation age: In: Effect of Exotic Tree Plantations on Plant Diversity and Biological Soil Fertility in the Congo Savanna: With Special Reference to Eucalypts. Bernhard-Reversat F (Eds.), *Center for International Forestry Research Bogor, Indonesia*. pp. 23-29.
- Bertsch, F. 1998. La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 174 p.
- Bocock, K.L. and Gilbert, J.W. 1957. The disappearance of leaf litter under different woodland conditions. *Plant and Soil*, 9(1): 179-185.
- Bosco, J., Blanco, J.A. y Castillo, F.J. 2004. Gestión forestal y ciclos de nutrientes en el marco del cambio global. En: Valladares, F. 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Páginas 479-506. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid.
- 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., Xu, Z.H., Simpson, J.A., and Safigna, P.G. 1998. Some nutrient dynamics associated with litterfall and litter decomposition in hoop pine plantations of southeast Queensland, Australia. *Forest Ecology and Management*, 110(1): 343-352.

- Cakmak, I. and Kirkby, E.A. 2008. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiologia plantarum*, 133(4): 692-704.
- Caldentey, J., Ibarra, M. and Hernández, J. 2001. Litter fluxes and decomposition in *Nothofagus pumilio* stands in the region of Magallanes, Chile. *Forest Ecology and Management*, 148(1): 45-157.
- Cardona, C. y Sadeghian S. 2005. Ciclo de nutrientes y actividad microbiana en cafetales a libre exposición solar y con sombrío de *Inga* spp. *Cenicafé*, 56(2): 127-141.
- Castellanos, B.J. y León, P.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.
- Chapin, F.S., Matson, P.A. and Mooney, H.A. 2002. Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer, New York.
- Cherney, D.J.R. 2000. Characterization of forages by chemical analysis. In: Givens, D.I., E. Owen, R.F.E. Axford, H.M. Omed. eds. Forage evaluation in ruminant nutrition, pp. 281-300. CAB International, Wallingford.
- Chiu, T.F. and Bould, C. 1977. Sand-culture studies on the calcium nutrition of young apple trees with particular reference to bitter pit. *Journal of Horticultural Science*, 52(1): 19-28.
- Clemens, S., Bloss, T., Vess, C., Neumann, D., Nies, D.H. y Zur, N.U. (2002). A transporter in the endoplasmic reticulum of *Schizosaccharomyces pombe* cells mediates zinc storage and differentially affects transition metal tolerance. *Journal Biological Chemistry*, 277(1):18215-18221.
- Colín, V.C.I., Domínguez, G.T.G., González, R.H., Cantú, S.I. y Colín, J.G. 2018. Dinámica de nutrientes durante el proceso de degradación de la hojarasca en el Matorral Espinoso Tamaulipeco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(49): 87-109.

- Coûteaux, M.M., Bottner, P. and Berg, B. 1995. Litter decomposition, climate and litter quality. *Trends in Ecology and Evolution*, 10(2): 63-66.
- Cowan, J.A. 2002. Química estructural y catalítica de enzimas dependientes del magnesio. *Biometals*, 15(1): 225-235.
- Cuevas, E. and Medina, E. 199. The role of nutrient cycling in the conservation of soil fertility in tropical forested ecosystems. In *Ecology today: an anthology of contemporary ecological research*: International Scientific Publications. New Delhi, India. pp. 263-278.
- Dalla, T.F. and Jokela, E. 1994. Needlefall returns and resorption rates of nutrients in young intensively managed slash and loblolly pine stands. *Forest Science*, 40(4): 650-662.
- Ducic, T. and Polle, A. 2005. Transport and detoxification of manganese and copper in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1): 103-112.
- Dziadowiec, H. 1987. The decomposition of plant litter fall in an oak-linden-hornbeam forest and an oak-pine mixed forest of the Bialowieza National Park. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 56(1): 169-185.
- Farfán, V.F. y Urrego, J.B. 2007. Descomposición de la hojarasca y liberación de nutrimentos de *Coffea arabica*, *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis*, en sistemas agroforestales con café. *Cenicafé*, 58(1): 20-39.
- Fernández, M.T. 2007. Fosforo: amigo o enemigo. *ICIDCA*, 2(1): 51-57
- Finér, L. 1996. Variation in the amount and quality of litterfall in a *Pinus sylvestris* L. stands growing on a bog. *Forest Ecology and Management*, 80(1): 1-11.
- Gallardo, J.F., Martín, A., Moreno, G. and Santa Regina, I. 1998. Nutrient cycling in deciduous forest ecosystems of the Sierra de Gata Mountains: nutrient supplies to the soil through both litter and throughfall. *Annales des Sciences Forestières*, 55(77): 771-784.
- Gelvez-Pardo, I.M. 2008. Efecto del uso del suelo sobre la descomposición de hojarasca y grupos funcionales microbianos (Cuenca del río la vieja,

- Quindío). Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ciencias. 79 pp.
- Ghasemi, A.F., Hosseini, V. and Poureza, M. 2016. Nutrient dynamics and early decomposition rates of *Picea abies* needles in combination with *Fagus orientalis* leaf litter in an exogenous ecosystem. *Annals of Forest Research*, 59(1): 21-32.
- González, R.H., Cantú, S.I., Ramírez, L.R.G., Gómez, M.M.V., Domínguez, G.T.G., Bravo, G.J. and Maiti, R.K. 2008. Spatial and seasonal litterfall deposition pattern in the Tamaulipan thornscrub, Northeastern Mexico. *International Journal of Agriculture Environment and Biotechnology*, 1(1): 177-181.
- Goya, J.F., Frangia, J.L., Pérez, C. and Dalla, F. 2008. Decomposition and nutrient release from leaf litter in *Eucalyptus grandis* plantations on three different soils in Entre Ríos, Argentina. *Bosque*, 29(3): 217-226.
- Heal, O.W., Anderson, J.M. and Swift, M.J. 1997. Plant litter quality and decomposition: an historical overview. In: Driven by nature: plant litter quality and decomposition. Cadisch, G. and Giller, K.E., eds. Wallingford, Oxon: CAB International, pp. 3-30.
- Hernandez, M.I., Santa Regina, I. and Gallardo, J.F. 1995. Dynamics of bioelements during leaf decomposition in three forest ecosystems of semiarid climate in the Duero Basin. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 9(4): 437-455.
- Huber, A. y Oyarzún, C. 1983. Producción de hojarasca y sus relaciones con factores meteorológico en un bosque de *Pinus radiata*. *Bosque*, 1(5): 1-11.
- Jokela, E.J. and Martin, T.A. 2000. Effects on ontogeny and soil nutrient supply on production, allocation, and leaf area efficiency in loblolly and slash pine stand. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(10): 1511-1524.

- Jordan, C.F. 1985. Nutrient Cycling in Tropical Forest Ecosystems. Chichester, UK. Wiley & Sons.
- Kavvadias, V.A., Alifragis, D., Tsiontsis, A., Brofas, G. and Stamatelos, G. 2001. Litterfall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece. *Forest Ecology and Management*, 144(1): 113-127.
- Killingbeck, K. 1996. Nutrients in senesced leaves: key to the search for potential resorption and resorption proficiency. *Ecology*, 77(6): 1716-1727.
- Kochy, M. and Wilson, S. 1997. Litter decomposition and nitrogen dynamics in aspen forest and mixed-grass prairie. *Ecology*, 78(3): 732-739.
- Landsberg, J. and Gower, S. 1997. Applications of Physiological Ecology to Forest Management. Academic Press. San Diego, California. 364 pp.
- Lara, A., Little, C., Urrutia, R., McPhee, J., Álvarez, G.C., Oyarzún, C., Soto, D., Donoso, P., Nahuelhual, L., Pino, M. and Arismendi, I. 2009. Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *Forest Ecology and Management*, 258(4): 415-429.
- León, J.D., Díez, M.C., Castellano, J., Osorio, L.F. y Marín, N. 2008. Grupos funcionales de microorganismos en suelos degradados por minería de aluvión plantados con *Acacia mangium*. *Suelos Ecuatoriales*, 38(1): 75-80.
- Lisanework, N. and Michelsen, A. 1994. Litterfall and nutrient release by decomposition in three plantations compared with a natural forest in the Ethiopian Highland. *Forest Ecology and Management* 65(1):149-164.
- Londoño, A.A., Montoya, G.D.C., León, P.J.D. y González, H.M.I. 2007. Ciclaje y pérdida de nutrientes del suelo en bosques Altoandinos de Antioquia, Colombia. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 60(1): 3717-3734.

- Lora S., R. 1994. Factores que afectan la disponibilidad de nutrientes para las plantas. En: Fertilidad de suelos. Silva M., F. (ed.). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, p.29-56.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London.
- Marschner, H. 1998. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, San Diego, 889 p.
- Marschner, H. 2012. La nutrición mineral de Marschner de plantas superiores Prensa Académica, Nueva York.
- Martínez, F.E., Sarmiento, J., Fischer, G. y Jiménez, F. 2008. Efecto de la deficiencia de N, P, K, Ca, Mg y B en componentes de producción y calidad de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Agronomía Colombiana*, 26(3): 389-398.
- Medina, A. 1999. Manejo de la nutrición en el rosal después de la cosecha de San Valentín. En: Mantenimiento de plantas de rosa, curso de actualización profesional. Lee, R. (ed.). Centro de Investigaciones y asesorías agroindustriales Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Chía, pp. 31-48.
- Meentemeyer V. 1984. The geography of organic decomposition rates. *Annals of the Association of American Geographers*, 74(4): 551-560.
- Monge, E., Val, J., Sanz, M., Blanco, A. and Montañés, L.1994. Calcium as a nutrient for plants. The bitter pit in apple. *Estación Experimental de Aula Dei (Zaragoza)*, 21(3): 189-201.
- Montagnini, F. y Jordan, C. 2002. Reciclaje de nutrimentos. En: Guariguata, M.R., y Kattan, G.H. (Eds), *Ecología y conservación de bosques lluviosos neotropicales*. Cartago, Costa Rica. pp. 167-190.
- Montagnini, F., and Muñiz, M.N. 1999. Vegetation and soils of tidal floodplains of the Amazon estuary: a comparison of várzea and terra firme forests in Pará, Brazil. *Journal of Tropical Forest Science*, 11(2): 420-437.

- Moro, M. J. y Domingo, F. 1996. Descomposición de hojarasca en la leguminosa *Adenocarpus decorticans*: pérdida de peso y dinámica de los nutrientes en la Sierra de los Filabres (Almería). *Revista Mediterránea Serie de Estudios Biológicos*, 2(15): 13-19.
- Moroni, M.T. and Smethurst, P.J. 2003. Litterfall, nitrogen and phosphorous fluxes in two Tasmanian *Eucalyptus nitens* plantations. *Tasforests*, 14(1): 53-63.
- Nambiar, E.K.S. and Fife, D.N. 1991. Nutrient retranslocation in temperate conifers. *Tree Physiology*, 9(2): 185-207.
- Ott, L. 1993. An introduction to statistical methods and data analysis. 2nd Edn. Duxbury Press. Boston, Massachusetts, USA. 775 pp.
- Ovington, J.D. 1962. Quantitative ecology and the Woodland ecosystems concept. *Advances in Ecological Research*, 1(1): 103-192.
- Palma, R.M., Prause, J., Fontanive, A.V. and Jimenez, M.P. 1998. Litterfall and litter decomposition in a forest of the Parque Chaqueño Argentino. *Forest Ecology and Management*, 106(2-3): 205-210.
- Pandey, R.R., Sharma, G., Tripathi, S.K. y Singh, A.K. 2007. Litterfall, litter decomposition and nutrient dynamics in a subtropical natural oak forest and managed plantation in northeastern India. *Forest Ecology and Management*, 240(1): 96-104.
- Parker, G.G. (1983). Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Advances in Ecological Research*. 13(1), 57-133.
- Pavón, N.P., Briones, O. and Flores, R.J. 2005. Litterfall production and nitrogen content in an intertropical semi-arid Mexican scrub. *Journal of Arid Environments*, 60(1): 1-13.
- Prause, J., Arce, G. y Angeloni, P.N. 2003a. Variación mensual en el aporte de hojas de cuatro especies forestales nativas del Parque Chaqueño Húmedo (Argentina). *Quebracho*, 10(1): 39-45.

- Prause, J., de Lifschitz, A.P. y Toledo, D.M. 2003b. Dinámica de la mineralización de N, P, y K en hojas de *Schinopsis balansae* Engl. sobre un suelo forestal del Parque Chaqueño Húmedo. *Quebracho*, 10(1): 46-52.
- Prause, J., Palma R.M. and Adámoli, J.M. 1997. Aporte de las principales especies forestales a la dinámica de la materia orgánica y de los nutrientes en un monte nativo del parque chaqueño húmedo. Tesis. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados, Magister Scientiae área Ciencias del Suelo, Buenos Aires Argentina. 205 pp.
- Pritchett, W.L. 1991. Suelos Forestales. Propiedades, Conservación y Mejoramiento. Editorial LIMUSA. México. 643 pp.
- Quinto, M., Ramos, P. y Abadia, B. 2007. Cuantificación de la caída de hojarasca como medida de productividad primaria neta en un bosque pluvial tropical en Salero, Choco, Colombia. *Institucional Universitaria Tecnológica del Choco*, 26(1): 28-41.
- Ramírez L.R.G. y González, R.H. 2017. Minerales en el forraje. Editorial Universitaria, Universidad Autónoma de Nuevo León. Primera edición. Monterrey, N.L., México, 360 pp.
- Razeto, B. 1993. La nutrición mineral de los frutales. Deficiencias y excesos. SOQUIMICH, Chile. 105 pp.
- Ribeiro, C., Madeira, M. and Araújo, M.C. 2002. Decomposition and nutrient release from leaf litter of *Eucalyptus globulus* grown under different water and nutrient regimes. *Forest Ecology and Management*, 171(1-2): 31-41.
- Rodríguez, S.M. y Flórez, R.V. 2004. Elementos esenciales y beneficiosos. *Nociones Básicas del Ferti-riego*, 290(1): 25-36.
- Rojas, R.J.J. (2015). Fertilidad de suelos en plantaciones forestales del trópico colombiano. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Facultad Ciencias Medellín, Colombia. Escuela para Graduados, Magister en Ciencias, Geomorfología y Suelos, Medellín, Colombia. 81 pp.

- Rustad, L.E. 1994. Element dynamics along a decay continuum in a red spruce ecosystem in Maine, USA. *Ecology*, 75(4): 867-879.
- Salisbury, F.B y Ross, C.W. 1991. Fisiología Vegetal. México D.F. México. Grupo Editorial Iberoamérica. México, D.F. México.
- Salisbury, F.B. and Ross, C.W. 1992. Plant Physiology. 4th. Ed. Wadsworth Publishing, Belmont, 662 p.
- Sánchez, S., Crespo, G., Hernández, M. y García, Y. 2008. Factores bióticos y abióticos que influyen en la descomposición de la hojarasca de pastizales. *Pastos y Forrajes*, 31(2): 13-99.
- Santa Regina, I. and Tarazona, T. 2001. Nutrient cycling in a natural beech forest and adjacent planted pine in northern Spain. *Forestry*, 74(1): 11-28.
- Santa Regina, I. y Gallardo, J.F. 1989. Ciclos biogeoquímicos en bosques de la Sierra de Bejar (Provincia de Salamanca). *Revista Options Méditerranéennes Série Séminaire*, 3(1): 147-149.
- Sariyildiz, T., Tüfekçioğlu, A. and Küçük, M. 2005. Comparison of decomposition rates of beech (*Fagus orientalis* Lipsky) and spruce (*Picea orientalis* (L.) Link) litter in pure and mixed stands of both species in Artvin, Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 29(1): 429-438.
- Schlesinger, W.H. 2000. *Biogeoquímica: un análisis del cambio global*. Ariel Ciencia, Barcelona, España.
- Senbayram, M., Gransee, A., Wahle, V. and Thiel, H. 2015. Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant-soil continuum. *Crop Pasture Science*, 66(2): 1219-1229.
- Shaul, O. 2002. Magnesio transporte y función en las plantas: la punta del iceberg. *Biometals*, 15(1): 309-323.
- Steel, R.G.D., Torrie, J.H. 1980. Principles and procedures of statistics. A biometrical approach, (2nd Edn). New York, NY: McGraw-Hill Book Company. 633 p.

- Swift, M. J., and Anderson, J.M. 1989. Decomposition. In: H. Lieth, M.J.A. Werger, (Eds.), Tropical rain forest ecosystems, biogeographical and ecological studies. Ecosystems of the World 14A. New York, Elsevier Science. Pp 547-569.
- Thaiutsa, B. y Granger, O. 1979. El clima y la descomposición de la hojarasca en el bosque tropical. *Unasyuva*, 31(126): 121-129.
- Tukey, H.B. Jr. (1970). The leaching of substances from plants. *Annual review of plant physiology*. 21(1), 305-324.
- Uchida, R., 2000. Essential nutrients for plant growth: nutrient functions and deficiency symptoms. In: Silva, J.A., Uchida, R. (Eds), Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils, Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa.
- Villavicencio, E.L. 2012. Producción, pérdida de peso y tasas de descomposición de hojarasca en cafetales tradicional y rústico, y selva mediana, en Veracruz, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(2): 159-173.
- Vitousek, P.M. and Sanford, R.L. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forest. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 17(1): 137-167.
- Wang, Q., Wang, S. and Huang, Y. 2008. Comparisons of litterfall, litter decomposition and nutrient return in a monoculture *Cunninghamia lanceolata* and a mixed stand in southern China. *Forest Ecology and Management*, 255(1): 1210-1218.
- Welch, R.M. 1995. Micronutrient nutrition of plants. *Critical Reviews in Plant Science*, 14(1): 49- 82.
- Woerner, P.M. 1989. Métodos químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas. Facultad de Ciencias Forestales, UANL, Linares, N.L., México. 104 p.

- Xuluc-Tolosa, F.J., Vester, H.F.M., Ramírez-Marcial, N., Castellanos-Albores, J. and Lawrence, D. 2003. Leaf litter decomposition of tree species in three successional phases of tropical dry secondary forest in Campeche, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 174(1-3): 401–412.
- Yang, Y.S., Guo, J.F., Chen, G.S., Xie, J.S., Cai, L.P. and Lin, P. 2004. Litterfall, nutrient return, and leaf-litter decomposition in four plantations compared with a natural forest in subtropical China. *Annals of Forest Science*, 61(1): 465-476.
- Yruela, I. 2005. Copper in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1): 145-156.
- Zaldívar, J.A., Herrera, S.J., Coronado, M.C. y Alonzo, P.D. 2004. Estructura y productividad de los manglares en la reserva de biosfera Río Celestún, Yucatán, México. *Madera y Bosques, Número especial*, 2(1): 25-35.
- Zhou, G., Guan, L., Wei, X., Tang, X., Liu, S., Liu, J., Zhang, D. and Yan, J. 2008. Factors influencing leaf litter decomposition: an intersite decomposition experiment across China. *Plant Soil*, 31(1): 61-72.