



Redistribución de la precipitación y aporte de nutrimentos en *Pinus cooperi* C.E. Blanco

Rainfall redistribution and nutrient input in *Pinus cooperi* C.E. Blanco

Silvia Janeth Béjar Pulido¹, Israel Cantú Silva^{1*}, Tilo Gustavo Domínguez Gómez², Humberto González Rodríguez¹, José Guadalupe Marmolejo Monciváis¹, María Inés Yáñez Díaz¹ y Erik Orlando Luna Robles¹

Abstract:

Precipitation is one of the most important forms of nutrient input to forest ecosystems; it enters the soil through redistribution pathways: Gross rainfall (*Pi*), Throughfall (*Pd*) and Stemflow (*Ef*). 42 events were evaluated in which the volumes of rainfall were recorded, as well as chemical composition: pH, electric conductivity, macro and micronutrients (Ca, Na, Mg, K, Zn, Mn, Fe and Cu). The objective of the present investigation was to determine the total deposition, incorporation and extraction of nutrients through *Pi*, *Pd* and *Ef*, in addition to the precipitation/deposition relation, to determine the differences in nutrients concentration, a comparison test was applied among the routes already indicated, under a vegetation cover of *Pinus cooperi*. Ca recorded the highest deposition and incorporation, with 42.89 and 21.74 kg ha⁻¹ respectively. Cu showed the lowest input and accumulated 21.16 and 16.34 g ha⁻¹. The rest of the nutrients presented a behavior from highest to lowest for *Pd*: Ca > Na > K > Mg > Mn > Fe > Zn > Cu, *Pi*: Ca > Na > K > Mg > Mn > Zn > Fe > Cu and for *Sf*: Ca > K > Na > Mg > Mn > Fe > Zn > Cu. This behavior can be associated with the deposition of solid particles on foliage surfaces and branches, phenology, as well as morphological and physiological traits of the species, as well as rainfall chemistry and dry days between rainfall events.

Key words: Nutrient input, nutrient deposition, macronutrients, micronutrients, *Pinus cooperi* C.E. Blanco, precipitation.

Resumen:

La precipitación es una de las formas más importantes de entrada de nutrimentos a los ecosistemas forestales; ingresa al suelo mediante las vías de redistribución: Precipitación incidente (*Pi*), Precipitación directa (*Pd*) y Esguerrimiento fustal (*Ef*). Se evaluaron 42 eventos en los cuales se registraron los volúmenes de lluvia, así como su composición química: pH, conductividad eléctrica, deposición de macro y micronutrientos (Ca, Na, Mg, K, Zn, Mn, Fe y Cu). El objetivo de la presente investigación fue determinar la deposición total, incorporación y remoción de nutrimentos vía *Pi*, *Pd* y *Ef*, así como la relación precipitación/deposición, para determinar diferencias en la concentración de nutrimentos mediante la prueba no paramétrica de *Kruskal-Wallis* entre las vías ya señaladas, bajo la cubierta vegetal de *Pinus cooperi*. Ca fue el más importante, con 42.89 y 21.74 kg ha⁻¹, respectivamente. Cu registró el menor aporte y acumuló 21.16 y 16.34 g ha⁻¹. El resto de los nutrimentos presentaron comportamiento de mayor a menor en *Pd*: Ca > Na > K > Mg > Mn > Fe > Zn > Cu, *Pi*: Ca > Na > K > Mg > Mn > Zn > Fe > Cu y para *Ef*: Ca > K > Na > Mg > Mn > Fe > Zn > Cu. Este patrón se puede asociar con la deposición de partículas sólidas en el dosel, la fenología, la morfología y la fisiología de la especie, así como a la composición química de la lluvia y días secos entre eventos de precipitación.

Palabras clave: Aporte de nutrimentos, deposición de nutrimentos, macronutrientos, micronutrientos, *Pinus cooperi* C.E. Blanco, precipitación.

Fecha de recepción/Reception date: 15 de marzo de 2018

Fecha de aceptación/Acceptance date: 26 de octubre de 2018

¹Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. México. Correo-e: icantu59@gmail.com

²Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico El Salto. México.

Introducción

La fuente principal de agua para un bioma terrestre es la precipitación, tanto su cantidad anual como su distribución a lo largo del año determinan los patrones fenológicos y productivos del ecosistema. La humedad atmosférica, aunque de menor magnitud en términos de lo que representa la cantidad de agua que aporta al sistema, desempeña un papel relevante al controlar las tasas y demandas de evapotranspiración por parte de la vegetación (Romero, 2007).

Parte de la precipitación total en un bosque es retenida por las copas y fuste de los árboles (interceptación del dosel), y se reintegra a la atmósfera mediante la evaporación. Del total de agua que alcanza la superficie del suelo, una fracción proviene del goteo de las hojas o directamente a través del dosel (precipitación directa); el resto llega al suelo a través de la superficie de los fustes (escurrimiento fustal). Estos dos flujos son de gran importancia en la cuantificación del balance de nutrimentos en los ecosistemas. Sin embargo, existen diferencias tanto en la cantidad de agua como en la concentración de nutrimentos entre ambos (Ward y Robinson, 1990; Huber y Oyarzun, 1992; Hanchi y Rapp, 1997).

El agua que se deposita sobre la cubierta vegetal se enriquece en cuanto a materia orgánica y elementos minerales como producto de los exudados de las hojas y del fuste del árbol. Además, las partículas atmosféricas retenidas y acumuladas son arrastradas por el agua y finalmente quedan en el suelo, lo que genera condiciones más favorables para las plantas. La cantidad de deposición de nutrimentos depende del tipo de dosel o de las especies, la arquitectura y forma del dosel (fuste, hojas y ramas), composición química y estructura del árbol. La magnitud de la retención e incorporación de nutrimentos dentro de un ecosistema está estrechamente relacionada con la abundancia de la precipitación (Santa *et al.*, 1989; Andrade *et al.*, 1995; Xu *et al.*, 2001; Xu *et al.*, 2005; Nie *et al.*, 2007). En este sentido, Burch *et al.* (1996) determinaron que la mayor concentración de nutrimentos es lavada durante los primeros 5 mm de lluvia.

La presente investigación tuvo por objeto determinar el aporte de nutrimentos en *Pinus cooperi* C. E. Blanco, especie de importancia ecológica, representativa de El Salto, Durango, y una de las principales bajo aprovechamiento forestal. Dicho conocimiento contribuye a la recuperación de suelos degradados. mediante programas de reforestación en los que la selección de especies se haga a partir de criterios como la información que se generó en la presente investigación, cuya relevancia radica en que registra datos relativos a la incorporación o remoción, vía precipitación, de nutrimentos en un ecosistema forestal, al considerar aspectos atmosféricos y biológicos (fisiológicos y morfológicos) que pueden influir en la presencia de esta especie, en particular, en los bosques mexicanos en los que se distribuye de manera natural.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio pertenece al Instituto Tecnológico El Salto y se ubica en la Sierra Madre Occidental, en el municipio El Salto en Durango (ITES), (23°47'07.08" N y 105°22'05.12" O), a una altitud de 2 500 m. La temperatura media del mes más frío es de 3 °C a 18 °C y la del mes más caliente de 6.5 °C a 22 °C; la precipitación media es de 1 300 mm año⁻¹.

Las especies predominantes son *Pinus cooperi*, *Pinus durangensis* Ehren, *Pinus leiophylla* Schl. & Cham., *Pinus teocote* Schiede ex Schltldl. y *Pinus ayacahuite* Ehren, asociados a bosque de pino-encino. Los tipos de suelos en el lugar son: Regosol, Fluvisol y Cambisol; someros y pedregosos (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007; Nájera *et al.*, 2011).

El registro de los 42 eventos de precipitación se realizó en el periodo de lluvias de la región, correspondiente a junio-septiembre de 2016. Cada uno de ellos es el periodo de precipitación que consiste en lluvias, lloviznas o chubascos, relativamente continuos, separados del anterior y posterior por un lapso seco de una duración mínima de 8 horas (Yáñez *et al.*, 2014).

Componentes de la precipitación

La metodología empleada para la medición de cada vía de redistribución de la precipitación se basó en la experiencia de Cantú y González (2002):

Precipitación incidente. Se utilizaron canaletas de PVC de 1 000 cm² (10 cm de ancho × 100 cm de largo) conectadas por medio de mangueras a recipientes de 20 L, en las que se recolectó el agua de lluvia. Se instalaron cuatro canaletas a 1.0 m sobre la superficie del suelo en una área abierta sin árboles, colindante a la parcela experimental. Las canaletas se cubrieron con una malla para evitar la obstrucción con hojarasca e insectos del flujo del agua hacia los botes.

Precipitación directa. Se seleccionó una parcela (20 m × 10 m) dentro de la cubierta vegetal por investigar y se utilizó el mismo tipo de canaletas descritas para recolectar el agua de lluvia que pasó a través del dosel; se instalaron al azar a 1.0 m sobre la superficie del suelo de forma fija por debajo del dosel de un árbol. Cada canaleta fue conectada a un recipiente de plástico de 20 L y se le cubrió con una malla protectora para evitar contaminación por hojarasca e insectos. No se les removió durante todo el período de estudio.

Escurrimiento fustal. Se eligieron cuatro árboles al azar y se emplearon mangueras plástico acerada de 3 cm de diámetro, con perforaciones de 1.5 cm × 2.5 cm cada 4 cm; se les fijó sobre los fustes a 1.5 m de altura. Este dispositivo funcionó como un recolector de lluvia en espiral.

Por cada evento de lluvia, se tomaron lecturas de la precipitación depositada en los botes de 20 L y muestras de 100 mL en botes de plástico para su posterior resguardo.

Las muestras fueron trasladadas al laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, donde se registró el pH y la conductividad eléctrica (CE, $\mu\text{S cm}^{-1}$). Posteriormente, se les filtró con papel filtro *Whatman* Grado I, para la eliminación de impurezas; y se guardaron a 4 °C para prevenir la pérdida de volumen y disminuir la actividad microbiana.

Determinación de macro y micronutrientos

Para la determinación de los macro y micronutrientos, el material se analizó directamente por medio del espectrofotómetro de absorción atómica (*Varian*, modelo SpectrAA-200) con una curva de concentración de nutrientes de cada uno de los elementos que fueron Mn, Fe, Zn y Cu.

Para medir la concentración de Ca, Na, K y Mg fue necesario realizar diluciones para calcular la concentración del elemento analizado, para lo cual se utilizó una serie de supresores, para evitar la ionización durante el análisis:

- Para sodio (Na) y Calcio (Ca) se prepararon soluciones de 1:5 con un supresor (KCl), cloruro de potasio y se trabajó con dos muestras en una; es decir, 1 mL de muestra + 0.2 ml (KCl) + 3.8 mL de agua destilada.
- Para magnesio (Mg), se prepararon soluciones de 1:5 con cloruro de lantano (LaCl_3); a las muestras (1 mL) se les aplicó una solución de 0.1 mL (LaCl_3) + 3.9 mL de agua destilada.
- Para potasio (K), se prepararon soluciones de 1:5 con (CsCl) cloruro de cesio y a las muestras (1 mL) se les adicionó una solución de 0.1 mL (CsCl) + 3.9 mL de agua destilada.

Las concentraciones obtenidas en el espectrofotómetro de absorción atómica para micro y macronutrientos se registraron en mg L^{-1} para posteriormente convertirlas a g m^{-2} y kg m^{-2} .

La conversión de unidades de la precipitación directa y de la precipitación incidente se calculó con la siguiente ecuación:

$$CC = Ci * \left(\frac{Pp}{1000} \right) * 10$$

Para el cálculo de la concentración de escurrimiento fustal se empleó la siguiente ecuación:

$$CC = Ci * \left(\frac{Pp}{Ac}\right)$$

Donde:

CC = Concentración en g y kg m^{-2}

Ci = Lectura de espectrofotómetro de absorción atómica mg L^{-1}

Pp = Volumen de precipitación (mL)

Ac = Área de la copa (determinada para cada árbol)

En la determinación de Pd y Pi se consideró el área ocupada por la canaleta y para el escurrimiento fustal se empleó el área de la copa, como la superficie receptora de la precipitación.

Deposición total de nutrimentos

Por cada evento, se tomó el promedio de las cuatro lecturas correspondientes a cada muestra recolectada. Para calcular la deposición total, se sumó la totalidad de los 42 eventos de lluvia.

Determinación de la incorporación y remoción de nutrimentos.

El cálculo de la concentración neta de nutrimentos se basó en el mismo principio propuesto por Aboal (1998) y Tobón (2000) para el análisis de la precipitación neta. Para la incorporación de nutrimentos (IN), fue necesario obtener su concentración neta (CNN), mediante la siguiente ecuación (Jiménez *et al.* 2006):

$$CNN = Cn Pd + Cn Ef$$

Donde:

CNN = Concentración neta de nutrimentos

Cn Pd = Concentración neta de la precipitación directa

Cn Ef = Concentración neta del escurrimiento fustal

Con la concentración neta de nutrimentos (*CNN*), se procedió al cálculo de la incorporación (*IN*), por medio de la siguiente ecuación (Jiménez *et al.*, 2006):

$$IN = CNN - Cn Pi$$

Donde:

IN = Incorporación de nutrimentos

CNN = Concentración neta de nutrimentos

Cn Pi = Concentración neta de precipitación incidente

De acuerdo a este último autor, los valores positivos (+) representan incorporación de nutrimentos, mientras que los negativos (-) indican remoción.

Análisis estadísticos

Para determinar la distribución de la deposición de nutrimentos se realizó una prueba de normalidad *Kolmogorov-Smirnov*, con el paquete estadístico SPSS versión 22.0 (IBM, 2013). La distribución de los datos no cumplió el supuesto de normalidad, por lo que se aplicó la prueba no paramétrica de *Kruskal-Wallis* para determinar la igualdad de las medianas.

Se hicieron correlaciones con las que se explica el grado de asociación entre las variables de deposición (macro y micronutrimentos) y el volumen de precipitación.

Resultados y Discusión

Precipitación neta e incidente

La precipitación incidente acumulada anual fue de 963.46 mm, mientras que la precipitación neta fue de 721.66 mm, en 42 eventos analizados. Todos los valores de Pd estuvieron por debajo de la precipitación incidente, lo que indica que al fluir por el dosel y fuste del árbol, esta es retenida por las diferentes estructuras. Las pérdidas por intercepción $I=Pi - (Pd+Ef)$ corresponden alrededor de 25 % del total de la lluvia que llega a la superficie de los árboles.

Se registraron 42 eventos para precipitación directa ($\bar{X} = 17.16$ mm), para precipitación incidente ($\bar{X} = 22.94$ mm) y para escurrimiento fustal 27 ($\bar{X} = 0.025$ mm); en realidad no existe un número de eventos definido para el análisis. Xiao *et al.* (2002) manejaron 33 eventos. Yáñez *et al.* (2014) evaluó 56; mientras que Cantú y González (2001) 53, en un periodo de evaluación de dos años, para un análisis químico de nutrimentos en un bosque de pino-encino.

La mayoría de los eventos presentaron un volumen menor a 40 mm de precipitación incidente (37 casos). En la Figura 1 se aprecia que el evento 31 fue el de mayor valor de la precipitación incidente y la precipitación neta, con 105.13 mm y 64.53 mm, respectivamente.



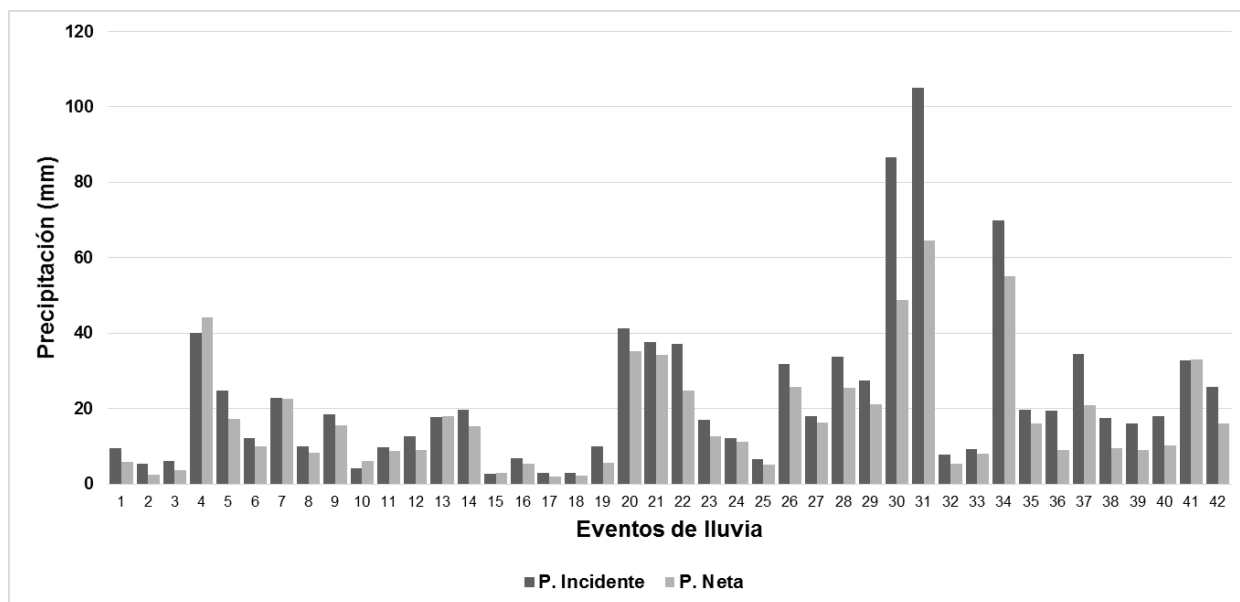


Figura 1. Precipitación (mm) incidente y neta a lo largo de 42 eventos.

Los resultados sugieren que el porte de los individuos influye en el flujo (Cuadro 1), a mayor porte, mayor volumen de agua que llega al suelo (Romero, 2007).

Cuadro 1. Características dasométricas de la parcela evaluada.

Características del sitio	\bar{X}
Diámetro (cm)	29.575
Altura (m)	18.275
Altura de fuste limpio (m)	10.15
Diámetro promedio de copa (m)	6.5
Edad	60.75

Deposición total

Con respecto a la deposición de macronutrientes, Ca tuvo valores de 64.05, 42.78 y 0.12 kg ha⁻¹, para precipitación incidente, directa y escurrimiento fustal, respectivamente. Además, fue el nutriente con la mayor deposición en las tres vías evaluadas, seguida de Na con 31.96, 22.31 y 0.03 kg ha⁻¹; K con 17.57, 12.77 y 0.04 kg ha⁻¹; mientras que, Mg representó al nutriente con la menor deposición, con valores de 12.14, 8.93 y 0.02 kg ha⁻¹. La vía con la mayor acumulación de macronutrientes. fue la de precipitación incidente. La deposición total considerada como la suma de la precipitación directa y escurrimiento fustal para Ca, Na, K y Mg fue de valores de 42.89, 22.35, 12.81 y 8.95 kg ha⁻¹, respectivamente; de los cuales el primero es el valor más destacado.

Romero (2007) registró un aporte de nutrientes en precipitación incidente de Ca, Na, K y Mg de 19.65, 19.24, 6.06 y 2.67 kg ha⁻¹, respectivamente. Un escurrimiento fustal con 5.98, 5.21, 2.24 y 1.22 kg ha⁻¹ con el mismo orden y en precipitación directa solo consigna el valor de Ca, con 22.50 kg ha⁻¹ para *Pinus halepensis* Miller y *Pinus pinea* L. en Alicante, España. Estos resultados coinciden con la mayor concentración de Ca, aunque los valores son distintos y con el mismo orden de deposición de los nutrientes en el presente estudio.

La deposición de los micronutrientes se observa enriquecida por el Mn, con valores de 3 433.56, 2 787.90 y 4.51 g ha⁻¹ para la precipitación incidente, directa y escurrimiento fustal, respectivamente. Las concentraciones de Fe fueron de 347.66, 368.88 y 1.84 g ha⁻¹, mientras que Zn acumuló 465.16, 339.33 y 0.45 g ha⁻¹ y Cu tuvo los valores más bajos para las tres vías evaluadas, con 25.99, 21.13 y 0.03 g ha⁻¹. La deposición total fue dominada por Mn. Los valores de la deposición total fueron 2 792.41, 370.71, 339.78 y 21.16 g ha⁻¹ para Mn, Fe, Zn y Cu.

Concentración neta e incorporación de nutrimentos

El Ca fue el nutrimento con la mayor concentración (*CNN*), mientras que el Mg tuvo la menor. Todos los macronutrimentos evaluados registraron remoción (-) al paso del dosel (Cuadro 2).

El Mg tuvo una recepción de 8.95 kg ha⁻¹ y una incorporación de 5.76 kg ha⁻¹, lo cual indica que durante la circulación de la precipitación en la estructura arbórea se removieron 3.19 kg ha⁻¹.

Cuadro 2. Incorporación total de macronutrimentos en *Pinus cooperi* C.E. Blanco.

Nutrimento	<i>CNN</i> (kg ha ⁻¹)	(+) Inc/(-)Rem	<i>IN</i> Total (kg ha ⁻¹)
Mg	8.95	-3.19	5.76
Na	22.35	-9.61	12.74
Ca	42.89	-21.16	21.74
K	12.81	-4.76	8.05

La absorción o remoción de los nutrimentos de acuerdo a Jiménez *et al.* (2006) presenta dos orígenes, por la deposición seca producida por el viento y por la actividad biológica, que ha sido documentada por diversas fuentes (Santa *et al.*, 1989; Méndez, 1997; Romero, 2007); mientras que la segunda se refiere al movimiento de los nutrimentos en los tejidos vegetales, pero no se cuenta con información que precise la cantidad neta de intercambio de nutrimentos entre planta/precipitación.

Jaramillo (2003) refiere la cantidad de nutrimentos que llegan al suelo (*IN* Total) en el bosque de *Pinus caribea* Morelet para K, Ca y Mg con valores de 127.4, 85.8 y

27.0 kg ha⁻¹, respectivamente; describe una remoción de nutrientes al paso de la copa para los tres minerales, al igual que para el recorrido del fuste incorporaciones de 17.4, 5.4 y 8.5 kg ha⁻¹. Con respecto a los valores obtenidos en el presente estudio, hay diferencias, ya que dicha cantidad se reduce para todos los minerales. al pasar por el dosel de la copa y el fuste.

Como lo indica el Cuadro 2, Mn presentó el mayor valor de *CNN*, y Cu el menor.

Tres de los cuatro micronutrientes evaluados experimentaron remoción, a excepción de Fe, el cual incorporó una pequeña, pero significativa cantidad. En el Cuadro 3 se observa que el resto de los micronutrientes fueron absorbidos por la estructura.

Cuadro 3. Incorporación total de macronutrientes en *Pinus cooperi* C.E. Blanco.

Nutriente	<i>CNN</i> (g ha⁻¹)	(+)Inc/(-)Rem	<i>IN</i> total (g ha⁻¹)
ZN	339.78	-125.39	214.39
Mn	2 792.41	-641.15	2 151.27
Fe	370.71	23.06	393.77
Cu	21.16	-4.82	16.34

La evaluación de los micronutrientes ha sido muy poco documentada y no se le ha dado la importancia correspondiente a estos minerales. En un bosque de *Pinus pseudostrobus*, Cantú y González (2001) evaluaron Cu, Fe, Mn y Zn y calcularon una deposición media anual de 1.0, 8.0, 3.5 y 2.0 g ha⁻¹, respectivamente. Dichos valores son bajos en comparación con los obtenidos en la presente investigación.

Pluviolavado

pH

Durante el periodo de seguimiento de los eventos de lluvia, el pH de la precipitación incidente se mantuvo con valores entre 4.42 a 6.12, una vez que la lluvia fluye sobre el dosel arbóreo, se modifica (precipitación directa), disminuye ligeramente y adquiere valores de 4.21 a 6.27. Cuando la lluvia recorre el fuste del árbol (escurrimiento fustal), se acidifica un poco y alcanza cifras de 3.85 a 6.82 (Figura 2).

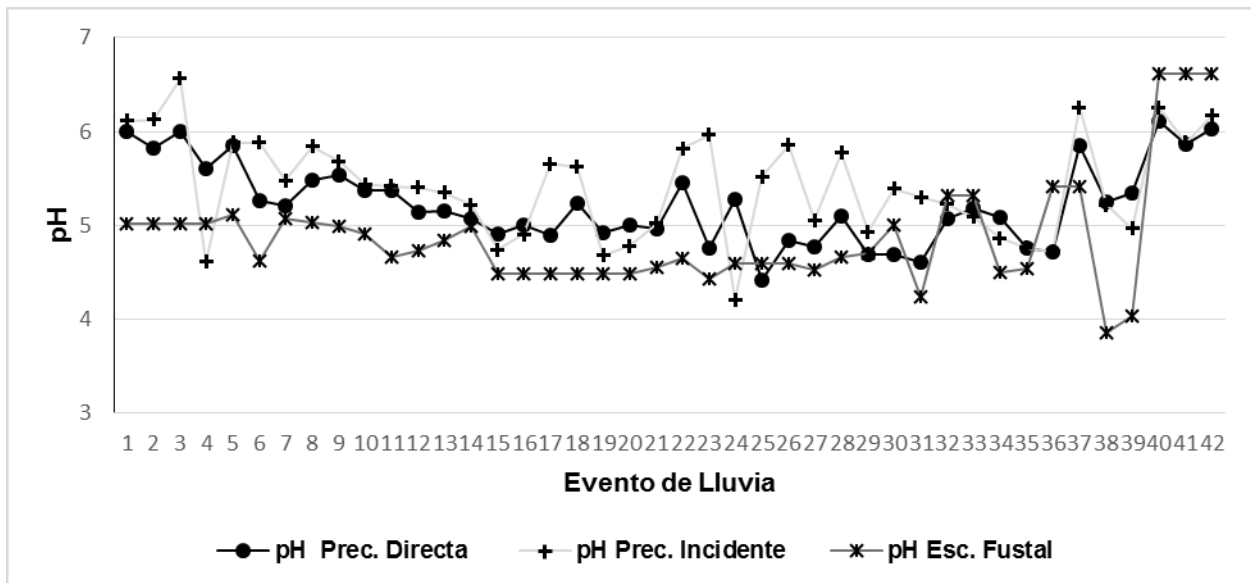


Figura 2. Comportamiento del pH en precipitación directa (*Pd*), precipitación incidente (*Pi*) y escurrimiento fustal (*Ef*) bajo el dosel de *Pinus cooperi* C.E. Blanco.

Abbassian *et al.* (2015), en su evaluación de los nutrientes en precipitación directa en una plantación de *Picea abies* (L.) H. Karst y un bosque de *Fagus orientalis* Lipsky en el norte de Irán, consigna valores de pH entre 7 y 7.5 para ambas especies; y en la precipitación incidente, sus valores son similares (7). De acuerdo a los resultados para *P. cooperi*, las diferencias entre estos son demasiado altas, con una acidez

moderada; mientras que, en el caso de *P. abies* y *F. orientalis* sus valores son considerados como indicadores de una alcalinidad moderada.

El agua que fluye a través de las hojas y del fuste puede ser enriquecida en nutrimentos o presentar una pérdida; por lo tanto, los cambios en la composición química son muy variables y suelen ocurrir de la planta al agua o viceversa. Existe una relación con el lavado de elementos y la absorción directa de los iones presentes en la precipitación (Romero, 2007; Yáñez *et al.*, 2014).

De acuerdo a Yáñez *et al.* (2014), quienes evaluaron las propiedades hidrológicas de un fragmento del Matorral Espinoso Tamaulipeco (MET) en el noreste de México, los valores de pH para la precipitación incidente eran de 7.4; en la precipitación directa disminuyó ligeramente a 7.2 y para el escurrimiento fustal, a 6.9, lo cual indica resultados con la misma tendencia.

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica registró un valor promedio para la precipitación incidente de $15.33 \mu\text{S cm}^{-1}$; mientras que, para la precipitación directa, al pasar por el dosel fue de $12.08 \mu\text{S cm}^{-1}$, lo que indica que hubo una ligera disminución; y para el escurrimiento fustal de $39.06 \mu\text{S cm}^{-1}$, que significa que la lluvia al fluir a través del fuste de *P. cooperi* aumenta la conductividad eléctrica (Figura 3).



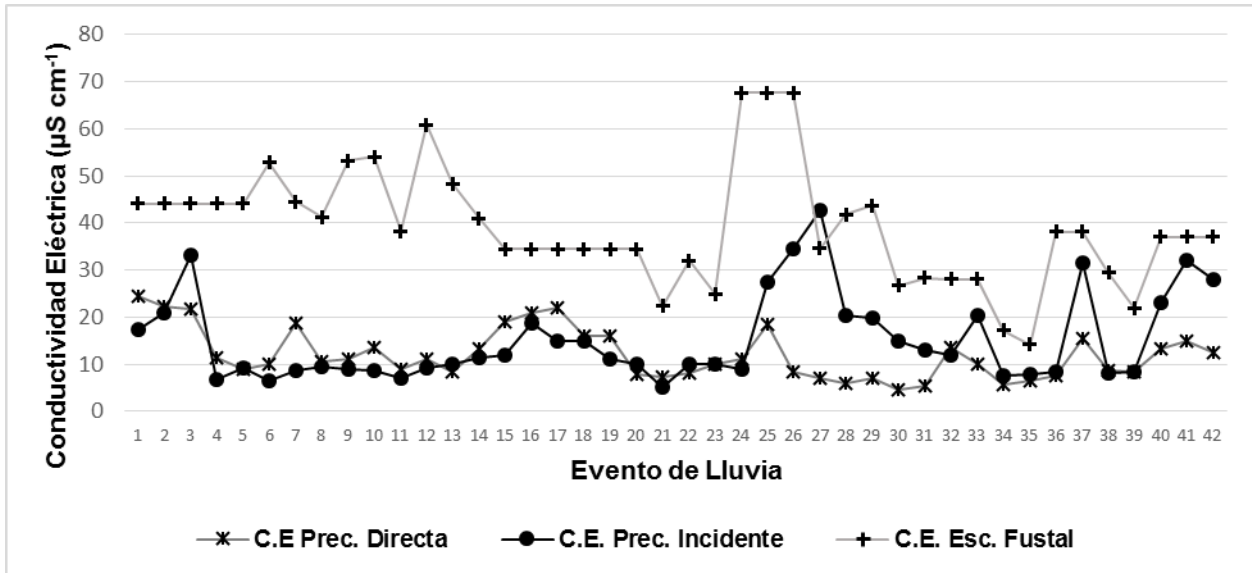


Figura 3. Comportamiento de la conductividad eléctrica en *Pd*, *Pi* y *Ef*, bajo el dosel de *Pinus cooperi* C.E. Blanco.

La conductividad es la medida de la capacidad de una solución acuosa para transmitir una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración, movilidad y valencia, y de la temperatura ambiental. Las soluciones en la mayoría de sus compuestos inorgánicos son relativamente buenos conductores. Por el contrario, moléculas de compuestos orgánicos son pobres de una corriente eléctrica (Wetzel y Likens, 1979).

Los resultados obtenidos muestran que la conductividad eléctrica presentó una tendencia muy similar a la documentada por Yáñez *et al.* (2014) en la evaluación de MET; ahí registraron valores de $71.7 \mu\text{S cm}^{-1}$ para precipitación incidente, $145 \mu\text{S cm}^{-1}$ para la precipitación directa y para el escurrimiento fustal de $126.8 \mu\text{S cm}^{-1}$. Difiere la concentración de iones en el escurrimiento fustal, que para *P. cooperi* es mayor.

García (2018) evaluó 15 eventos de precipitación en la misma asociación vegetal bajo diferentes raleos; llegó a cifras de 100.56 y $187.63 \mu\text{S cm}^{-1}$ para precipitación incidente y directa, respectivamente, que se pueden relacionar al volumen de precipitación y deposición de nutrientes.

Análisis estadístico para la concentración de nutrimentos

Para los macronutrimentos, la mayoría de los eventos presentaron diferencias significativas en las concentraciones. Con base en los datos derivados de la prueba de comparación para las 3 vías de redistribución (*Kruskal-Wallis*), el Na fue el elemento con el mayor número de diferencias, lo que representa 71.43 % (29 eventos), seguido por Mg y K con el mismo número de diferencias equivalente a 69.05 % (29 eventos), y Ca que alcanzó 64.29 % (27 eventos) (Cuadro 4).

El Zn, Mn, Fe y Cu tuvieron diferencias significativas en 23, 23, 24 y 12 eventos de lluvia, que corresponde a 54.76 % para Zn y Mn, 57.76 % y 28.57 % para Fe y Cu.

Cuadro 4. Valores de χ^2 , según la prueba de *Kruskal-Wallis* para los diferentes nutrimentos.

Evento	Mg	Na	Ca	K	Zn	Mn	Fe	Cu
1	0.000 ^{NS}	1.333 ^{NS}	1.333 ^{NS}	1.333 ^{NS}	0.083 ^{NS}	5.333*	5.398*	0.000 ^{NS}
2	2.083 ^{NS}	0.333 ^{NS}	0.083 ^{NS}	1.333 ^{NS}	3.000 ^{NS}	0.333 ^{NS}	0.527 ^{NS}	4.083*
3	2.083 ^{NS}	2.083 ^{NS}	0.083 ^{NS}	0.333 ^{NS}	2.08 ^{NS}	2.083 ^{NS}	5.463*	3.000 ^{NS}
4	7.538*	7.538*	7.423*	9.846**	7.423*	8.346*	7.497*	7.385*
5	7.000*	7.000*	8.018*	6.709*	6.564*	7.000*	7.436*	6.006*
6	5.982*	6.745*	8.018*	7.318*	6.300*	7.318*	5.778 ^{NS}	6.018*
7	7.538*	7.731*	6.000*	9.846**	9.269**	8.000*	8.056*	7.449*
8	9.269**	8.769*	7.731*	8.000*	8.000*	7.538*	5.654 ^{NS}	7.423*

9	7.423*	7.731*	7.538*	9.269**	7.538*	7.731*	7.538*	3.524 ^{NS}
10	7.538*	7.385*	7.423*	8.346*	7.423*	7.423*	7.652*	7.423*
11	9.269**	9.846**	7.423*	7.731*	8.769*	7.538*	7.420*	9.302**
12	7.731*	7.538*	8.346*	9.846**	5.333*	3.000 ^{NS}	8.192*	3.000 ^{NS}
13	8.000*	7.538*	7.731*	8.000*	0.333 ^{NS}	0.000 ^{NS}	9.881**	4.500*
14	7.731*	7.385*	7.731*	7.42*	3.000 ^{NS}	5.333*	4.192 ^{NS}	2.080 ^{NS}
15	0.000 ^{NS}	3.000 ^{NS}	0.083 ^{NS}	2.083 ^{NS}	0.333 ^{NS}	1.333 ^{NS}	1.708 ^{NS}	0.000 ^{NS}
16	0.083 ^{NS}	2.083 ^{NS}	0.000 ^{NS}	0.083 ^{NS}	0.333 ^{NS}	1.333 ^{NS}	1.033 ^{NS}	0.429 ^{NS}
17	1.333 ^{NS}	4.083*	0.000 ^{NS}	0.333 ^{NS}	0.083 ^{NS}	5.333*	2.083 ^{NS}	0.333 ^{NS}
18	4.083*	4.083*	0.333 ^{NS}	5.333*	1.333 ^{NS}	3.000 ^{NS}	2.083 ^{NS}	2.400 ^{NS}
19	0.000 ^{NS}	1.333 ^{NS}	3.000 ^{NS}	5.333*	5.333*	5.333*	0.333 ^{NS}	1.500 ^{NS}
20	7.538*	7.731*	7.423*	7.538*	7.538*	7.731*	7.538*	6.250*
21	9.846**	8.000*	9.846**	8.769*	5.333*	1.333 ^{NS}	8.800*	3.857*
22	7.385*	7.538*	7.538*	7.538*	1.333 ^{NS}	2.083 ^{NS}	7.731*	1.500 ^{NS}
23	8.346*	8.000*	8.000*	7.538*	7.538*	8.000*	7.038*	7.282*
24	2.083 ^{NS}	0.750 ^{NS}	0.750 ^{NS}	2.083 ^{NS}	0.000 ^{NS}	0.000 ^{NS}	0.000 ^{NS}	1.500 ^{NS}
25	0.500 ^{NS}	3.125 ^{NS}	2.000 ^{NS}	0.000 ^{NS}	0.125 ^{NS}	0.000 ^{NS}	0.500 ^{NS}	1.800 ^{NS}
26	8.769*	8.000*	6.182*	7.385*	7.731*	7.538*	7.528*	5.791 ^{NS}
27	7.423*	7.538*	7.385*	7.385*	8.000*	7.423*	5.773 ^{NS}	5.143 ^{NS}

28	8.000*	9.846**	9.846**	7.423*	7.423*	7.538*	9.032**	4.511 ^{NS}
29	8.769*	8.346*	7.423*	7.731*	0.083 ^{NS}	4.083*	8.028*	0.333 ^{NS}
30	7.385*	8.346*	8.346*	8.769*	6.667*	5.667 ^{NS}	7.538*	0.333 ^{NS}
31	7.731*	9.846**	9.846**	8.346*	9.846**	7.538*	6.976*	6.000*
32	0.333 ^{NS}	1.333 ^{NS}	0.083 ^{NS}	2.083 ^{NS}	4.083*	2.083 ^{NS}	0.083 ^{NS}	5.333*
33	0.750 ^{NS}	0.083 ^{NS}	0.333 ^{NS}	0.750 ^{NS}	0.000 ^{NS}	0.000 ^{NS}	0.333 ^{NS}	0.000 ^{NS}
34	7.731*	9.269**	8.346*	7.538*	7.538*	7.385*	7.845*	8.326*
35	8.769*	8.000*	7.385*	7.385*	6.409*	6.727*	3.731 ^{NS}	5.143 ^{NS}
36	5.333*	5.333*	2.083 ^{NS}	4.083*	5.333*	5.333*	1.708 ^{NS}	3.429 ^{NS}
37	9.846**	8.346*	8.346*	7.731*	4.083*	3.000 ^{NS}	7.463*	0.083 ^{NS}
38	8.227*	8.909*	8.227*	7.636*	8.909*	8.227*	7.409*	6.045*
39	8.909*	8.909*	8.909*	6.000 ^{NS}	5.333*	3.000 ^{NS}	6.073*	0.083 ^{NS}
40	0.750 ^{NS}	0.333 ^{NS}	1.333 ^{NS}	1.333 ^{NS}	3.000 ^{NS}	0.750 ^{NS}	0.021 ^{NS}	0.750 ^{NS}
41	7.423*	7.423*	7.538*	7.423*	0.083 ^{NS}	0.750 ^{NS}	7.538*	1.333 ^{NS}
42	0.000 ^{NS}	3.000 ^{NS}	2.083 ^{NS}	1.333 ^{NS}	5.333*	5.333*	1.349 ^{NS}	1.333 ^{NS}

NS = No existe diferencia significativa ($P > 0.05$), * = Diferencia significativa ($P \leq 0.05$), ** = Diferencia altamente significativa ($P \leq 0.05$). En los eventos 1, 2, 3, 15, 16, 17, 18, 19, 24, 25, 32, 33, 36, 40 y 42 no se registró escurrimiento fustal (*Ef*).

Correlaciones lineales

Para entender el grado de asociación entre las variables de estudio, se realizaron correlaciones para definir el grado de asociación entre la deposición de nutrientes y la precipitación.

Precipitación incidente

El grado de asociación entre variables es confiable en cada macronutriente evaluado, en los que el ajuste más alto fue el Na con una R^2 de 0.77 y caso contrario, en Mg con una R^2 de 0.47, considerada como un ajuste medio. La mayoría de los eventos se concentra en precipitaciones menores a 35 mm, aunque excepcionalmente ocurren algunos cuyos volúmenes superan los 60 mm.

En la Figura 4 se observan las relaciones de deposición para los cuatro macronutrientes, las cuales indican que a mayor volumen de precipitación incidente, existe una mayor acumulación de nutrientes.

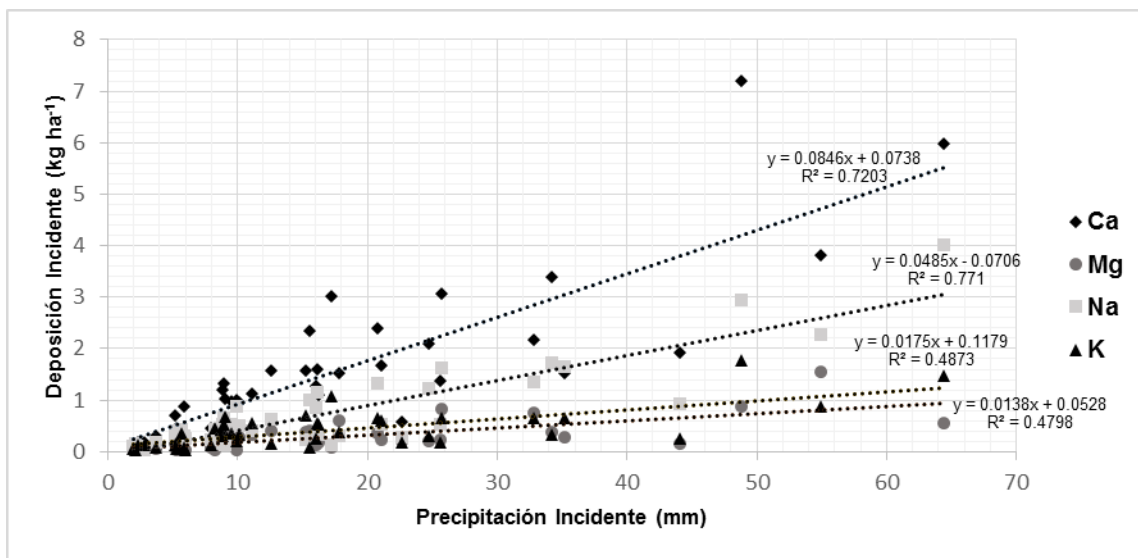


Figura 4. Relación entre la precipitación incidente (mm) y la deposición incidente (kg ha⁻¹) de macronutrientes.

La relación de los micronutrientes en la precipitación incidente mostró un coeficiente de determinación bajo para la mayoría de los casos evaluados. Esto puede estar influenciado por otros factores, es decir, que no solo la cantidad de precipitación afecta su deposición; también se le puede atribuir a su baja disponibilidad. En este caso, la relación con un mejor ajuste es Zn con un valor de R^2 de 0.65, mientras que de Fe fue de R^2 de 0.06.

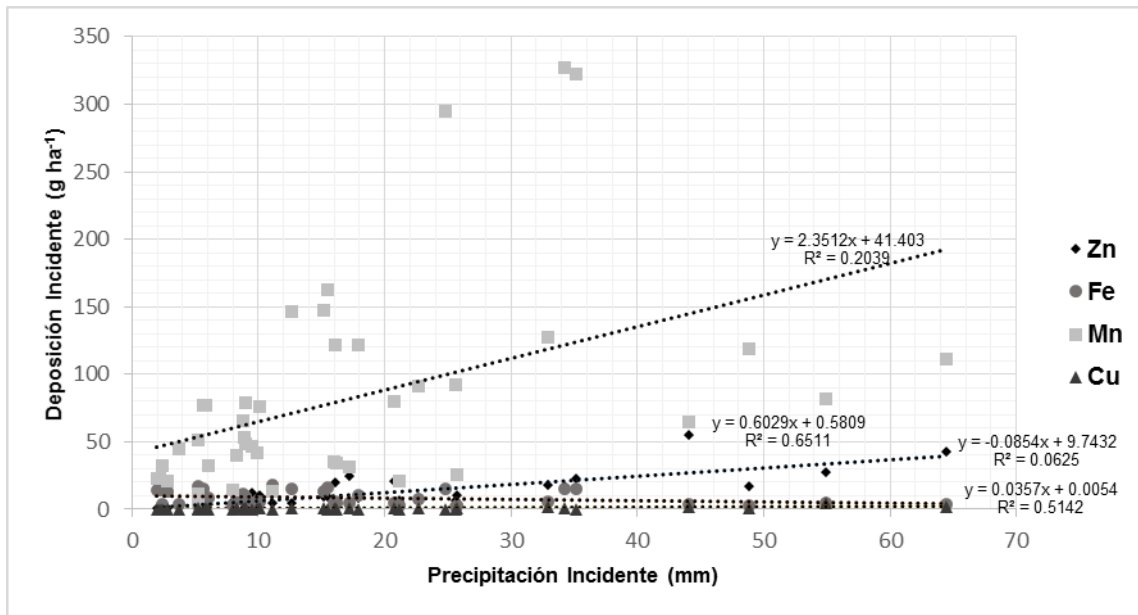


Figura 5. Relación entre precipitación incidente (mm) y deposición incidente (g ha^{-1}) en micronutrientes.

Precipitación neta

La precipitación neta, además de recibir influencias de factores atmosféricos, también es modificada por otros como la fenología y la morfología de la especie.

Las ecuaciones de regresión indican valores medios y altos de R^2 de 0.77, 0.81, 0.72 y 0.50 para Ca, Na, K y Mg, respectivamente; la precipitación neta una variable de predicción considerable en el depósito de nutrientes (Figura 6).

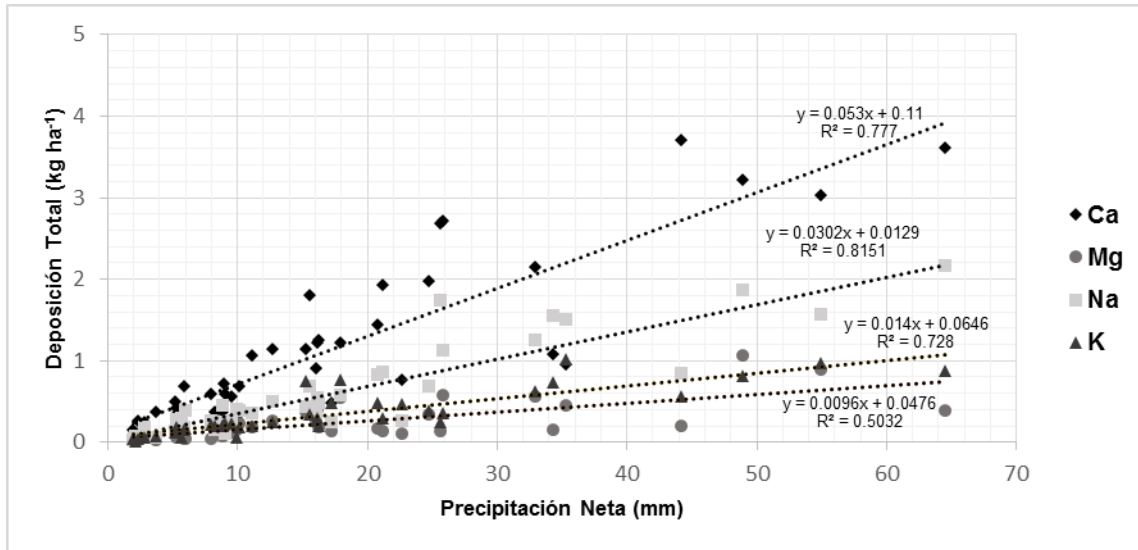


Figura 6. Relación entre precipitación neta (mm) y deposición total (Kg ha^{-1}) en macronutrientos.

En la Figura 7 se aprecia que los micronutrientos registraron valores bajos de R^2 de 0.25, 0.08, 0.37 y 0.37 para Mn, Fe, Zn y Cu, respectivamente, en los que se puede advertir que la cantidad precipitación no describe en su totalidad al depósito de nutrientes, lo que responde a que otros factores determinan la deposición. En las precipitaciones inferiores a 30 mm, ocurre una mayor deposición de nutrientes.



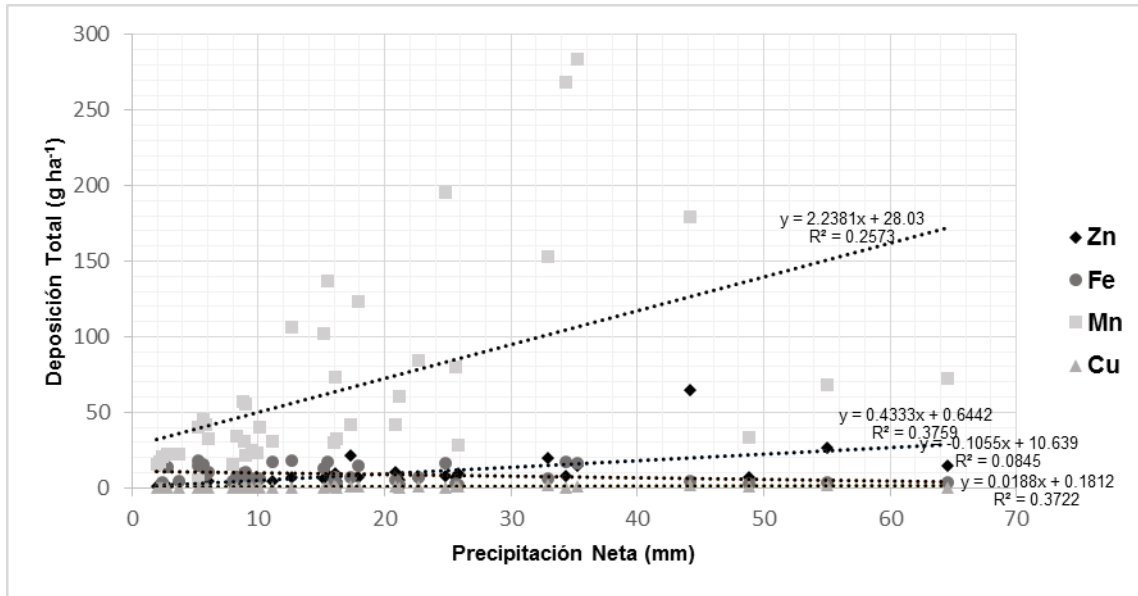


Figura 7. Relación entre precipitación neta (mm) y deposición total (g ha^{-1}) en micronutrientos.

En los resultados se ve reflejada la importancia de los factores que influyen en la deposición de nutrientes, de origen biótico y abiótico, que son muy diversos. Destacan, principalmente, la forma y la densidad de la copa, la composición y la edad foliar, las variaciones en la textura de la corteza, la presencia de líquenes, la edad del bosque, la arquitectura del árbol, el régimen de precipitación, la composición atmosférica, la estación anual, el tipo de vegetación, la cantidad y la duración de la precipitación, la altitud de la zona, la actividad de la microflora, entre otros (Santa *et al.*, 1989; Méndez, 1997; Pryor y Barthelmie, 2005; Návar *et al.*, 2009).

La hidrología forestal es considerada una parte fundamental para entender la dinámica de un ecosistema, por lo que resulta relevante describir el flujo de la precipitación y de nutrientes dentro de ellos, donde la estructura del dosel del bosque es el principal factor que influye directamente en estos procesos (Wan y Chen, 1999; Xiao *et al.*, 2002).

Para la evaluación de especies en este contexto, la cantidad y la duración de la lluvia explican la variación de la deposición y las fuentes; y factores externos son importantes para la presencia de sustancias químicas en la precipitación (Návar *et al.* 2009).

Conclusiones

La incorporación de macronutrimentos presenta un orden de mayor a menor Ca>Na>K>Mg, mientras que para los micronutrimentos Mn, Fe, Zn y Cu.

La vía de redistribución con mayor flujo nutrimental fue la precipitación directa, caso contrario, el escurrimiento fustal.

Existe una mayor asociación de la deposición de macronutrimentos con los volúmenes de la precipitación, mientras que en los micronutrimentos la deposición se ve influenciada por otros factores además del volumen de la precipitación, como el clima, la temperatura ambiental, el régimen de lluvias, la biología de la especie y las actividades antropogénicas, entre otros.

Pinus cooperi ofrece una gran variedad de beneficios económicos para la zona norte del país, por su aprovechamiento maderable. Con base en los resultados generados en el presente estudio es una especie que contribuye en gran medida a la recarga de nutrimentos del suelo vía pluviolavado, por lo que desempeña un papel importante en la recuperación y restauración de los ecosistemas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ciencias Forestales, UANL y al Instituto Tecnológico de El Salto por el apoyo técnico para la realización de esta investigación, así como al proyecto Ciclos Biogeoquímicos en Bosques de la Sierra Madre Occidental, de la Región de El Salto, Durango, México. Proyecto TECNM. 5746.16-P y a CONACYT por el apoyo de la beca de posgrado para la realización de esta investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Silvia Janeth Béjar Pulido: desarrollo de la investigación en laboratorio, estructura y diseño del manuscrito; Israel Cantú Silva: diseño, interpretación, análisis estadístico y corrección del manuscrito; Tilo Gustavo Domínguez Gómez: aportación de información analítica al manuscrito y toma de muestras en campo; Humberto González Rodríguez: corrección y revisión del documento; José Guadalupe Marmolejo Monciváis: revisión y correcciones de manuscrito; María Inés Yáñez Díaz: diseño, interpretación y análisis de los resultados obtenidos, así como corrección de manuscrito; Erik Orlando Luna Robles: toma y procesamiento de datos de campo.

Referencias

- Abbasian, P., P. Attarod, S. M. M. Sadeghi, J. T. Van Stan II and S. M. Hojjati. 2015. Throughfall nutrients in a degraded indigenous *Fagus orientalis* forest and a *Picea abies* plantation in the North of Iran. *Forest Systems* 24(3): 2171-9845.
- Aboal V., J. R. 1998. Los flujos netos hidrológicos y químicos asociados de un Bosque de Laurisilva en Tenerife. Tesis Doctoral. Universidad de la Laguna. Tenerife, España. 184 p.
- Andrade G., D. C., D. Da Silva H., A. Ferreira C., F. Bellote A. y U. I. Moro L. 1995. Contribución del agua de lluvia en la oferta de nutrimentos minerales para *Eucalyptus grandis*. *Bosque* 16(1):47-51.
- Burch, H., P. Waldner and B. Fritschi. 1996. Variation of pH and concentration of nutrients and minerals during rain-events. *In*: 6th Conference of the European Network of Experimental and Representative Basins (ERB). Ecohydrological Processes in Small Basins. 24-26 September. Strassbourg, France. pp. 59-64.
- Cantú S., I. and H. González R. 2001. Interception loss, throughfall and stemflow chemistry in pine and oak forests in northeastern Mexico. *Tree Physiology* 21 (12-13):1009-1013.

- Cantú S., I. y H. González R. 2002. Propiedades hidrológicas del dosel de los bosques de pino-encino en el noreste de México. *Ciencia UANL* 5(1):72-78.
- García L., Y. W. 2018. Pérdidas por intercepción de lluvia en el matorral espinoso tamaulipeco bajo diferentes intensidades de raleo. Tesis maestría. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, N.L., México. 45 p.
- Hanchi, A. and M. Rapp. 1997. Stemflow determination in forest stands. *Forest Ecology and Management* 97: 231-235.
- Huber, A. W. y C. E. Oyarzun. 1992. Redistribución de las precipitaciones en un bosque siempre-verde del sur de Chile. *Turrialba* 42(2): 192-199.
- International Business Machines (IBM). 2013. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 22.0. IBM Corp. Armonk, NY, USA. n/p.
- Jaramillo, A. 2003. La lluvia y el transporte de nutrimentos dentro de ecosistemas de bosque y cafetales. *Cenicafé* 54(2):134-144.
- Jiménez R., C. J., C. Calvo A. y D. Arias A. 2006. Lavado de nutrimentos en plantaciones forestales de *Vochysia ferruginea* Mart. y *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm., Sarapiquí, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 3(8):16-26. 1-11.
- Méndez G., J. 1997. Perfil químico de la precipitación a través del dosel de cuatro especies de leguminosas de una plantación en Linares, NL. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, N.L., México. 120 p.
- Nájera L., J. A., O. A. Aguirre C., E. J. Treviño G., J. Jiménez P. y E. Jurado Y. 2011. Tiempos y rendimientos del aprovechamiento forestal en El Salto, Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(1):49-58.
- Návar, J., J. Méndez G. and H. González. 2009. Gross precipitation and throughfall chemistry in legume species planted in Northeastern México. *Plant and Soil* 318(1-2):15-26.
- Nie, L., D. Wang and J. Li. 2007. Transfer characteristics of nutrient elements through hydrological process of a *Pinus tabulaeformis* stand in the West Mountain of Beijing. *Frontiers of Forestry in China* 2(3):329-334.

- Pryor S., C. and J. Barthelmie R. 2005. Liquid and chemical fluxes in precipitation, throughfall and stemflow: observations from a deciduous forest and a red pine plantation in the midwestern USA. *Water, Air, and Soil Pollution* 163(1-4):203-227.
- Romero C., L. 2007. Estudio de los flujos hídricos en las Dunas de Guardamar Del Segura. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante. Guardamar del Segura, España. 296 p.
- Santa R., I., J. F. Gallardo, C. San Miguel y A. Moyano. 1989. Intercepción, pluviolavado y escorrentía cortical en una plantación de *Pinus sylvestris* de la Cuenca de Candelario (centro-oeste de España). *Bosque* 10(1):19-27.
- Tobón M., C., I. W. Bouten and S. Dekker. 2000. Forest floor water dynamics and root water uptake in four forest ecosystems in northwest Amazonia. *Journal of Hydrology* 237 (3-4):169-183.
- Wan, S. Q. and L. Z. Chen. 1999. Canopy distribution of precipitation in warm temperate deciduous broad-leaved forests. *Acta Phytocologica SINICA* 23(6) 557-561.
- Ward, R. C. and M. Robinson. 1990. Principles of hydrology. McGraw Hill International Editions. London, England, UK. pp. 54-78.
- Wetzel, R. G. and G. Likens. 1979. Limnological analyses. Ed. Springer. Alabama, NY USA. 429 p.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base referencial mundial del recurso suelo. Primera actualización. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO. Roma, Lazio, Italia, 117 p.
- Xiao, Y., L. Dai, D. Niu, F. Tong, G. Chen and H. Deng. 2002. Influence of canopy on precipitation and its nutrient elements in broad-leaved/Korean pine forest on the northern slope of Changbai Mountain. *Journal of Forestry Research* 13(3):201-204.
- Xu, Y., G. Zhou, Z. Wu, T. Luo and Z. He. 2001. Chemical composition of precipitation, throughfall and soil solutions at two forested sites in Guangzhou, South China. *Water, Air, and Soil Pollution* 130 (1-4):1079-1084.

Xu, X., Q. Wang and E. Hirata. 2005. Precipitation partitioning and related nutrient fluxes in a subtropical forest in Okinawa, Japan. *Annals of Forest Science* 62(3):245-252.

Yáñez D., M. I., I. Cantú S., H. González R. y J. I. Uvalle S. 2014. Redistribución de la precipitación en tres especies arbustivas nativas y una plantación de eucalipto del noreste de México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 5(2): 71-84.