

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Intercepción De Lluvia En Un Bosque Mesófilo De Montaña En El Ejido Cumbre De Muridores, Municipio De San Bartolo Tutotepec, Hidalgo

Por:

ERNESTO OCTAVIO SOSA DÍAZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Intercepción de Lluvia en Un Bosque Mesófilo de Montaña en el Ejido Cumbre de
Muridores Municipio de San Bartolo Tutotepec, Hidalgo

Por:

ERNESTO OCTAVIO SOSA DÍAZ

TESIS

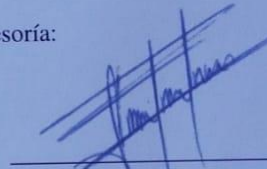
Presentada como requisito parcial para obtener título de:

INGENIERO FORESTAL

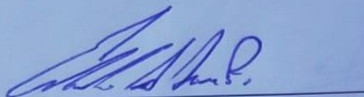
Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Jorge Méndez González
Asesor Principal Interno



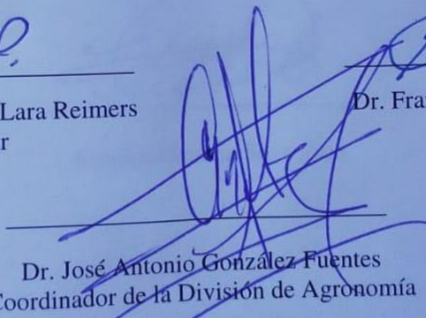
Dr. Andrés Flores García
Asesor Principal Externo



Dr. Eduardo Alberto Lara Reimers
Coasesor



Dr. Francisco Cruz García
Coasesor



Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México
Diciembre, 2021

Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante

Ernesto Octavio Sosa Díaz

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por darme la vida e iluminarme en todo momento, por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes y sobre todo de felicidad.

A mi Alma Mater la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por haberme aceptado ser parte de ella y abierto las puertas para seguir formándome profesionalmente.

Al Dr. Jorge Méndez González por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como también haberme tenido la paciencia para guiarme durante todo el desarrollo de la tesis.

Al Dr. Andrés Flores García y al Dr. Francisco Cruz García por el valioso tiempo que brindaron en la revisión de la presente investigación.

A todo el personal del Departamento Forestal, a cada uno de los profesores que durante el transcurso de mi carrera contribuyeron a mi formación. Gracias.

DEDICATORIA

A mis padres, Librado Sosa Ortiz y Leticia Díaz Solís por el apoyo incondicional y sus valiosos consejos que me brindaron en mi formación y por darme la vida mil gracias, los llevaré siempre en mi mente y corazón.

A mis hermanos, Humberto, Librado, Misael, Leticia, Baruk y Carol (†) por brindarme su apoyo y ser parte importante en mi vida

TABLA DE CONTENIDO

Página

ÍNDICE DE CUADROS	I
ÍNDICE DE FIGURAS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT.....	IV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo General	3
1.1.2 Objetivos Específicos	3
1.2 Hipótesis.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Definición de intercepción	4
2.2. Precipitación directa.....	4
2.3. Escurrimiento fustal	4
2.4. Tamaño y forma de colectores	5
2.5. Numero de colectores.....	5
2.6. Papel de la intercepción en el ciclo del hidrológico.....	6
2.7. Factores que influyen en la intercepción de lluvia.....	7
2.8. Modelos para estimar intercepción de lluvia	7
2.9. Métodos para validación de modelos	8
2.10. Estudios afines	9
2.11. Intercepción de lluvia en bosques de coníferas.....	10
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
3.1 Características del área de estudio	12

3.1.1. Localización del área de estudio	12
3.1.2. Clima	12
3.1.3 Suelo	12
3.1.4 Vegetación.....	13
3.3. Medición de los componentes de la precipitación	15
3.3.1. Tamaño y forma de los colectores	15
3.3.2 Número de colectores	15
3.3.3. Distribución de los colectores.....	15
3.4. Cuantificación de intercepción.....	15
3.4.1. Colecta de lluvia bajo las copas	15
3.4.2. Medición de precipitación total	15
3.4.3. Intercepción de lluvia	16
3.5. Variables ambientales.....	16
3.6. Obtención de datos dasométricos.....	16
3.7. Análisis estadístico.....	16
3.8. Validación de los modelos de regresión.....	17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
4.1. Características dasométricas de las especies presentes	19
4.2. Análisis de precipitación incidente	21
4.3. Variables cuantitativas de precipitación.....	24
4.4. Correlación de Pearson y Spearman entre variables climáticas (duración, velocidad del viento, temperatura, intensidad e intercepción)	28
4.5. Regresión Dummy	30
4.6. Análisis de intercepción de lluvia	33
4.7. Pruebas de supuestos estadísticos básicos para validar los modelos	35

4.8. Validación de modelos para intercepción y precipitación bajo las copas.....	37
5. CONCLUSIONES.....	39
6. REFERENCIAS	40

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Descripción de las especies más abundantes en el área de estudio	14
Cuadro 2. Estadística descriptiva de las variables dasométricas para las especies <i>P. patula</i> (PP), <i>P. ayacahuite</i> (PA), <i>Q. laurina</i> (QL), <i>Q. crassifolia</i> (QC) y <i>C. benthamii</i> (CB).	20
Cuadro 3. Parámetros estadísticos de correlación de Spearman entre la intercepción y las variables climáticas, para un bosque mesófilo de montaña en el Ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.....	30
Cuadro 4. Estadísticos de regresión Dummy para evaluar el efecto de variables climáticas sobre la intercepción de lluvia en un bosque mesófilo de montaña en el Ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.....	31
Cuadro 5. Parámetros y estadísticos para los modelos de intercepción y precipitación bajo las copas, en un bosque mesófilo de montaña en el Ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.....	34
Cuadro 6. Estadísticos de la validación de los modelos de intercepción (mm) y precipitación bajo las copas (mm) en un bosque mesófilo de montaña en el Ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del área de estudio.	13
Figura 2. Porcentajes y rangos de volumen de precipitación incidente registrados durante el 4 de abril del 2018 al 29 de marzo del 2020 en la Cumbre de Muridores.	22
Figura 3. Distribución anual de la precipitación (mm) registrada entre el 4 de abril del 2018 al 29 de marzo del 2020 en un bosque mesófilo de montaña en el Ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.	23
Figura 4. Precipitaciones diarias registradas durante 4 de abril del 2018 al 29 de marzo del 2020 en un bosque mesófilo de montaña en el Ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.	24
Figura 5. Duración de la precipitación por mes en un bosque mesófilo de montaña, en el Ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.	26
Figura 6. Días entre lluvias registrados en un bosque mesófilo de montaña, en el Ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.	26
Figura 7. Velocidad del viento registrada en un bosque mesófilo de montaña, en el Ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.	27
Figura 8. Grado de acidez o alcalinidad de lluvia en un bosque mesófilo de montaña, en el Ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.	27
Figura 9. Análisis de correlación de Pearson entre la intercepción y el conjunto de variables climáticas. Donde; ** significa correlación significativa al nivel 0.01 ($p < 0.01$); ***significa una correlación significativa al nivel de 0,001 ($p < 0.001$).	29
Figura 10. Intercepción de lluvia en función de variables Dummy; duración (a), velocidad del viento (b), temperatura (c), diferencia entre días de lluvia (d).	32
Figura 11. Varianza de residuales (a), cuantil teórico normal (b), autocorrelación (c), varianza de residuales (d), cuantil teórico normal (e), autocorrelación (f) para predecir precipitación bajo las copas e intercepción de lluvia para un bosque mesófilo de montaña en el Ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.	36
Figura 12. Intercepción de lluvia observada y estimada (a), observaciones influyentes y potenciales (b), precipitación bajo las copas observada y estimada (c), y observaciones influyentes y potenciales (d).	37

RESUMEN

La hidrología de una región está representada por el clima, vegetación, topografía y su geología. La intercepción de lluvia, es el proceso por el cual el agua de lluvia modifica su trayectoria al ser interceptada por el dosel de los árboles. El objetivo de este estudio fue cuantificar la intercepción (I) de lluvia y evaluar los factores climáticos que se relacionan con este proceso, en un bosque mesófilo de montaña (1.22 ha). Se distribuyeron de forma aleatoria 30 colectores de aluminio (4.2 litros) para medir la precipitación bajo las copas (PBC) y cinco para la precipitación total (a 200 m de distancia del resto) durante 24 meses (04/04/2018 - 29/03/2020). En cada evento de lluvia se registró la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), velocidad del viento (m s^{-1}), duración (h), volumen de agua (mm), grado de acidez (pH) y la intensidad (mm h^{-1}). Se ajustaron dos modelos de regresión lineal para predecir la intercepción de lluvia y la precipitación bajo las copas tomando como variable independiente la precipitación total. Además, de un modelo con variables indicadoras (Dummy) para observar alguna influencia de los parámetros climáticos sobre la intercepción. Se registraron 180 eventos de lluvia equivalentes a 2 982.17 mm de precipitación total (PT) y 2 441.02 mm de PBC. La distribución anual de PT fue de 443.43 mm (2018), 1 407.84 mm (2019) y 130.9 mm para 2020. La intercepción de lluvia se relacionó positiva y significativamente ($p < 0.05$) con la duración del evento ($r = 0.43$) y la intensidad ($r = 0.46$). La pérdida por intercepción fue del orden de 531.15 mm (18 % del total), que aumentaría a medida que incrementa la magnitud de las variables climáticas (de acuerdo con la regresión con variables Dummy). En conclusión, la intercepción de lluvia es afectada por la duración e intensidad de la lluvia.

Palabras clave: intercepción de lluvia, variables climáticas, correlación de Pearson, regresión Dummy.

ABSTRACT

The hydrology of a region is represented by the climate, vegetation, topography and its geology. Rain interception is the process by which rainwater modifies its trajectory as it is intercepted by the canopy of the trees. The objective of this study was to quantify the rain interception (I) and evaluate the climatic factors that are related to this process, in a mountain mesophilic forest (1.22 ha). 30 aluminum collectors (4.2 liters) were randomly distributed to measure precipitation under the canopies (PBC) and five for total precipitation (200 m away from the rest) during 24 months (04/04/2018 - 29 / 03/2020). In each rain event, the temperature ($^{\circ}$ C), wind speed ($m\ s^{-1}$), duration (h), volume of water (mm), degree of acidity (pH) and intensity ($mm\ h^{-1}$) were recorded.). Two linear regression models were adjusted to predict the interception of rain and precipitation under the canopies, taking total precipitation as the independent variable. 180 rain events were recorded, in which 2 982.17 mm of total precipitation (PT) and 2 441.02 mm of PBC were recorded. The annual distribution of PT was 443.43 mm (2018), 1 407.84 mm (2019) and 130.9 mm for 2020. The rainfall interception was positively and significantly ($p < 0.05$) related to the duration of the event ($r = 0.43$) and intensity ($r = 0.46$). The loss by interception was of the order of 531.15 mm (18% of the total), which would increase as the magnitude of the climatic variables increases (according to the regression with dummy variables). In conclusion, the rain interception is affected by the duration and intensity of the rain.

Key words: rainfall interception, climatic variables, Pearson's correlation, Dummy regression.

1. INTRODUCCIÓN

La medición y predicción de las pérdidas por intercepción del bosque del agua de lluvia son requerimientos esenciales en el pronóstico de los efectos de la cubierta vegetal sobre el rendimiento de agua de una cuenca forestal (Cantú y González, 2005). Las pérdidas por intercepción de una cubierta de bosques fueron consideradas por mucho tiempo como un sustituto de otro tipo de evaporación que hubiera ocurrido en un área determinada cubierta de vegetación, pues se pensaba que la energía utilizada para evaporar el agua almacenada en la vegetación estaría disponible para evaporar agua desde el suelo o superficies libres (Iroume y Huber, 2000). La hidrología de una región está representada por su clima, vegetación, topografía y geología, aunque muchas actividades del hombre alteran el funcionamiento natural del ciclo hidrológico y su equilibrio (Mecca, 2008). De igual manera, otros factores como el viento, la radiación solar, la temperatura y la presión atmosférica afectan al ciclo hidrológico (López, 2007). Así mismo, los ecosistemas forestales comprenden distintos procesos en los que interactúan factores bióticos que involucran características de la cubierta vegetal y su estructura como la rugosidad y su capacidad de almacenamiento (Tamez, 2018).

La intercepción de lluvia, es el proceso por el cual el agua de lluvia modifica su trayectoria al ser interceptada por el dosel de los árboles, ejerciendo de esta manera, una marcada influencia en el patrón de la lluvia que alcanza a llegar al piso forestal (Flores *et al.*, 2013). Una vez interceptada, el agua es retenida por las hojas y ramas de los árboles, incluso por plantas epifitas, pudiendo a partir de este momento, continuar su trayectoria por una o más de estas tres vías: evaporarse, gotear desde la copa, o fluir por las ramas hasta la base del fuste (García, 2006). La intercepción de lluvia se calcula mediante la resta del volumen de la precipitación sobre el dosel (precipitación incidente) menos la precipitación directa (volumen de agua colectado bajo la copa) (García *et al.*, 2018).

El estudio de la intercepción de lluvia que causa la vegetación tiene su importancia en el tema del balance hídrico de las cuencas, debido a que parte de esta lluvia es devuelta a la atmósfera

mediante el proceso de evaporación (Luna-Cavazos *et al.*, 2008). A pesar de que los bosques no influyen de manera preponderante en la precipitación, su participación no se puede considerar insignificante, en particular, cuando el dosel regula y modifica el flujo que sigue la precipitación antes de llegar al piso forestal (Kittredge, 1948).

La información cuantitativa de la captura de agua por estos árboles puede contribuir como base para la valoración de los servicios ambientales de la vegetación natural. Gracias a dicha intercepción, esta cantidad de agua se mantiene en el ambiente otorgando a la comunidad varios beneficios ambientales bajo el marco de protección del recurso hídrico como es el mantener cierta humedad a nivel local, evitar inundaciones y generar más eventos de lluvia (Prado *et al.*, 2007).

Se han realizado estudios de intercepción en diferentes ecosistemas, por ejemplo, Cervantes (1988) y Moreno *et al.* (2016) cuantificaron la intercepción para selva baja caducifolia en el estado de Jalisco, México y la región mixteca (Oaxaca, Puebla y Guerrero), respectivamente. Así mismo, distintos autores Flores *et al.* (2016), Cantú y González (2002), Gómez-Tagle *et al.* (2015) y Iroume y Huber (2000) han trabajado en ecosistemas de bosque. Para el caso de zonas áridas autores como Návar *et al.* (2007), Cantú y González (2005) y García *et al.* (2018) han evaluado las pérdidas por intercepción en las comunidades vegetales presentes en dichas zonas.

El bosque mesófilo de montaña pertenece al clima húmedo de altura donde la precipitación media anual comúnmente pasa de 1 500 mm y alcanza en algunas zonas los 3 000 mm; comúnmente dominado por frecuentes neblinas lo que provoca una alta humedad atmosférica. Fisonómicamente es éste un bosque denso, por lo general de 15 a 35 m de alto, los diámetros de los troncos se mantienen entre 30 y 50 cm. La comunidad puede incluir tanto árboles perennifolios como de hoja decidua, provocando que el bosque nunca se vea completamente defoliado. *Liquidambar styraciflua* L. es uno de los elementos característicos de este tipo de vegetación comúnmente asociado a comunidades de *Quercus*, y entre las gimnospermas están representadas por los géneros *Pinus*, *Podocarpus* y *Abies* (Rzedowski, 2006).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

1. Cuantificar la intercepción de lluvia en un bosque mesófilo de montaña y evaluar los factores climáticos que tienen más relación con este proceso.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Medir la intercepción de lluvia que se produce en un bosque mesófilo de montaña en el Ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.
2. Identificar las variables climáticas que influyen en el proceso de intercepción de lluvia en un bosque mesófilo de montaña en el Ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.

1.2 Hipótesis

- La intercepción de lluvia está influenciada por variables climáticas (temperatura, velocidad del viento, duración del evento, intensidad) en un bosque mesófilo de montaña.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Definición de intercepción

Las precipitaciones en ecosistemas forestales se dividen en precipitación directa, escurrimiento fustal y pérdida de intercepción; clasificación que es importante en los estudios de hidrología forestal (Lida *et al.*, 2005).

La intercepción de lluvia se define como la cantidad de agua que es retenida por el dosel en hojas, ramas o cualquiera de sus partes vegetales en bosques, campos agrícolas o cualquier otro sistema con cobertura vegetal (Levia *et al.*, 2011). La intercepción de lluvia se estima de forma indirecta como la diferencia entre la precipitación incidente (arriba del dosel) y la precipitación directa (debajo del dosel) (García *et al.*, 2018).

2.2. Precipitación directa

Precipitación directa, es referida a la fracción de la lluvia que pasa directamente a través del follaje y a través de las hojas y ramas (García, 2006), y es un componente crítico de los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos de los ecosistemas boscosos con un alto grado de variabilidad temporal y espacial (Potter *et al.*, 1991; Moffat *et al.*, 2002). Por su parte, Dunkerley (2000) define la precipitación directa como la que pasa directamente a por el dosel arbóreo sin entrar en contacto con ninguna superficie vegetativa.

2.3. Escurrimiento fustal

El escurrimiento fustal es generalmente una componente menor del balance hídrico de los ecosistemas forestales (Levia *et al.*, 2010), y se define cómo la fracción de la lluvia que alcanza el suelo del bosque corriendo por los tallos de los árboles después de que la lluvia incidente es interceptada por hojas y ramas, hasta alcanzar el tronco principal y luego escurre

por la superficie hasta llegar al suelo (Iroume y Huber, 2000). Staelens *et al.* (2008) definen el escurrimiento fustal como la fracción de la lluvia que llega al piso del bosque, deslizándose por los fustes y ramas de los árboles, y es ocasionada por la precipitación interceptada por los componentes del dosel de copas.

2.4. Tamaño y forma de colectores

A lo largo del tiempo en estos estudios se han utilizado diferentes tipos, tamaños y formas de colectores propuestos por distintos autores alrededor del mundo. El empleo de canaletas y botes hechos de diferentes tipos de materiales, como sus diferentes medias, han sido una herramienta útil para este tipo de trabajos desde estudios pasados: Cervantes (1988), Marin *et al.* (2000), Huber e Iroume (2000), y Cantú y González (2005). Sus métodos han sido eficaces puesto que se siguen utilizando en estudios más recientes: Grunicke *et al.* (2020) utilizó canaletas colectoras hechas de acero inoxidable y con una longitud de 10 m cada una y área total de recolección de 3.18 m² en un estudio realizado al suroeste de la ciudad de Dresde, Alemania; mientras que Flores *et al.* (2016) dispusieron de pluviómetros Tru-Check (de lectura directa) con una precisión de 0.1 mm, colocados a una altura de 0.9 m sobre el nivel del piso.

Cantú y González (2002) utilizaron canaletas de PVC de 1 000 cm² (10 cm de ancho x 100 cm de largo) conectadas por medio de mangueras a recipientes de 20 L, en donde se colectó el agua de lluvia. El mismo sistema fue utilizado por García *et al.* (2018), así mismo Cervantes (1988) utilizó el mismo método modificando únicamente al doble el largo de la canaleta.

Návar *et al.* (2007) colectaron la precipitación total en pluviómetros de polietileno de 20 cm de diámetro, insertados dentro de botes de polietileno de 4 L, mientras que Rodrigues *et al.* (2016) utilizaron pluviómetros cilíndricos con un diámetro de 16 cm, colocados sobre soportes metálicos con el fin de asegurar la horizontalidad.

2.5. Numero de colectores

Flores *et al.* (2013) utilizaron 60 colectores de lluvia de lectura directa Tru-Chek distribuidos en 0.48 ha divididas en subcuadrantes (10 m x 10 m). Santa-Regina *et al.* (1989) en un bosque de *Pinus sylvestris* L., de aproximadamente de 35 años de edad, emplearon 6 pluviómetros

con una superficie de 70.9 cm². En los ecosistemas de zonas áridas se han utilizado diferentes números de pluviómetros por diversos autores, por ejemplo, García *et al.* (2018) emplearon ocho canaletas en forma de “U” en parcelas de 100 m² dentro de un matorral espinoso tamaulipeco. Así mismo, para un matorral submontano se establecieron cuatro parcelas (10 m x 10 m) con 4 canaletas (10 cm de ancho x 100 cm de largo) para registrar la precipitación directa (Yáñez-Díaz *et al.*, 2014).

2.6. Papel de la intercepción en el ciclo del hidrológico

La precipitación es uno de los procesos hidrológicos más importantes porque sirve como el principal suministro de agua en una cuenca. Durante el ciclo hidrológico, algunas lluvias quedan atrapadas en el dosel del bosque, lo que provoca una redistribución del agua, gran parte de la cual se pierde por evaporación (Link *et al.*, 2004).

La estimación de la intercepción de lluvia por el bosque es esencial para conocer o pronosticar los efectos de una cubierta vegetal sobre el rendimiento de agua en una cuenca hidrológica. Conocer la intercepción es muy útil en operaciones forestales como la aplicación de insecticidas, pesticidas y aplicación de retardantes de incendios las cuales son más efectivas si la vegetación intercepta y almacena mayor tiempo el líquido (Cantú y González, 2005).

Prado *et al.* (2007) mencionan que la cantidad de agua interceptada se mantiene en el ambiente, otorgando muchos beneficios a la comunidad bajo el marco de protección al recurso hídrico, tales como: mantener la humedad a nivel local, evitar inundaciones, generar más eventos de lluvia y aporte de humedad en el microclima (necesarios para los pagos de servicios ambientales).

El ciclo del agua es, por tanto, un factor importante en el funcionamiento de los ecosistemas forestales, sobre todo en las regiones con déficit hídrico y limitante, como es el caso de áreas con influencia climática mediterránea. En líneas generales, la lluvia representa la fuente de agua principal en los ecosistemas terrestres, aunque en bosques una fracción significativa se elimina rápidamente por evaporación en la misma cubierta vegetal lo que se denomina "intercepción" (Santa-Regina *et al.*, 1989).

2.7. Factores que influyen en la intercepción de lluvia

El dosel de la vegetación es el primer factor que interviene cuando la precipitación bruta entra en el bosque (Pérez *et al.*, 2015), generando la intercepción de la lluvia y su posterior evaporación ("pérdida por intercepción"), y afectando el rendimiento de agua de los bosques (Sopper y Lull, 1967; Bruijnzeel, 2000). En segundo lugar, las condiciones meteorológicas controlan la tasa de evaporación del agua interceptada que se almacena temporalmente en las hojas, ramas y troncos (Staelens *et al.*, 2008). En consecuencia, la cantidad de la precipitación neta se ve afectada por la velocidad del viento, el déficit de humedad del aire (Rutter y Morton, 1977). En tercer lugar, la intercepción depende de las características de la estructura del bosque, como la composición de especies (Aussenac y Boulangeat, 1980), la edad del rodal, el área basal (Forgeard *et al.*, 1980), la densidad del rodal (Peck y Mayer, 1996), la distribución espacial de los árboles (Teklehaimanot y Jarvis, 1991), índice de área foliar (Marin *et al.*, 2000), ángulo de la rama (Huber e Iroume, 2001) y forma de la hoja (Crockford y Richardson, 2000). Las especies de árboles también difieren en hidrofobicidad o repelencia al agua de hojas y madera (Herwitz, 1985).

2.8. Modelos para estimar intercepción de lluvia

Se han desarrollado varios métodos para estimar la cantidad de lluvia interceptada. La mayoría de los modelos matemáticos de intercepción de lluvia se basan en un balance hídrico del dosel e incluyen variables asociadas con las características estructurales del bosque y las condiciones meteorológicas del sitio (Carlyle-Moses y Gash, 2011). Horton (1919), a principios del siglo XX, fue el primero en sugerir un modelo basado en la capacidad de almacenamiento del dosel, la duración de la tormenta, la tasa de evaporación, la superficie, y la intensidad de la lluvia. Con esto sentó bases para desarrollar cuatro de los modelos que dominan la literatura sobre modelos de pérdidas por intercepción del dosel: el modelo de Rutter original (Rutter *et al.*, 1971, 1977), el modelo de Gash original y sus reformulaciones (Gash *et al.*, 1995). Estos cuatro modelos utilizan parámetros como la capacidad de almacenamiento del dosel, la caída libre, un coeficiente de flujo y la capacidad de almacenamiento de agua en los troncos, y calculan los coeficientes de lluvia que se mueven a través de la corteza de los árboles. Otros estudios consideran información sobre

precipitación neta y flujo cortical, evaporación del tronco y del dosel, infiltración y que pueden obtenerse mediante métodos directos o indirectos (Llorens *et al.*, 1997).

2.9. Métodos para validación de modelos

La forma más común de validar un modelo consiste en examinar gráficamente el ajuste de los resultados del modelo a los datos correspondientes para el mismo periodo. Este proceso se hace de forma iterativa y se repite para versiones diferentes de un mismo modelo obtenidas por un cambio en el conjunto de parámetros usado o por cambios en la estructura del modelo (Ablan *et al.*, 2011).

El error cuadrático medio (MSE, por sus siglas en inglés mean square error) consiste de las diferencias entre los valores observados y las predicciones del modelo respectivamente (Tedeschi, 2006).

El estadístico de Theil se basa en la descomposición del MSE en tres componentes, asociados con las diferencias entre las medias del modelo y del sistema, diferencias entre la varianza de la salida del modelo y de las observaciones, y correlación de los resultados del modelo y las observaciones (Haefner, 2005).

El error absoluto medio es otra técnica que puede utilizarse, similar al MSE es el error absoluto medio (MAE, por sus siglas en inglés mean absolute error). MAE mide el error linealmente. Al igual que para el error cuadrático medio, una medida ponderada del error pudiera ser útil, por lo cual se propone el porcentaje del error absoluto medio (MAPE). La relación RMSE/MAE puede usarse como un indicador de valores aberrantes o extremos. Si esta tasa es mayor a 1 señala la posible existencia de uno o más de estos valores en el conjunto de dato (Mayer y Butler, 1993).

El índice de acuerdo de Willmott d refleja el grado en el cual las observaciones son estimadas en forma correcta por el modelo. Se utiliza con el fin de evitar problemas asociados con r y R^2 . Varía entre 0 (completa discordancia entre el valor estimado por el modelo y el valor observado) y 1 que significa un ajuste perfecto (Willmott, 1981; Wainwright y Mulligan, 2004).

La eficiencia del modelo (EF, del inglés *modelling efficiency*), es una estadística adimensional que relaciona directamente las predicciones del modelo con las observaciones. En un ajuste perfecto $EF = 1$, el cual es su límite superior. Si el error es de la misma magnitud que la varianza observada $EF = 0$ y la media de las observaciones es una representación del sistema tan buena como el modelo (Tedeschi, 2006).

El coeficiente de determinación es una de las medidas de ajuste utilizada con mayor frecuencia (R^2), que es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson. Este coeficiente mide la fracción de la varianza en los datos que es explicada por el modelo (Sterman, 2000).

2.10. Estudios afines

En un estudio realizado por Prado *et al.* (2007) reportan una intercepción en un bosque de *Lysiloma microphylla* Benth. en (Querétaro, Qro.), los valores que se registraron en campo van desde 6 a 35 % con un promedio de 15.61 %. El cálculo de intercepción anual de lluvia en las selvas bajas del municipio es de 6.5×10^9 L equivalente a 2 600 000 tinacos de 2 500 litros.

En Atotonilco El Grande, Hidalgo, en un matorral inerme espinoso compuesto por huizache, palo dulce, enebro, tepozán y nopal, interceptó en promedio 18.6 % de la cantidad de lluvia en el periodo de lluvias evaluado. En términos prácticos, este resultado indica que, en un evento de lluvia de 10 mm, 1.86 mm de lluvia se pierden, y la diferencia pasa a formar parte del proceso de infiltración y escorrentía (Flores *et al.*, 2013).

Návar *et al.* (2007), en su investigación iniciada en marzo de 1996 y concluida en marzo de 1997 dentro de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León —para arbustos nativos del matorral espinoso tamaulipeco *Pithecellobium pallens* Mart., *Pithecellobium ebano* Berl., *Acacia rigidula* Benth. y *Acacia berlandieri* Benth., y utilizando el modelo modificado de Gash— reportó diferencias de intercepción entre las especies: *Acacia rigidula* registró el valor mayor de intercepción (18.68 %), seguido por *Pithecellobium ebano* (13.38 %), *Acacia berlandieri* (7.63 %) y, finalmente, *Pithecellobium pallens* (5.96 %).

En otro estudio realizado por Flores *et al.* (2016) se estudió la intercepción en tres especies donde la precipitación-intercepción se registró por evento de lluvia. Las cantidades

interceptadas por las copas de los árboles se expresaron en porcentajes, para cada uno de los grupos estudiados: oyamel (26.1 %), encino (21.7 %) y pino (19.2 %). De igual manera Iroume y Huber (2000) reportan la intercepción de lluvia en dos vegetaciones en condiciones diferentes (un bosque nativo y en una plantación de Pino Oregon), es específico, **indican** 350 mm y 453 mm, es decir, entre un 26 y 34 % respectivamente; de la precipitación incidente a las masas boscosas se les restaron por intercepción y evaporación al proceso de generación de escorrentías.

2.11. Intercepción de lluvia en bosques de coníferas

Durante septiembre del 2006 a agosto del 2008 Holwerda *et al.* (2010) determinaron la intercepción de lluvia en un bosque nuboso secundario de 19 años y un bosque maduro (poco perturbado), dominados por *Alnus jorullensis* Kunth (bosque secundario) y *Quercus ocoteifolia* Liebm. y *Quercus corrugata* Hook. (bosque maduro) en las laderas orientales del volcán Cofre de Perote en el centro de Veracruz, México, resultando una intercepción del 17 % de la precipitación anual para el bosque maduro y del 8 % para el bosque secundario.

En otro estudio realizado por Cantú y Gonzáles (2002) para la medición de la intercepción en bosques de pino (*Pinus pseudostrobus* Lindl.), encino (*Quercus sp.*) y pino-encino en el bosque experimental de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, se registraron 99 eventos de lluvia interceptados por la vegetación: 187 (19.2 %), 132 (13.6 %) y 224 mm (23 %) para pino, encino y pino-encino, respectivamente.

Díaz-Fernández y Gómez-Tagle (2012) establecieron una investigación en una plantación de *Pinus michoacana* Mart. y un bosque de encino en la cuenca de Cuitzeo de Michoacán, y observando una intercepción de lluvia de 25 % a 40 % en pinos y de 20 % a 30 % en zona de encinos. De igual manera para la misma región, Gómez-Tagle *et al.* (2015) midieron durante 26 meses (28/08/2010 a 23/10/2013) la intercepción de lluvia en un bosque de pino-encino con presencia de *Pinus devoniana* Lindl., *Pinus douglasiana* Martínez, *Pinus leiophylla* Schiede., *Quercus castanea* Née, y *Quercus obtusata* Bonpl. donde la pérdida por intercepción correspondió 17.2 % de la precipitación bruta (2 881.8 mm).

En el ecotono bosque estepa de la Región Andino Patagónica compuesto por *Pinus radiata* D. Don. se midieron los componentes de la precipitación durante 7 eventos de lluvia para una

parcela con uso silvopastoril, y una sin perturbación con diferentes densidades (332 y 625 árb/ha⁻¹). Los resultados mostraron que la precipitación directa y el escurrimiento fustal fueron de 77 y 1 %, respectivamente, de la lluvia incidente en la parcela silvopastoril, y de 64 y 2 % en el bosque sin perturbación (Gómez *et al.*, 2015)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Características del área de estudio

3.1.1. Localización del área de estudio

La investigación se realizó en un predio (1.22 ha) forestal de la Sierra Madre Oriental, en el ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo, México (**Figura 1**). Se encuentra en las coordenadas 20° 20' 49.83" N (latitud) y 98° 19' 29.73" O (longitud), a 2 430 metros sobre el nivel del mar. El área de estudio forma parte de la región hidrológica Rio Panuco (RH26) y se encuentra cerca del límite con la región hidrológica RH27, o también conocida como Norte de Veracruz (CONAGUA, 2007).

3.1.2. Clima

El clima es templado-húmedo (Cm), con temperatura media anual entre 12 y 18 °C, mientras que la temperatura más cálida oscila cerca de los 22° y en el mes más frío entre -3 y 18 °C (García, 1998). La precipitación media anual fluctúa entre 1 500 y 1 200 mm (Vidal-Zepeda, 1990), mientras que en verano e invierno varía del 5 al 10.2 % del total anual, y en la parte más cálida no supera los 40 mm.

3.1.3 Suelo

El suelo es del tipo Feozem (INEGI, 2014) de color oscuro con posibilidad de tener horizonte B y contenido más o menos alto en materia orgánica; se desarrolla por acumulación de humus, además de ser ricos en calcio y magnesio (Vivanco *et al.*, 2010).

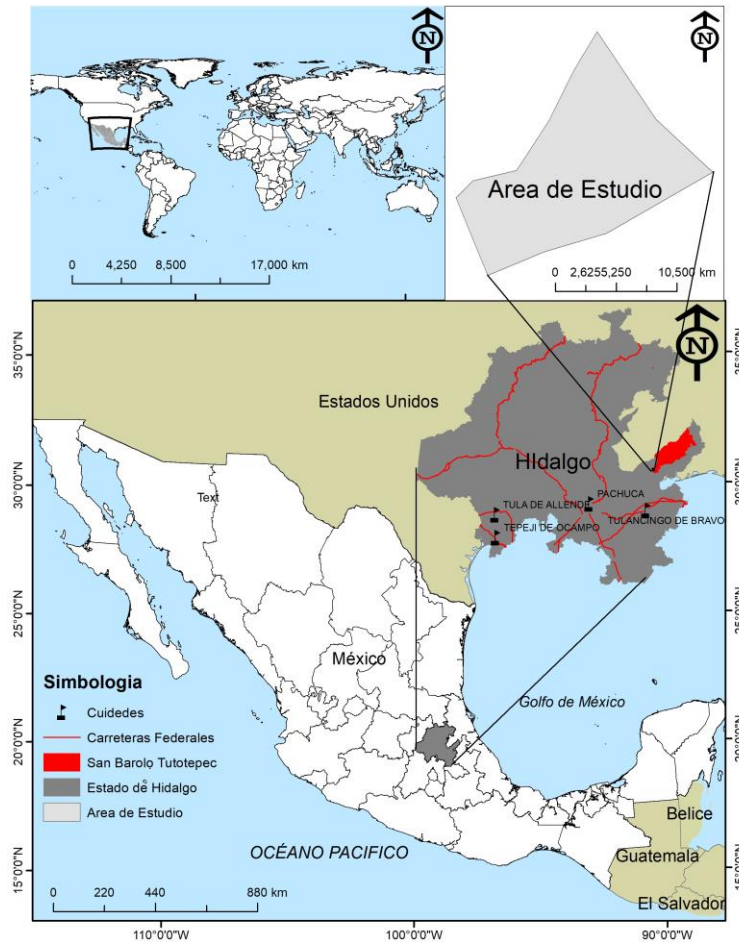


Figura 1. Mapa del área de estudio.

3.1.4 Vegetación

La vegetación del área de estudio es Bosque Mesófilo de Montaña (BMM). Rzedowski (1990) lo describe como un bosque denso que incluye árboles perennifolios y deciduos, árboles de diversa arquitectura, tamaño y forma de hojas; abundancia de epifitas, trepadoras leñosas y pteridofitas en general (Rzedowski, 1996). El periodo de carencia de follaje suele ser breve y se presenta en los meses más fríos del año (Rzedowski, 2006). En el **Cuadro 1** se describen algunas de las especies que se presentan en el área de estudio.

Cuadro 1. Descripción de las especies más abundantes en el área de estudio

Especie	Nombre común	Descripción
<i>Pinus patula</i> Schiede et Chamisso	Ocote, Pino llorón, Pino triste	Árbol de hasta 40 m de altura y 100 cm en diámetro, generalmente con un solo tronco, en rodales de dosel cerrado, la copa con forma cónica; corteza delgada, rojiza, cambiando con la edad a marrón grisáceo y áspera. Hojas triangulares en sección transversal. Conos cortos recurvados, color café claro, madurando en dos estaciones (Earle, 2020).
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenberg	Ocote, Ayacahuite, Pinabete	Especie de 45 m de altura y 200 cm de diámetro, fuste recto y copa piramidal. Corteza delgada, lisa y gris para árboles jóvenes, con la edad se vuelve áspera. Cinco hojas por fascículo, 10 a 15 cm de color verde brillante. Conos colgantes que crecen cerca de los extremos de las ramas principales, ligeramente curvados, casi cilíndricos, 15 a 40 cm (Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997).
<i>Cupressus bentharii</i> Miller	Sabino, Cedro blanco, Ciprés.	Árbol que alcanza los 25-30 m de altura. Corona piramidal. Corteza gruesa, marrón rojizo, con fisuras longitudinales. Follaje azul verdoso, ovado, muy apretado, generalmente con ápice largo y puntiagudo. Conos globosos, de aproximadamente 12 mm de ancho, azul verdoso, tornándose marrón oscuro cuando maduran, compuestas de 6 a 8 escamas, con alrededor de 75 semillas por cono (Vidakovic, 1991).
<i>Quercus laurina</i> Bonpland	Encino blanco, Encino laurelillo, Roble.	Encinos de 25 m de alto y diámetro 0.9 m en promedio. Se desarrollan en bosques templados con asociaciones de pino y oyamel entre 1 300 y 3 100 m de altitud; crecen en lugares de pendiente ligera. Semillas (bellotas) ovoides, de 15 a 17 mm de largo por 10 a 12.5 mm de diámetro, pardo-amarillentas, solitarias o por pares, sobre pedúnculos de 5 a 15 mm de largo (Valencia <i>et al.</i> , 2002).
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpland	Encino hoja ancha, Encino colorado, Encino prieto.	Árbol de 3 m hasta 15 m de altura, en algunas ocasiones hasta 30 m; tronco con un diámetro de hasta 1 m. Las hojas maduras tienen de 5 cm a 22 cm de largo por 2.5 cm a 14 cm de ancho. El fruto es anual o bianual, generalmente solitario o en pares. Su reproducción es sexual o asexual (Mora-Jarvio, 2006).
<i>Clethra mexicana</i> DC.	Aguacatillo, Jaboncillo, Pahuilla.	Árbol perennifolio de 8 a 15 m, en ocasiones 25 m de alto; diámetro 20 a 30 cm o casi hasta 1 m, corteza oscura, gruesa y profundamente fisurada, ramillas gruesas. Hojas de 10 a 15 cm de largo y de 5 a 12 cm de ancho, redondas o cuneadas, margen dentado, haz de color verde oscuro (González-Villarreal, 2003).

3.3. Medición de los componentes de la precipitación

3.3.1. Tamaño y forma de los colectores

Para la colecta de lluvia se emplearon colectores cilíndricos (Rodrigues *et al.*, 2016; Návar y Bryan, 1990), de aluminio con un diámetro de 15.5 cm y una altura de 22.3 cm, con una capacidad de volumétrica de 4.2 L.

3.3.2 Número de colectores

Para la colecta de lluvia, se colocaron 30 colectores en una superficie de 1.22 ha. En otros estudios como los realizados por Flores *et al.* (2013; 2016) utilizaron 60 colectores para una superficie de 0.48 ha.

3.3.3. Distribución de los colectores

Los colectores se distribuyeron de manera aleatoria en área de estudio, según lo propuesto por Cantú y González (2005), Návar *et al.* (2007), Flores *et al.* (2013); así como por estudios más recientes: Gómez-Tagle *et al.* (2015), del cual se sustentó la aplicación de esta distribución en el presente estudio.

3.4. Cuantificación de intercepción

Para la colecta de lluvia se evaluó un periodo de 24 meses equivalente a 426 días comprendidos en tres años (2018, 2019, y 2020), registrando nueve meses para el primer año (4 de abril al 31 de diciembre del 2018) mientras que para el próximo (2019) se evaluó completo (12 meses) y para el último año 2020 solo se evaluó del 1 de enero al 29 de marzo (89 días).

3.4.1. Colecta de lluvia bajo las copas

En la colecta de la precipitación que alcanza el suelo a través de las copas o los claros o por goteo de las hojas, ramas y fustes, fue captada por 30 colectores colocados bajo las copas de los árboles, las mediciones del volumen captado después de cada evento de lluvia, se realizaron con el apoyo de una probeta graduada de 250 mm.

3.4.2. Medición de precipitación total

Para estimar la precipitación total se distribuyeron 5 colectores en una parcela (15 m x 20 m) a 200 m del área de estudio, desprovista de vegetación o cualquier otro tipo de barrera que

impidiera el paso de la lluvia a los colectores; posteriormente, con una probeta (250 mm) se midió el volumen captado en cada uno de los colectores.

3.4.3. Intercepción de lluvia

La intercepción de lluvia fue cuantificada mediante la diferencia entre precipitación total (arriba del dosel) menos aquella precipitación colectada bajo las copas (precipitación directa) (Cantú y González, 2005; García *et al.*, 2018; Yáñez-Díaz *et al.*, 2014).

3.5. Variables ambientales

La temperatura (°C) y velocidad del viento (m/s) se midieron con un termómetro + anemómetro digital, para la duración (h) del evento se registró la hora de inicio y la hora en que terminó la lluvia, mediante la diferencia entre estas se obtuvo la duración del evento. La intensidad (mm/h) de lluvia se estimó mediante la suma total de lluvia por evento dividida entre la duración del evento. A las mediciones del volumen de lluvia se les tomó una muestra para el análisis de acidez con un medidor digital de pH portátil.

3.6. Obtención de datos dasométricos

Para la obtención de los datos dasométricos de todas las especies arbóreas, a partir de 5 cm de diámetro en adelante, se establecieron 6 sitios de muestreo de 1 000 m. Se utilizó un hipsómetro laser marca TruPulse modelo 360 para la medición de altura total (m), altura de fuste limpio (m) y radio de copa (m) (Este-Oeste), se determinó la longitud de copa (m) mediante la diferencia de la altura total (m) y la altura de fuste limpio (m); para la medición del diámetro normal (cm) a 1.30 m altura del pecho, se utilizó una forcípula marca HAGLOF.

3.7. Análisis estadístico

Para la estimación de la intercepción de lluvia y precipitación bajo las copas se hizo un análisis de regresión lineal en el programa estadístico R Core Team (2021). trabajando con el paquete ggplot2 y algunas de sus librerías (tidyverse, caret, broom, lmttest, nortest).

Los modelos linealizados que se probaron fueron de tipo logarítmico ($\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln X$) para estimar la intercepción de lluvia, utilizando como variable predictora la precipitación total (X); mientras que para la predicción de la precipitación bajo las copas (variable

dependiente Y) se utilizó como variable independiente (X) ambas variables transformadas a raíz cuadrada para el ajuste del modelo ($\sqrt{Y} = \beta_0 + \beta_1 \sqrt{X}$): ambos modelos se trabajaron al 95 % de confiabilidad con un conjunto de 180 datos observados en campo.

La bondad de los modelos fue analizada mediante la prueba de Kolmogorov Smirnov (KS) como lo hicieron Fleischbein et al. (2005) y Moein et al. (2016). Para la homogeneidad de varianza se utilizó la prueba Breusch Pagan (BP), mientras que para evaluar la autocorrelación se recurrió a la prueba de Durbin Watson (D-W).

3.8. Validación de los modelos de regresión

Los modelos se validaron utilizando los métodos: *Leave One Out Cross-Validation* (LOOCV), *Machine Learnig: k-fold validation* (validación cruzada) y *Repeated K-fold cross-validation* tomando en cuenta los criterios error cuadrático medio (RMSE), error cuadrático medio (MSE) y el coeficiente de determinación (R^2), este método para validación de los modelos fue utilizado también por Nyatuame y Agodzo (2018) para predecir la lluvia y la temperatura futura en la cuenca del Tordzie, Ghana.

Para determinar la relación entre la intercepción de lluvia y las variables climáticas (temperatura, duración, velocidad del viento e intensidad), se realizaron los análisis de correlación de Pearson y Spearman con ayuda del programa estadístico R-Studio (versión 4.1.1), con el fin de identificar cuales variables influyeron más en el proceso de intercepción de lluvia.

Se realizó también un análisis de regresión utilizando como variable dependiente la intercepción y como variable climática predictora temperatura, duración, velocidad del viento y días entre lluvias (variables transformadas a Dummy, 0 y 1). Se hizo la transformación de las variables climáticas a Dummy utilizando el promedio del conjunto de datos de cada variable dependiente, clasificando a todos aquellos valores menores al promedio con un cero (0), mientras que para los valores que fluctuaban por arriba del promedio se les clasificó como uno (1). El valor de intercepción que representaba cada valor de las variables climáticas se le nombró baja para los valores que fueran cero y alta para los valores clasificados como uno (1); este proceso se realizó en el paquete estadístico R-Studio versión 4.1.1. con la

librería (readr), el cual nos ayudó a determinar en qué condiciones se presenta la mayor cantidad de intercepción.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características dasométricas de las especies presentes

Se registraron seis especies arbóreas en el área de estudio, donde el 57 % del arbolado total pertenece al género *Pinus*, el cual está representado por *Pinus patula* y *Pinus ayacahuite*. *Pinus patula* fue la especie dominante (302 individuos ha⁻¹), además de haber presentado las mayores dimensiones en diámetro normal, altura total, y diámetro de copa con 25.5 cm, 17.44 m y 6.22 m, respectivamente.

El diámetro normal promedio para el género *Pinus* fue de 25 cm (± 10.51 desviación estándar), el coeficiente de variación (43 %) fue mayor para el caso de *Pinus patula* en la variable del diámetro normal (**Cuadro 2**), aunque con estos resultados no es posible detectar si hay datos atípicos o erróneos, pero se tuvo idea de la estructura del rodal.

El área basal calculada por hectárea fue de 21.48 m² ha⁻¹ con una densidad de 663 árboles por hectárea, principalmente de los géneros *Pinus* y *Quercus*.

Como dato adicional, se estimó la cobertura de copa. FONAM (2006) la define como la proyección ortogonal de las copas de los árboles sobre la superficie, es decir, hace referencia a la superficie del suelo que es cubierta por individuos de porte arbóreo de una o todas las especies. De las seis parcelas muestreadas se obtuvo un promedio de cobertura de copa de 1 665.50 m², su extrapolación por hectárea fue de 16 655.03 m².

El promedio de longitud de copa estimado para cada una de las especies fue de 9.37, 5.62, 4.30, 4.25 y 5.86 m para *Pinus patula*, *Pinus ayacahuite*, *Quercus laurina*, *Quercus crassifolia* y *Cupresus benthamii*, respectivamente, denotando que las copas más largas pertenecen a *Pinus patula*. Este factor podría influir en la cantidad lluvia interceptado por dicha especie.

Cuadro 2. Estadística descriptiva de las variables dasométricas para las especies *P. patula* (PP), *P. ayacahuite* (PA), *Q. laurina* (QL), *Q. crassifolia* (QC) y *C. benthamii* (CB).

		Media \pm ICM	Min	Max	0.05	0.10	0.25	M	0.75	0.90	0.95	Rango	DE	CV	DMA	RIC
PP	DN	24.55 \pm 1.54	8.00	62.00	12.50	14.00	18.00	22.00	28.60	39.00	45.00	54.00	10.51	0.43	7.41	10.60
	AT	8.08 \pm 0.44	6.00	33.00	4.00	4.80	6.20	8.00	9.10	12.00	13.10	18.20	2.97	0.37	2.37	2.90
	DC	3.11 \pm 0.21	1.00	9.00	1.50	1.80	2.00	2.70	3.80	5.00	6.00	8.00	1.47	0.47	1.04	1.80
	LC	9.37 \pm 0.51	1.50	22.00	3.50	5.00	7.20	9.20	11.40	13.20	14.50	20.50	3.50	0.37	3.26	4.20
PA	DN	15.34 \pm 2.05	4.00	44.00	8.00	8.30	11.50	15.00	18.25	20.00	23.90	40.00	6.67	0.43	5.93	6.75
	AT	8.90 \pm 0.87	2.50	18.00	4.12	6.00	7.25	9.00	10.45	12.24	12.57	15.50	2.80	0.32	2.22	3.20
	DC	2.48 \pm 0.28	1.20	6.00	1.50	1.70	2.00	2.10	3.00	3.76	4.00	4.80	0.92	0.37	0.59	1.00
	LC	5.62 \pm 0.62	0.80	9.80	2.51	3.60	4.30	5.40	7.00	8.00	9.00	9.00	1.99	0.35	2.08	2.70
QL	DN	9.24 \pm 0.69	4.00	7.00	5.00	5.00	6.00	8.25	12.00	15.00	16.00	20.00	4.02	0.43	4.45	6.00
	AT	6.79 \pm 0.34	2.00	7.00	3.56	4.00	5.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	2.02	0.29	1.48	3.00
	DC	1.78 \pm 0.12	0.80	7.00	1.00	1.00	1.20	1.80	2.00	2.50	3.23	4.20	0.74	0.41	0.59	0.80
	LC	4.30 \pm 0.28	0.60	7.00	2.00	2.40	3.00	4.05	5.23	6.50	7.00	8.90	1.65	0.38	1.56	2.20
QC	DN	3.13 \pm 3.03	5.00	37.00	5.50	7.00	8.00	10.00	16.00	25.00	28.50	32.00	8.25	0.63	4.45	8.00
	AT	7.08 \pm 1.10	3.00	15.00	3.25	4.00	4.75	7.00	8.75	9.00	13.30	12.00	2.99	0.42	2.97	4.00
	DC	2.29 \pm 0.46	0.90	6.00	1.00	1.20	1.50	2.00	2.70	4.00	5.00	5.10	1.26	0.55	0.74	1.20
	LC	4.25 \pm 0.84	0.80	10.00	1.90	2.00	2.60	3.60	5.25	7.10	8.55	9.20	2.27	0.54	2.37	2.70
CB	DN	20.8 \pm 4.06	17.00	26.00	17.60	18.00	20.00	20.00	21.00	24.00	25.00	9.00	3.27	0.16	1.48	1.00
	AT	10.4 \pm 1.02	9.50	11.50	9.60	9.70	10.00	10.00	11.00	11.00	11.40	2.00	0.82	0.08	0.74	1.00
	DC	2.32 \pm 0.37	2.00	2.60	2.00	2.00	2.00	2.50	2.50	2.60	2.58	0.60	0.29	0.13	0.15	0.50
	LC	5.86 \pm 3.04	3.50	9.20	3.60	3.70	4.00	5.00	7.60	8.60	8.88	5.70	2.45	0.42	2.22	3.60

Donde: DN = diámetro normal (cm); AT = altura total (m); DC = diámetro de copa (m); LC = longitud de copa (m); ICM = intervalo de confianza de la media; Min = mínimo; Max = máximo; 0.05, . . . , 0.95 = percentil; M = mediana 0.75, . . . , 0.95; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación; DMA = desviación media absoluta; RIC = rango intercuartílico.

4.2. Análisis de precipitación incidente

Durante los 24 meses de colecta (04/04/2018-29/03/2020), se registraron 180 eventos individuales de precipitación incidente, con un promedio de 1 443.43, 1 407.84, para los años 2018 y 2019, respectivamente; para el 2020 se registró una acumulación lluvia de 130.9 mm esto debido a que para dicho año solo se evaluaron tres meses. Los promedios de los primeros años (2018, 2019) se encuentran dentro de los rangos (1 200 a 1 500 mm) de precipitación media anual reportados por Vidal-Zepeda (1990). La suma (2 851.37 mm) de los dos primeros años sobrepasan a los 2 881.8 mm registrados por Gómez-Tagle *et al.* (2015) en su estudio de intercepción donde evaluó 242 eventos de lluvia comprendidos entre el 8 de agosto de 2010 al 23 de octubre del 2013 para un bosque secundario de pino-encino en la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán. Con respecto a lo anterior, en los regímenes pluviométricos publicados por Méndez *et al.* (2008) se afirma que en la región de estudio llueve entre 68 y 76 % más que en los bosques de Michoacán, lo que ayudaría a explicar porque en este estudio se encontró un promedio aproximado de 16.5 mm por evento, cifra que es mayor al promedio por el evento (11.9 mm) encontrados por Gómez-Tagle *et al.* (2015).

Flores *et al.* (2016) midieron intercepción en tres años diferentes: *Abies religiosa* (Kunth) Schltd. *et Cham.* (2009) 74 eventos, *Quercus spp.* (2010) 63 eventos y *Pinus hartwegii* Lind. (2011) 72 eventos; Fernández-Aldana *et al.* (2014) entre enero a octubre de 2013 registraron un total de 464 eventos; Barbosa *et al.* (2016) en 2013 registraron 350 eventos; Flores *et al.* (2013) tomaron 46 registros de lluvias durante 2007; Pérez *et al.* (2015) para *Pinus pinea* L. registraron 237 eventos y para *Cistus ladanifer* L. 200 durante 4 años (2010-2014); Cantú y González (2005) registraron un total de 70 eventos de lluvia durante el periodo de febrero de 1999 a julio de 2001; García *et al.* (2018) en su estudio de intercepción que duro 18 meses se colectaron 79 eventos de lluvia.

Un 34 % del total de eventos transcurridos durante el periodo de estudio oscilaron entre valores menores o iguales a 5 mm, siendo esto muy bajo con respecto a lo registrado por Návar *et al.* (2007) —para 52 eventos un 60 % menores a 5 mm, registrados en una comunidad vegetal de matorral espinoso tamaulipeco del nordeste de México— quienes señalan que esto puede deberse a que la comunidad vegetal se reportó una precipitación media anual de 849 mm, claramente menor al rango de precipitación media anual (1 200 a 1

500 mm) señalado por Vidal-Zepeda (1990) para la región del ejido de Cumbre de Muridores donde se desarrolló esta investigación (**Figura 1**).

Para el rango de precipitaciones de 5 a 10 mm se registró una acumulación 287.99 mm correspondientes al 22 % de la precipitación total sobre las copas, mientras que 10 a 20 mm representó un total de 19 % (510.97 mm) de precipitación incidente. La menor acumulación de lluvia se registró en el rango de 20 a 30 mm y correspondió al 9 % (394.06 mm). Los eventos mayores a 30 mm (29 eventos) acumularon lluvia equivalente a 1 638.58 mm o 16 % del total (**Figura 2**. Porcentajes y rangos de volumen de precipitación incidente registrados durante el 4 de abril del 2018 al 29 de marzo del 2020 en el ejido Cumbre de Muridores.), que es mayor a lo reportado por García *et al.* (2018) quienes mencionan 9 % (81 mm) para el rango mencionado, lo que puede deberse a que dicho estudio fue realizado en una zona semiárida cuya presencia de lluvia es más escasa (79 eventos en 18 meses) a diferencia del sitio estudiado en este trabajo (180 eventos en 24 meses).

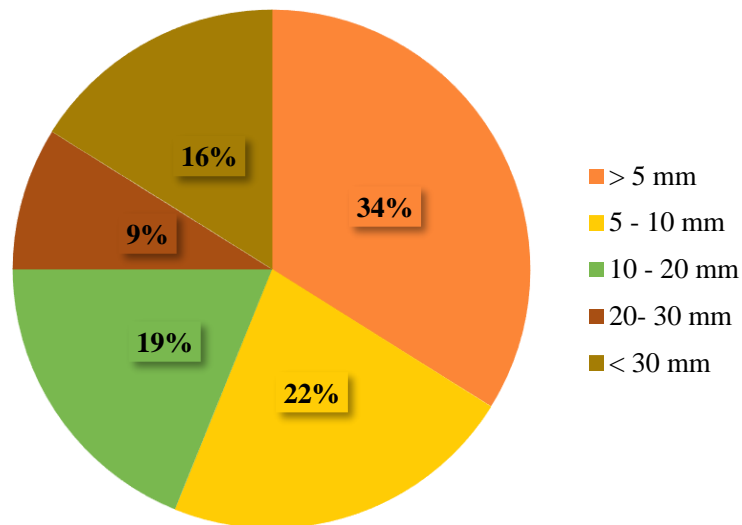


Figura 2. Porcentajes y rangos de volumen de precipitación incidente registrados durante el 4 de abril del 2018 al 29 de marzo del 2020 en el ejido Cumbre de Muridores.

La distribución anual de las precipitaciones registradas del 4 de abril del 2018 al 29 de marzo del 2020 mostró que para el año 2018 la cantidad de precipitación total acumulada fue de 1 433.43 mm superando por 25.59 mm al año próximo (2019) que en total registró una acumulación de 1 407.84 mm; cabe mencionar que para 2018 solo se evaluaron nueve meses

y para 2019 se midió el año completo. El mayor evento tuvo 141.22 mm registrados el 15 de octubre del 2018 (**Figura 3**). Durante el periodo de estudio la mayor cantidad de precipitación fue de 1 394.79 mm registrados durante el verano, seguida de los 935.83 mm medidos en el otoño, para primavera e invierno se observaron 440.05 y 201.5 mm respectivamente.

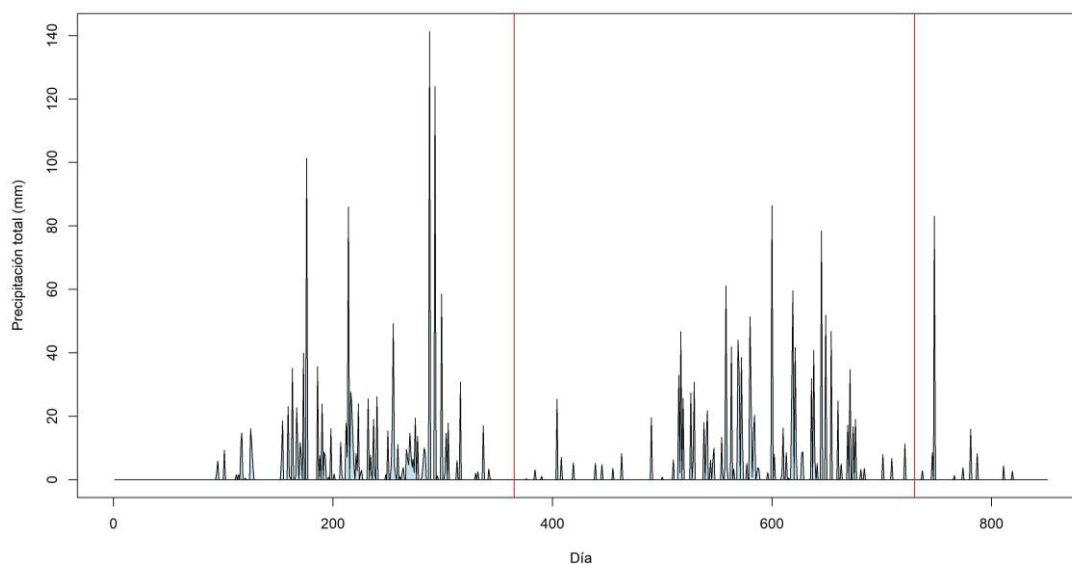


Figura 3. Distribución anual de la precipitación (mm) registrada entre el 4 de abril del 2018 al 29 de marzo del 2020 en un bosque mesófilo de montaña en el ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.

Durante los 24 meses de evaluación se presentó la mayor acumulación de precipitación en los meses junio, julio, agosto, septiembre y octubre con 481.94, 409.07, 480.32, 426.86 y 636.91 mm respectivamente (**Figura 4**). Esto coincidió con los meses (junio, agosto, septiembre, octubre) de mayor precipitación observados por Flores *et al.* (2013) en un matorral inerme espinoso en Atotonilco el Grande, Hidalgo.

El registro más bajo de precipitación (20.66 mm) para marzo (**Figura 4**) fue acorde con lo que reportó Vidal-Zepeda (1990) para la región del ejido Cumbre de Muridores San Bartolo Tutotepec Hidalgo, México, lugar donde se realizó la presente investigación; durante el mes más seco la precipitación es menor a 40 mm.

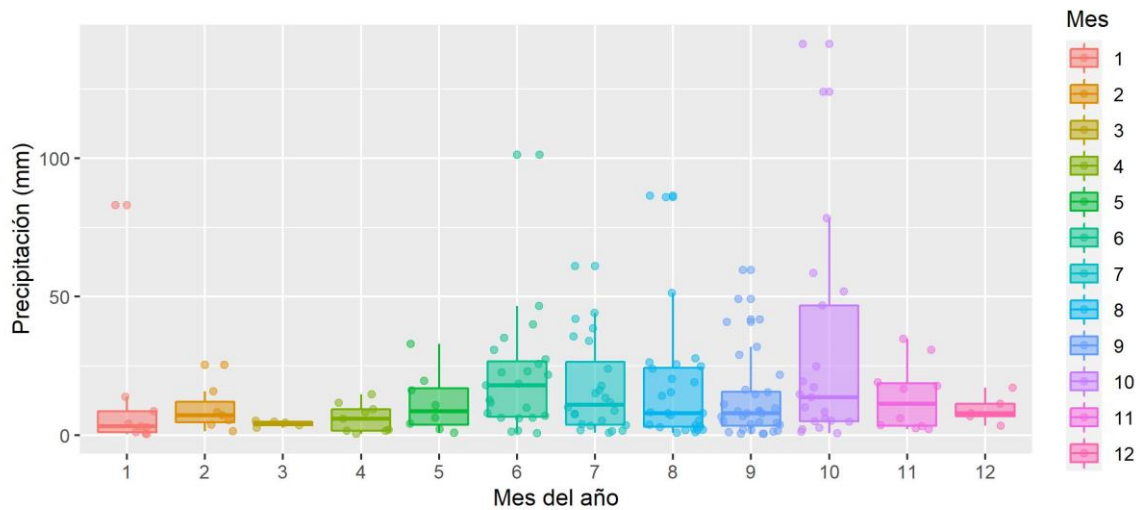


Figura 4. Precipitaciones diarias registradas durante 4 de abril del 2018 al 29 de marzo del 2020 en un bosque mesófilo de montaña en el ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.

4.3. Variables cuantitativas de precipitación

El promedio de duración por evento fue de 4.65 h, el cual resultó estar muy por debajo del promedio registrado por Iroume y Huber (2000) con 21.51 h, en la Reserva Forestal Malacahuello, Chile, para un rodal nativo (*Nothofagus alpina* Poepp. y Endl. y *Nothofagus dombeyi* Mirb.) y una plantación de *Pseudotsuga menziesii* Mirb. (evaluados durante julio (1998) hasta diciembre del mismo año).

La duración de los eventos a lo largo del periodo de evaluación registró un total de 837.6 h de lluvia distribuidas en 180 eventos, mostrando que durante los meses de febrero, marzo y diciembre los eventos fueron más largos. Durante el mes de mayo los tiempos de duración por evento fueron muy homogéneos distribuidos entre rangos de 0:30 h y 4:00 h. En el mes de octubre se presentó la mayor variación entre la duración de los eventos tomando valores de tiempo que van desde 0.58 hasta 60.16 h con intensidad de 0.45 a 9.95 mm/h (**Figura 5**) siendo estos valores mayores los observados por Fernández-Aldana *et al.* (2014) que reportan un total de 452.25 h con eventos en intervalos de duración 0.15 a 13.75 h con intensidad 6.47 ± 0.2 mm.

Los días entre lluvias permiten saber el promedio de días sin lluvia durante cada mes. Durante el mes de marzo el promedio es igual a diez días, indicando que durante este mes llueve aproximadamente cada diez días, lo contrario a meses como junio, julio, agosto y septiembre que presentan un rango de entre uno y dos días, y con forme transcurre el año aumenta en número de días sin lluvia (**Figura 6**).

La velocidad del viento se registró en 170 eventos medidos partir del 27 de abril del 2018 al 29 de marzo del 2020, los cuales se distribuyeron dentro de un intervalo de 0.7 a 1.5 m s⁻¹ y un promedio 0.7 m s⁻¹ para los meses febrero, marzo, abril, junio, agosto, septiembre, octubre y noviembre (**Figura 7**). Estos resultados son muy bajos al compararlos con Pérez *et al.* (2015) que reportan una velocidad media del viento observada durante los eventos de precipitación entre 1 y 3 m s⁻¹, con vientos mínimos y máximos que alcanzaron 0.2 y 9.2 m s⁻¹, respectivamente, para individuos de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer* en la provincia de Córdoba, España. Esto puede deberse a la densidad del arbolado (663 árboles por hectárea) y a la topografía accidentada, características que están presentes dentro y fuera del área donde se desarrolló el presente estudio, lo que pudo limitar el paso de las corrientes de aire.

El pH promedio de la precipitación neta fue de 9.84 mientras que para la precipitación incidente 10.31, considerándolos como alcalinos (**Figura 8**); contrario Santa-Regina *et al.* (1989) que reportan para un bosque de *Pinus sylvestris* de 35 años en la cuenca de Candelario, España un pH de 5.6 que es considerado por los autores como neutro. Calvo y Gómez (2002) definieron que la cantidad de deposición es alterada por los doseles del bosque, lo que modifica también el pH de la precipitación directa; sus valores promedio fueron de 6.2 para un bosque de pino-encino, de 6.3 para bosque de encino y de 6.2 para el bosque de pino. Los datos de pH en el presente estudio concuerdan con lo establecido por Calvo y Gómez (2002) que concluyen, que los doseles de coníferas muestran una tendencia a bajar el pH con respecto a otras especies.

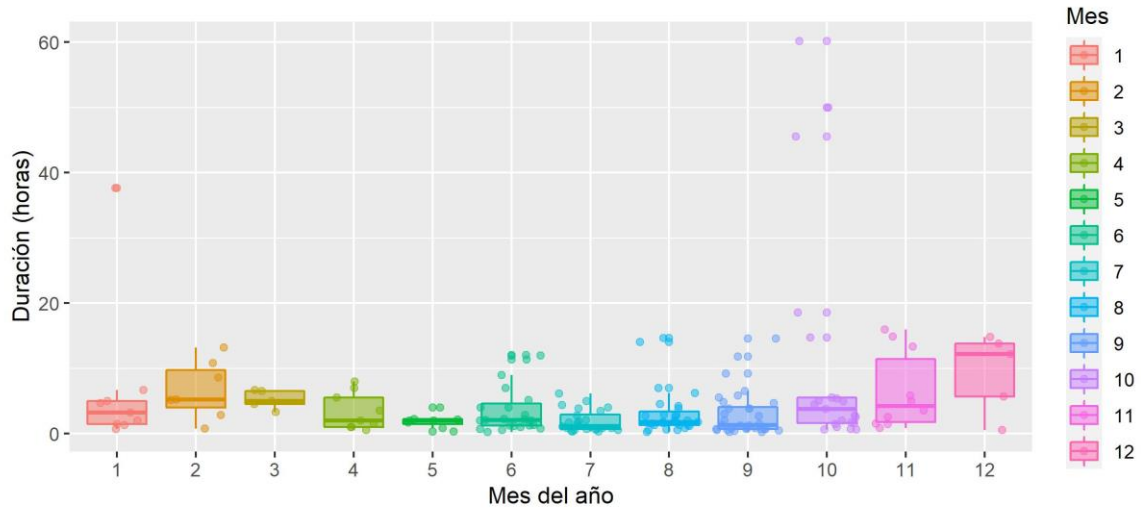


Figura 5. Duración de la precipitación por mes en un bosque mesófilo de montaña, en el ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.

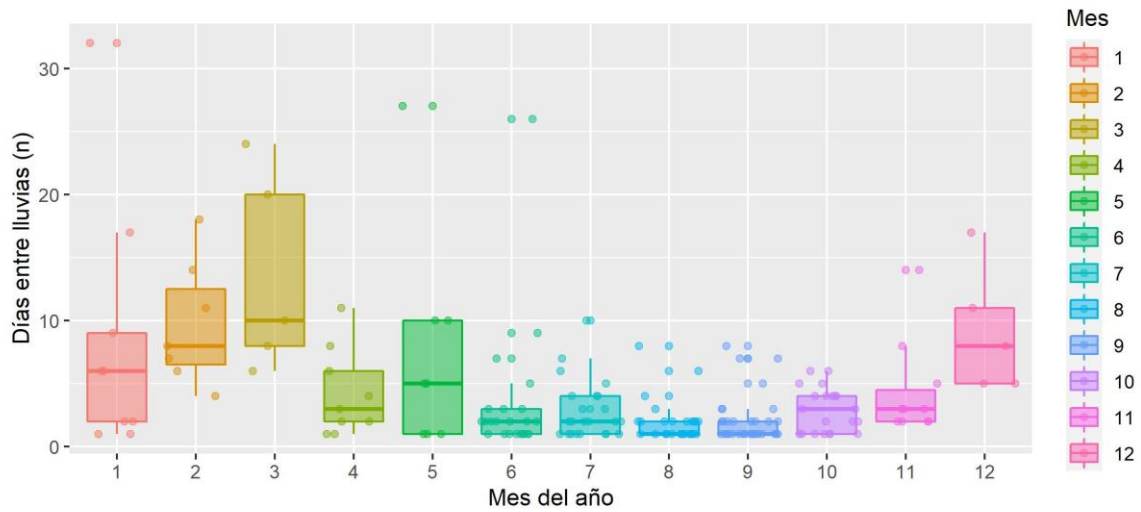


Figura 6. Días entre lluvias registrados en un bosque mesófilo de montaña, en el ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.

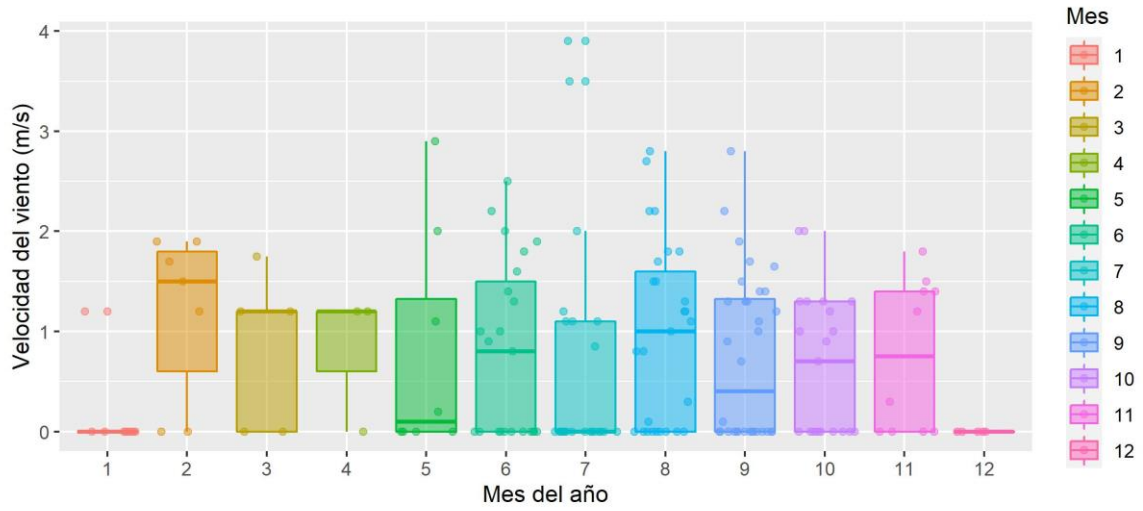


Figura 7. Velocidad del viento registrada en un bosque mesófilo de montaña, en el Ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.

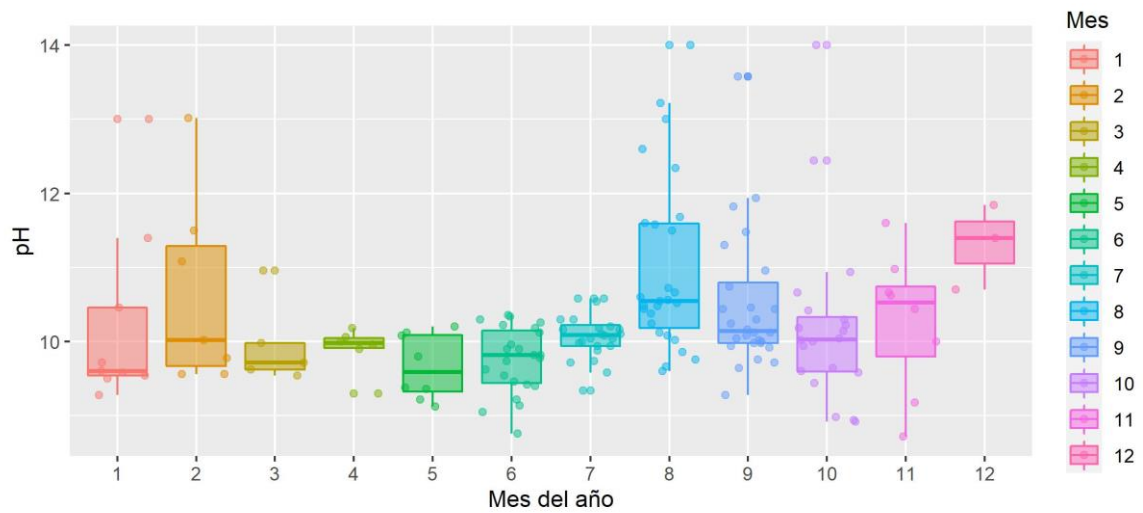


Figura 8. Grado de acidez o alcalinidad de lluvia en un bosque mesófilo de montaña, en el ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.

4.4. Correlación de Pearson y Spearman entre variables climáticas (duración, velocidad del viento, temperatura, intensidad e intercepción)

La relación entre la intercepción y otras variables climáticas durante el período de medición se muestra en la **(Figura 9)**. Se encontraron fuertes correlaciones positivas entre la intercepción y duración ($r = 0.43, p < 0.001, n = 180$), la intercepción y la intensidad ($r = 0.46, p < 0.001, n = 180$), así como la intercepción y la velocidad del viento ($r = 0.22, p < 0.01, n = 180$). Por el contrario, la temperatura no se correlacionó significativamente con la velocidad del viento ($r = 0.04, p > 0.05, n = 180$), mientras que Cheng *et al.* (2020) obtuvieron una correlación negativa entre la temperatura y la velocidad del viento ($r = -0.47, p = <0.001, n = 586$), y Staelens *et al.* (2008) reportaron que la velocidad del viento no se correlacionó significativamente con las variables (duración, intensidad, temperatura) en un bosque caducifolio dominado por *Quercus robur* L. y *Fagus sylvatica* L.

La precipitación total mostró una fuerte correlación positiva de Spearman (**Cuadro 3**), con la precipitación bajo las copas ($r = 0.990, p < 0.001$). Estos resultados son muy similares a los reportados por Gómez-Tagle *et al.* (2015) quienes reportan un coeficiente de correlación de Pearson alto ($r = 0.976, p < 0.001$) entre la precipitación directa y la precipitación bajo las copas.

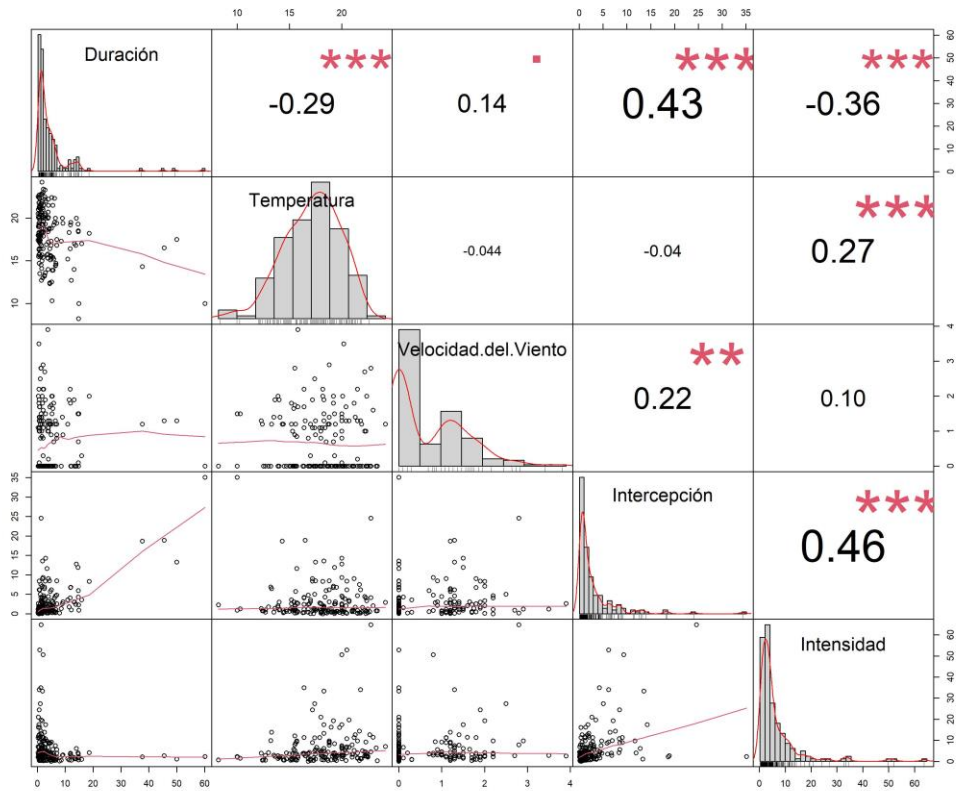


Figura 9. Análisis de correlación de Pearson entre la intercepción y el conjunto de variables climáticas. Donde; ** significa correlación significativa al nivel 0.01 ($p < 0.01$); ***significa una correlación significativa al nivel de 0,001 ($p < 0.001$).

Cuadro 3. Parámetros estadísticos de correlación de Spearman entre la intercepción y las variables climáticas, para un bosque mesófilo de montaña en el ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.

	D	T	Vv	I	IT	PT	PBC
D (h)	1.0000	-0.2900 [‡]	0.1400	0.4300 [‡]	-0.3600 [‡]	0.5500 [‡]	0.5600 [‡]
T (°C)	-0.2900 [‡]	1.0000	-0.0400	-0.0400	0.2700 [‡]	-0.0100	-0.0200
Vv (km/h)	0.1400	-0.0400	1.0000	0.2200 [‡]	0.1000 [‡]	0.2700 [‡]	0.2700 [‡]
I (mm)	0.4300 [‡]	-0.0400	0.2200 [‡]	1.0000	0.4600 [‡]	0.8300 [‡]	0.7700 [‡]
IT (mm/h)	-0.3600 [‡]	0.2700 [‡]	0.1000	0.4600 [‡]	1.0000	0.5300 [‡]	0.5100 [‡]
PT (mm)	0.5500 [‡]	-0.0100	0.2700 [‡]	0.8300 [‡]	0.5300 [‡]	1.0000	0.9900 [‡]
PBC (mm)	0.5600 [‡]	-0.0200	0.2700 [‡]	0.7700 [‡]	0.5100 [‡]	0.9900 [‡]	1.0000

Donde: D = duración en (h); T = temperatura (°C); Vv = velocidad del viento (m/s⁻¹); I = Intercepción (mm); IT = intensidad (mm/h); PT = precipitación total (mm); PBC = precipitación bajo las copas (mm); [‡] = relación significativa al 0.05.

4.5. Regresión Dummy

Los resultados mostraron que la intercepción promedio de lluvia cuando la duración del evento es baja es de 2.6199 mm. La intercepción promedio es de 3.7903 mm cuando la duración de la lluvia es alta, la pendiente (1.1704) de la correlación, es la diferencia de intercepción que hay entre un evento con diferencia alta entre días de lluvia y uno con diferencia baja entre días de lluvia. Lo anterior nos explica que entre mayor sea la duración del evento, mayor será la cantidad de lluvia interceptada (**Cuadro 4, Figura 10**).

Los resultados del análisis de la variable Dummy temperatura muestra que a mayor temperatura la cantidad de lluvia interceptada aumenta también. Para la velocidad el viento se encontró la misma relación con la intercepción (a mayor velocidad de viento mayor

intercepción de lluvia); la diferencia entre días con lluvia mostró que entre más días trascurren entre un evento y otro la intercepción será mayor.

Cuadro 4. Estadísticos de regresión Dummy para evaluar el efecto de variables climáticas sobre la intercepción de lluvia en un bosque mesófilo de montaña en el ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.

		Estimados	Error	T-valor	Pr(> t)	IC del coeficiente	
						2.5%	97.5%
Duración	β_0	2.6199	0.3932	6.6626	3.24E-10	1.5411	3.5186
	β_1	1.1704	0.7387	1.5844	1.15E-01	-0.5675	2.0856
Temperatura	β_0	2.5298	0.5010	5.0490	1.09E-06	1.5411	3.5186
	β_1	0.7590	0.6722	1.1291	2.60E-01	-0.5675	2.0856
Velocidad del Viento	β_0	2.4764	0.4610	5.3715	2.42E-07	1.5666	3.3861
	β_1	0.9945	0.6669	1.4911	1.38E-01	-0.3216	2.3107
Diferencia entre días de lluvia	β_0	2.6650	0.3923	6.7952	1.59E-10	1.8908	3.4393
	β_1	1.0313	0.7444	1.3853	1.68E-01	-0.4377	2.5004

IC = intervalo de confianza; β_0 = intercepto; β_1 = pendiente.

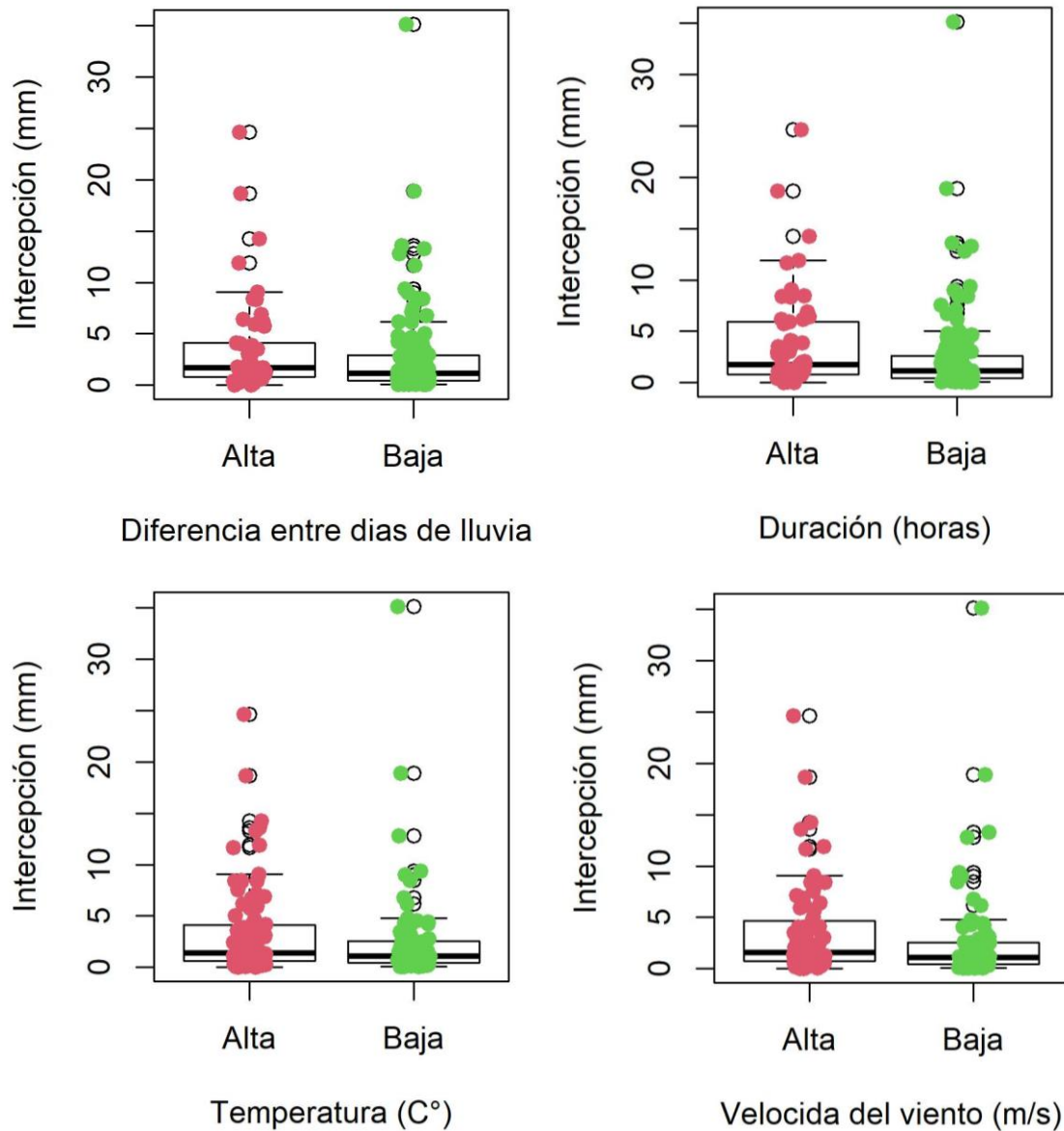


Figura 10. Intercepción de lluvia en función de variables Dummy; duración (a), velocidad del viento (b), temperatura (c), diferencia entre días de lluvia (d).

4.6. Análisis de intercepción de lluvia

Se presentaron 180 eventos de lluvia durante el periodo de colecta (24 meses), los cuales representan un total de 2 972.17 mm de lluvia incidente mientras que para la precipitación directa (precipitación bajo las copas) se registró un total de 2 441.02 mm durante el periodo de estudio, representando 82 % de la precipitación incidente, resultando así una pérdida por intercepción del dosel vegetal de 18 % el cual representa un valor de 531.15 mm.

La pérdida por intercepción obtenida en este estudio se encuentra dentro de los rangos reportados en la literatura para bosques: Gómez *et al.* (2015) reportaron una intercepción de 34 % en un bosque de *Pinus radiata* en la Patagonia, Chilena, y Pérez *et al.* (2015) en un bosque de *Pinus pinea* con alturas promedio de 9 m en el “Cabríl” España, reportaron una intercepción de 29.6 %.

Otros autores reportan valores similares para pinos, en otras condiciones diferentes: Flores *et al.* (2016) indican que la intercepción de lluvia en *Abies religiosa* (26.1 %, n = 74), *Quercus spp.* (21.7 %, n = 63) y *Pinus hartwegii* (19.2 %, n = 72). En otro estudio, realizado por Cantú y González (2005) las pérdidas por intercepción del dosel vegetal fueron estimadas en 18, 15 y 22 % para las especies de *Acacia berlandieri*, *Acacia rigidula* y *Diospyros texana* Scheele., respectivamente.

El análisis de regresión lineal para predecir intercepción de lluvia en función de precipitación total resultó ser significativo ($p < 0.05$). La precipitación total (modelo 1) logró explicar un 74 % ($R^2 = 0.74$, **Cuadro 5**) de la intercepción, esto valores son similares a los coeficientes ($R^2 = 0.5815$; $R^2 = 0.3883$; $R^2 = 0.4172$) obtenidos por Flores *et al.* (2016) indicados para oyamel, encino y pino. Mientras que la precipitación bajo las copas (modelo 2) alcanzó una explicación mayor ($R^2 = 0.993$, $p < 0.05$, **Cuadro 5**) estos resultados indican que entre mayor es la precipitación incidente hay más precipitación bajo las copas, de igual manera aumenta.

la cantidad de lluvia interceptada. Cantú y González (2005) indican que la lluvia que alcanza el suelo no es una fracción constante de lluvia total, que las lluvias débiles son más interceptadas.

$$\ln I = -1.341 + 0.820 * \ln PT \quad [1]$$

Donde:

Ln = logaritmo natural

I = intercepción (mm)

PT = precipitación total (mm)

$$\sqrt{PBC} = -0.115 + 0.941 * \sqrt{PT} \quad [2]$$

Donde:

PBC = precipitación bajo las copas (mm)

PT = precipitación total (mm)

Cuadro 5. Parámetros y estadísticos para los modelos de intercepción y precipitación bajo las copas, en un bosque mesófilo de montaña en el ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.

	C	Estimados	STD	T-valor	Pr(> t)	R ²	KS	BP	D-W
I	β0	-1.341	0.100	-13.360	<2e-16 ***	0.740	0.082	0.361	0.241
	β1	0.820	0.041	20.050	<2e-16 ***				
	β0	-0.115	0.027	-4.186	5.07e-05 ***				
PBC	β1	0.941	0.006	134.886	< 2e-16 ***	0.993	0.193	0.155	0.286

C = coeficientes; STD = error estándar; I = Intercepción de lluvia; PBC = precipitación bajo las copas; KS = Kolmogorov-Smirnov; BP = Breusch Pagan; D-W = Durbin Watson.

4.7. Pruebas de supuestos estadísticos básicos para validar los modelos

La varianza de los residuales se determinó a través de la prueba de Breusch Pagan, la cual demostró que hay una alta probabilidad (p -valor = 0.361, **Cuadro 5**). Esto indica que se cumple la hipótesis nula ($p < 0.05$) denotando que existe homocedasticidad (**Figura 11a, d**) lo cual indica que los residuos están más o menos ponderados.

Los residuales del modelo 1 y 2, para predecir intercepción, se distribuyen muy cercanos a la línea del cuantil empírico normal (**Figura 11b, e**), aunque se pueden observar algunas colas pesadas en los extremos que tienden a desviarse de dicha línea; sin embargo, la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov ($p = 0.082$, **Cuadro 5**) indica que dichos valores si tienden a una distribución normal.

El análisis de autocorrelación de los residuales en el caso de ambos modelos indicó la ausencia de autocorrelación (p -valor = 0.2635, **Cuadro 5**), lo que además es posible comprobar de forma gráfica (**Figura 11f, c**) puesto que los valores de correlación resultantes de los diferentes retrasos (*lag*) de la variable no son significativos, ya que no rebasan el umbral de correlación significativa ($p < 0.05$).

Se presenta una relación lineal para el modelo 1 y el modelo 2 (**Figura 12a, c**), demostrando una asociación lineal de la intercepción con la precipitación total y de la precipitación total con la precipitación bajo la copa. Esto se logró con la transformación de los datos a unidades a logarítmicas (modelo 1) y mediante raíz cuadrada (modelo 2).

Las observaciones potenciales para los modelos 1 y 2, se detectaron algunos datos influyentes potenciales, pero ninguno de ellos influye en la varianza de los coeficientes de regresión ni en la predicción.

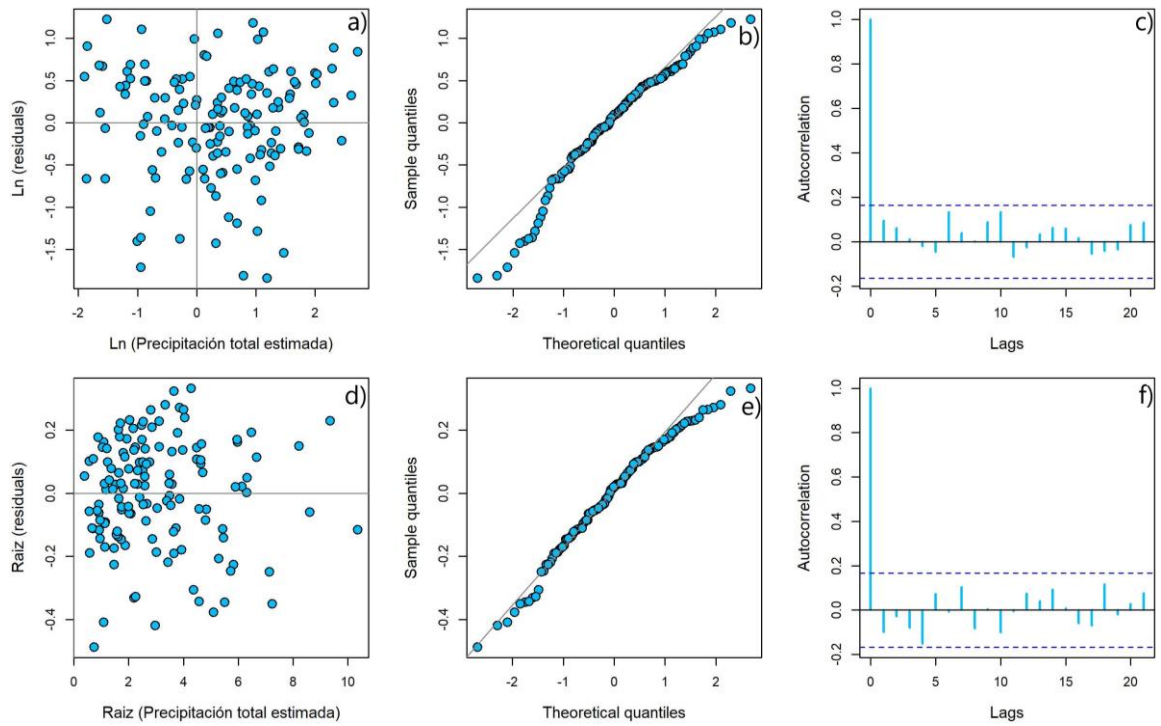


Figura 11. Varianza de residuales (a), cuantil teórico normal (b), autocorrelación (c), varianza de residuales (d), cuantil teórico normal (e), autocorrelación (f) para predecir precipitación bajo las copas e intercepción de lluvia para un bosque mesófilo de montaña en el ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.

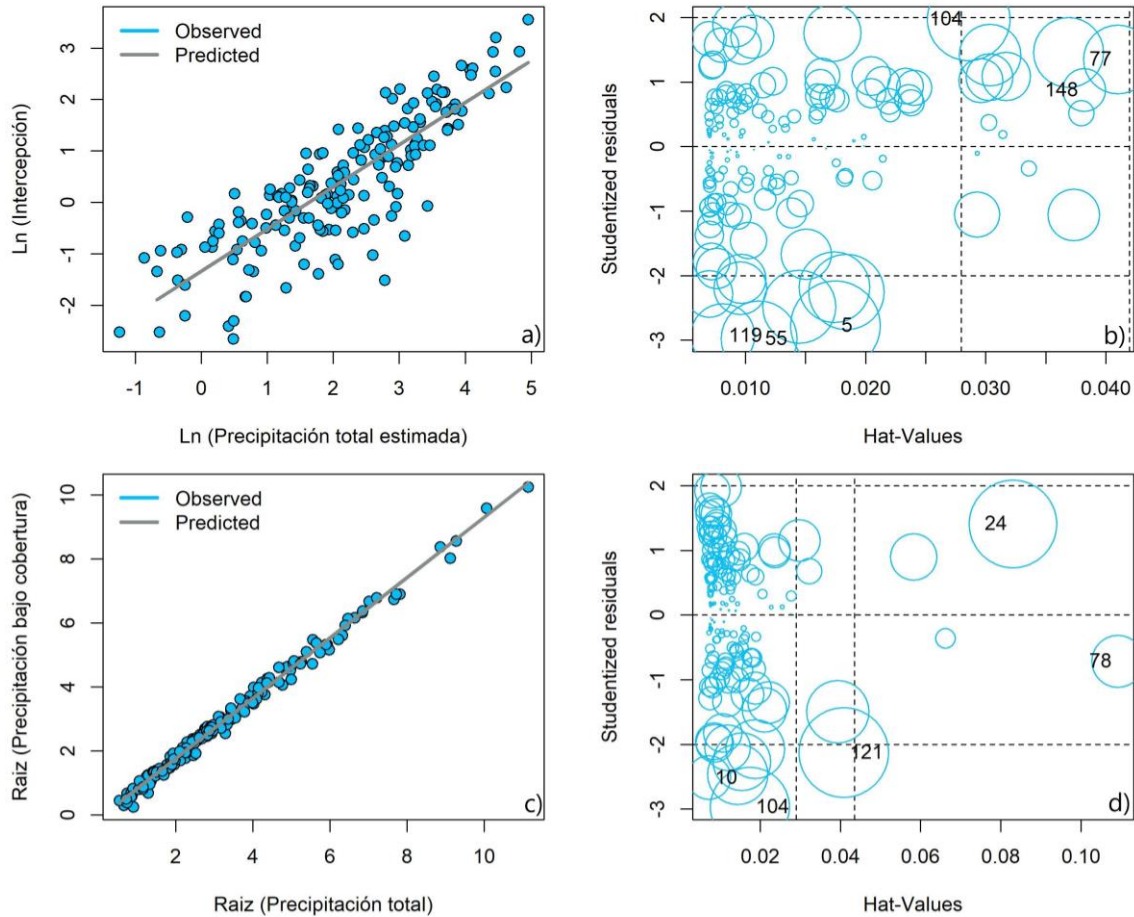


Figura 12. Intercepción de lluvia observada y estimada (a), observaciones influyentes y potenciales (b), precipitación bajo las copas observada y estimada (c), y observaciones influyentes y potenciales (d).

4.8. Validación de modelos para intercepción y precipitación bajo las copas

La validación de los modelos se realizó con *Leave one out cross validation* (LOOCV) con una muestra (test data) de 32 datos. Los resultados indican para los modelos de intercepción y precipitación bajo las copas, valores de RMSE (0.877 y 0.708, **Cuadro 6**), los cuales fueron mayores a los obtenidos en los modelos uno y dos: 0.836 y 0.169 (RMSE). Estos efectos fueron iguales para el error absoluto medio, siendo mayores los valores de la comprobación a los de los modelos generales. Para las observaciones (R^2) se registraron valores ligeramente más bajos en la validación (0.541 y 0.988, **Cuadro 6**) que en el modelo global.

El método *K-fold cross-validation* utilizado para validar los modelos de precipitación bajo las copas e intercepción con $n = 32$, obtuvo un RMSE para intercepción de 0.831 (**Cuadro 6**), ligeramente más bajo al del modelo global (0.836, **Cuadro 6**) pero con un $R^2 = 0.648$ (mayor que el modelo global); mientras que para el modelo 2 ocurrió lo contrario, el RSME obtenido en la validación (0.173, **Cuadro 6**) fue mayor al del modelo global (0.169, **Cuadro 6**), lo mismo que R^2 y MAE.

La repetición *K-fold cross-validation* muestra valores muy similares a los métodos *Leave one out cross validation* y *K-fold cross-validation* (LOOCV) (**Cuadro 6**).

Cuadro 6. Estadísticos de la validación de los modelos de intercepción (mm) y precipitación bajo las copas (mm) en un bosque mesófilo de montaña en el ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo.

	Validación	RMSE	R²	MAE
Intercepción	Ajuste del modelo	0.836	0.589	0.649
	Validación Cruzada (LOOCV)	0.877	0.541	0.708
	Validación Cruzada de K-fold	0.831	0.648	0.708
	Validación Cruzada Repetida de K-fold	0.841	0.720	0.711
Precipitación Bajo las Copas	Ajuste del modelo	0.169	0.991	0.136
	Validación Cruzada (LOOCV)	0.187	0.988	0.148
	Validación Cruzada de K-fold	0.173	0.993	0.145
	Validación Cruzada Repetida de K-fold	0.174	0.996	0.149

RMSE = Error cuadrático medio, MAE = Error absoluto medio.

5. CONCLUSIONES

La intercepción de lluvia fue de 18 % de la precipitación total anual, equivalente a 531.15 mm; esto indica que la intercepción es un componente importante en el balance hídrico ya que reduce la cantidad de agua que llega al suelo. La precipitación bajo la copa fue de 2 441.02 mm que es el 82 % de la precipitación total. Los análisis de correlación de Pearson y Spearman mostraron que las variables más influyentes en el proceso de la intercepción de lluvia fueron la duración, intensidad y la velocidad del viento, mientras que la temperatura no mostró estar relacionada significativamente con este proceso. Se obtuvieron dos modelos que describen adecuadamente los valores y el comportamiento de la intercepción de lluvia y la precipitación bajo las copas, lo que permite pronosticar los efectos de la cubierta vegetal sobre el ingreso de agua de lluvia en la zona de estudio.

6. REFERENCIAS

- Ablan, M., Márquez, R., Rivas., Molina, A. y Querales, J. (2011). Una librería en R para validación de modelos de simulación. *Ciencia e Ingeniería*, 32(2), 117-126
- Aussenac, G., & Boulangeat, C. (1980). Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillu (*Fagus sylvatica* L.) et des résineux (*Pseudotsuga meziessii* (Mirb) Franco). *Annals of Forest Science*. 32, 91–107.
- Barbosa, M. F., Fernández R. D. S., Rubio G. E., Sánchez C. I. y Contreras H. J. R. (2016). Dinámica del agua de lluvia en árboles de selva baja caducifolia, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 1179-1188.
- Bruijnzeel, L. A., (2000). Forest hydrology. In: Evans, J.C. (Ed.), *The Forests Handbook*. Blackwell, Oxford, 12. Pp. 301–343.
- Calvo, de A. R. y Gómez, R. M. X. 2002. Distribución espacial del ciclo del agua en suelos forestales con *Pinus radiata* de Galicia (No de España). *Revista Edafología*. 9 (1), 49-60.
- Cantú. S. I., y González, R. H. (2005). Pérdidas por intercepción de lluvia en tres especies de matorral submontano. *Ciencia UANL*, 8(1), 80-85.
- Cantú. S. I., y González, R. H. (2002). Propiedades hidrológicas del dosel de los bosques de pinoencino en el noreste de México. *Ciencia UANL*, 1, 72-78.
- Carlyle-Moses, D. E., y Gash, J. H. C. (2011). Rainfall interception loss by forest canopies. *Ecological Studies*, 216, 407-423.
- Cervantes, S. L. (1988). Intercepción de lluvia por el dosel en una comunidad tropical. *Ingeniería Hidráulica en México*, II época. 77, 5–17. Comisión Nacional del Agua

- (CONAGUA) - Subdirección General Técnica (2007). Regiones Hidrológicas, escala 1:250000. República Mexicana. México, D.F.
- Crockford, R. y Richardson, D. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 14, 2903-2920.
- Díaz-Fernández E, AF Gómez-Tagle. 2012. Intercepción pluvial en distintos ecosistemas de la cuenca hidrográfica de Cointzio, Michoacán. In Bravo M, G Barrera, ME Mendoza, JT Sáñez, F Bahena, R Sánchez eds. Contribuciones para el desarrollo sostenible de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Michoacán, México. UNAM *Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental*. p. 105-112.
- Dunkerley, D. (2000). Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: a brief review and evaluation of available research strategies. *Hydrological Processes*, 14. 669–78.
- Earle, C. J. (2020). *Pinus patula*. The Gymnosperm Database.
- Farjon, A., J. A. y Styles, T. B. (1997). Guía de campo de los pinos de México y América Central. Royal Botanic Gardens, Kew University of Oxford. Pp. 151.
- Fernández-Aldana, C. A., Noriega-Ortega, J. E., Durán-Bautista, E. H. y Suárez-Salazar, J. C. (2014). Intercepción de lluvia en diferentes especies en arreglos agroforestales en la Amazonia Colombiana. *Revista Momentos de Ciencia*, 11 (1). 28-34.
- Fleischbein, K., Wilcke, K., Goller, R., Boy, J., Valarezo, C., Zech, W. y Knoblich, K. (2005). Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: effects of canopy properties. *Hydrological Processes*, 19. 1355-1371.
- Flores, A. E., Guerra, de la C. V., Terrazas, G. G., Carrillo, A. F., Islas, G. F., Acosta, M. M. y Buendía, R. E. (2016). Intercepción de lluvia en bosques de montaña en la cuenca del río Texcoco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 65-76.

- Flores, A. E., Becerra, L. F., Buendía, R. E., Carrillo, A. F., Terrazas, G. G. H., Pineda, O. T., y Acosta, M. M. (2013). Intercepción de lluvia por matorral inerme espinoso en Atotonilco el Grande, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(2), 285–298.
- Fondo Nacional del Ambiente-Perú (FONAM). (2006). Propuesta final para una definición peruana de bosques a ser utilizada en proyectos de uso de la tierra, cambio de uso y silvicultura bajo el protocolo de kyoto durante el primer periodo de compromiso, 145.
- Forgeard, F., Gloaguen, J. C., y Touffet, J. (1980). Interception des précipitations et apport au sol délements minéraux par les eaux de pluie et les pluviollessivats dans une hetraie atlantique et dans quelques peuplements resinex en Bretagne. *Annals of Forest Science*, 37. 53–71.
- García, E. (1998). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Climas (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.
- García E., M. (2006). Efecto de la estructura de la copa en la partición de lluvia de tres especies arbustivas en clima semiárido. Tesis Doctoral, Universidad de Almería, España. 438 p.
- García, L.Y. W., Cantú S. I., González R. H., y Yáñez D. M. I. (2018). Pérdidas por intercepción de lluvia en el Matorral Espinoso Tamaulipeco bajo diferentes intensidades de raleo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(49), 149–164.
- Gash, J. H. C., Lloyd, C.R., y Lachaud, G. (1995). Estimating sparse rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology* 170 (95), 79–86.
- Gómez, F., Tarabini, M., Buduba, C. G., y La Manna, L. (2015). Distribución de la precipitación en un bosque de *Pino radiata* con manejo silvopastoril vs. Forestal tradicional. VIII Congreso Internacional de sistemas agroforestales y III Congreso Nacional de sistemas silvopastoriles. Iguazú, Argentina. 518-521.

- Gómez-Tagle, Ch. A., Gómez-Tagle, R. A. F., Ávila, O, J. A. y Bruijnzeel, L. A. (2015). Partición de la precipitación en un bosque tropical montano de pino-encino en el centro de México. *Bosque*, 36(3), 505–518.
- González-Villarreal, L. M. (2003). Flora del bajío y de regiones adyacentes. Flora fanerogámica del valle de México. Pp. 10.
- Grunicke, S., Queck, y R., Bernhofer, C. (2020). Long-term investigation of forest canopy rainfall interception for a spruce stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 292, 108–125.
- Haefner, J. (2005). Modeling Biological Systems: Principles and Applications, Springer, New York. P. 463.
- Herwitz, S. R., (1985). Interception storage capacities of tropical rainforest canopy trees. *Journal of Hydrology*, 77. 237–252.
- Horton, R. E. (1919). Rainfall interception. *Mon Weather Rev.* 47, 608–623.
- Holwerda, F., Bruijnzeel, L. A., Muñoz-Villers, L. E., Equihua, M., y Asbjornsen, H. (2010). Rainfall and cloud water interception in mature and secondary lower montane cloud forests of central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, 384(1-2), 84–96.
- Huber, A., e Iroume, A. (2001). Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *Journal of Hydrology*, 248, 78–92.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II. escala: 1:250000. edición: 2. Aguascalientes, Ags., México.
- Iroume, A. y Huber, A. (2000). Intercepción de las lluvias por la cubierta de bosques y efecto en los caudales de crecida en una cuenca experimental en Malalcahuello, IX Región, Chile. *Bosque*, 21(1), 45-56.

- Kittredge, J. (1948). *Forest influences. The effects of woody vegetation on climate, water, and soil, with applications to the conservation of water and the control of floods and erosion.* Dover Publications, Inc. New York, NY, USA. 349 p.
- Levia, D. F., Van Stan II, J. T., Mage, S. M., y Kelley-Hauske, P. W. (2010). Temporal variability of stemflow volume in a beech-yellow poplar forest in relation to tree species and size. *Journal of Hydrology*, 380(1-2), 112-120.
- Gerrits, A. M. J., and Savenije, H. H. G. (2011), Forest Floor Interception, in *Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions*, edited by D. F. Levia, D. E. Carlyle-Moses, T. Tanaka, pp. 445–454, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany.
- Lida, S., Tanaka, T., y Sugita, M. (2005). Change of interception process due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. *Journal of Hydrology*, 315. 154–166.
- Link, T. E., Unsworth, M., y Marks. D. (2004). The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(3–4), 171–91.
- Llorens, P., Poch, R., Latron, J., y Gallart, F. (1997). Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area I. Monitoring design and results down to the event scale. *Journal of Hydrology*, 199, 331-345.
- López, L. A. A. 2007. Intercepción de la vegetación herbácea de ambiente semiárido y su efecto en la relación intensidad-duración-frecuencia de la precipitación. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, Qro., México. 173 p.
- Luna-Cavazos, M., Romero- Manzanares, A. y García- Moya, E. (2008). Afinidades en la flora genérica de piñonares del norte y centro de México: un análisis fenético. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 79, 449-458.

- Marin, C. T., Bouten, W., y Sevink, J. (2000). Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology*, 237, 40–57.
- Mayer, D. G. y Butler, D. G. (1993). Statistical validation, *Ecological Modelling*, 68, (1-2), 21-32.
- Mecca, J. (2008). Análisis y modelación del comportamiento hidrológico de las lagunas Don Tomás y Bajo Giuliani, Santa Rosa, La Pampa. Tesis de maestría en Ciencias Hídricas. Universidad Nacional de La Pampa. 145 p.
- Méndez, J., Návar, C. J. J. y González, O. V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas*, 65(900), 38–55.
- Moffat, A. J., Kvaalen, H., Solberg, S., & Clarke, N. (2002). Temporal trends in throughfall and soil water chemistry at three Norwegian forests, 1986–1997. *Forest Ecology and Management*, 168 (1-3). 15-28.
- Mora-Jarvio, M. A. (2006). Patrones morfológicos foliares de *Quercus crassifolia* (Fagaceae) a través de México. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. Distrito Federal, México. 73p.
- Moreno, F. B., Fernández, R. D. S., Granados, R. E., Sánchez, C. I., y Contreras H. J. F. (2016). Dinámica del agua de lluvia en árboles de selva baja caducifolia. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 1179–1188.
- Návar, J., & Bryan, R. (1990). Interception loss and rainfall redistribution by three semi-arid growing shrubs in northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*, 115. 51–63.
- Návar, C. J., Méndez, G. J., y González, R. H., (2007). Intercepción de la lluvia en especies de leguminosas del nordeste de México. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 61-68.

- Nyatuame, M., & Agodzo, S. K. (2018). Stochastic ARIMA model for annual rainfall and maximum temperature forecasting over Tordzie watershed in Ghana. *Journal of Water and Land Development*, 37(1), 127-140.
- Peck, A., y Mayer, H. (1996). Einfluss von Bestandesparametern auf die Verdunstung von Waldern. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*. 115, 1–9.
- Pérez, A. R., Moreno, P. M. F., y Roldán, C. J. (2015). Intercepción de la lluvia en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Citrus ladanifer*: efecto de diferentes parámetros climáticos. *Jornada de Ingeniería del Agua*, 1, 1-10.
- Perry, J. P. Jr. 1991. The pines of México and Central America. Timber Press. Portland, Oregon, USA. 231 p.
- Potter, C. S., Ragsdale, H. L., y Swank, W. T. (1991). Atmospheric deposition and foliar leaching in a regenerating southern Appalachian Forest canopy. *The Journal of Ecology*, 79(1). 97-115.
- Prado, F. A., Hernández, S. L., y Ventura, R. E. (2007). Intercepción de lluvia por *Lysiloma microphylla* en el municipio de Querétaro, Qro. Universidad Autónoma de Querétaro. 1, 1-5.
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL, <https://www.R-project.org/>.
- Rodrigues, V. A., Canales, A. R., Lucas-Borja, M. E., Tarjuelo, J. M., García, M. F. A., y Santos, J. B. (10-12 de febrero del 2016). Evaluation of rainfall interception by the *Pinus halepensis* Mill canopy, with three kinds of diameter. Simposio nacional de ingeniería hortícola. Sociedad Española de Ciencias Hortícolas.
- Rutter, A. J., Kershaw, K. A., Robins, P. C., & Morton, A. L. (1971). A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from Observations in a Plantation of Corsican Pine. *Agricultural Meteorology*, 9. 367–84.

- Rutter, A. J., & Morton, A. J., (1977). A predictive model of rainfall interception in forests. III. Sensitivity of model to stand parameters and meteorological variables. *Journal of Applied Ecology*, 14, 567–588
- Rzedowski, J. (1990). Vegetación Potencial. Atlas Nacional de México. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México. Vol II. IV.8.2.
- Rzedowski, J. (1996). Análisis preliminar de la flora vascular de los bosques mesófilos de montaña de México. *Acta Botánica Mexicana*, (35), 25 - 44.
- Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 1, 328-339
- Santa-Regina, I., Gallardo, J. F., San Miguel, C., y Moyano, A. (1989). Intercepción, pluviolavado y escorrentía cortical en una plantación de *Pinus sylvestris* de la Cuenca de Candelario (centro-oeste de España). *Bosque*, 10(1–2), 19–27.
- Sopper, W. E., y Lull, H. W. (29- 10 de septiembre del 1967). Forest hydrology: Proceedings of a National Science Foundation Advanced Science Seminar held at the Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania. *Pergamon Press*. 813 p.
- Staelens, J., Schrijver, A. D., Verheyen, K., & Verhoest, N. E. C., (2008). Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrologic Process*, 22, 33–45.
- Sterman, J. D. (2000). Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world, McGraw Hill, New York.
- Tamez, C. P. (2018). Pérdidas por intercepción en cuatro especies del matorral en Linares, N. L. Tesis de Maestría en Ciencias Forestales. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, Nuevo León, México. 90 p.
- Tedeschi, L. (2006). Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems Review*, 89, (2-3), 225-247.

- Teklehaimanot, Z., y Jarvis, P. G., (1991). Direct measurement of evaporation of intercepted water from forest canopies. *Journal of Applied Ecology*, 28. 603–618.
- Valencia, A. S., Gómez-Cárdenas M. y Becerra-Luna F. (2002). Catálogo de encinos del estado de Guerrero, México. Libro Técnico No. 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México, D.F. Pp. 180.
- Vidakovic, M. (1991). *Cupressus benthamii*. The Gymnosperm Database.
- Vidal-Zepeda, R. (1990). Precipitación media anual. Atlas Nacional de México Escala 1 :4000000. Instituto de Geografía UNAM. México. 2. 4. 6.
- Vivanco, J.C., Bojórquez, J.L., Murray, R. M., Nájera, O., Hernández, A., y Flores, F. (2010). Características de los principales suelos de la cuenca del río Mololoa, Tepic, Nayarit, México. *Cultivos Tropicales*, 31(1), 32–40.
- Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2, 184-194.
- Wainwright, J. y Mulligan, M. (2004) Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity, John Wiley and Sons, Chichester, 272-278.
- Yáñez-Díaz, M. I., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H., y Uvalle-Sauceda, J. I. (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.