



UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA
PROGRAMA DE MAESTRÍA

**INTERCEPCIÓN DE LLUVIA POR DOSEL EN PINO (*Pinus hartwegii*) Y
OYAMEL (*Abies religiosa*) MEDIANTE NUBE DE PUNTOS**

TESIS DE GRADO

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

Presenta:

I.R.N.R Bolaños Sánchez Claudia

bajo la supervisión de:

Dr. J. Víctor Prado Hernández



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DIRECCION DE SERVICIOS ESCOLARES
COMISION DE EXAMENES PROFESIONALES



“Enseñar la explotación de la Tierra, no la del hombre”

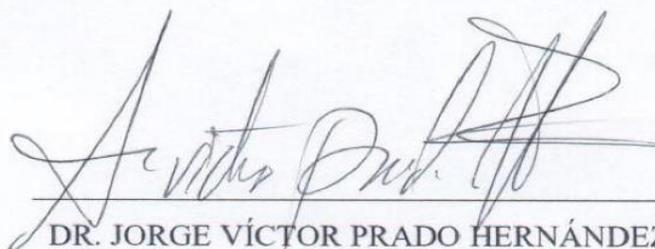
Chapingo, Estado de México, diciembre de 2018

INTERCEPCIÓN DE LLUVIA POR DOSEL EN PINO (*Pinus hartwegii*) Y OYAMEL (*Abies religiosa*) MEDIANTE NUBE DE PUNTOS

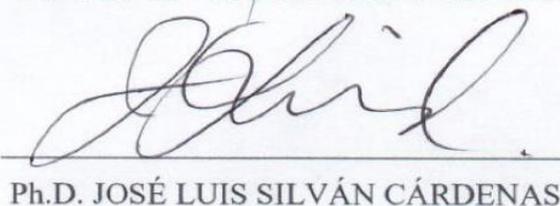
Tesis realizada por BOLAÑOS SÁNCHEZ CLAUDIA bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRICOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

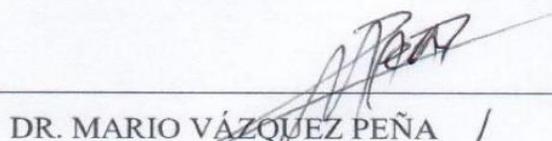
DIRECTOR:


DR. JORGE VÍCTOR PRADO HERNÁNDEZ

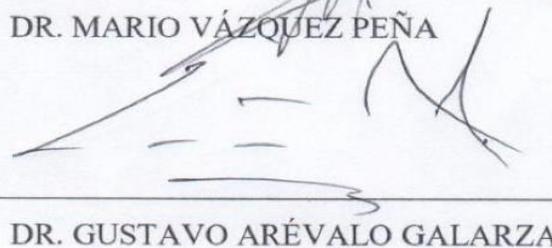
CO-DIRECTOR:


Ph.D. JOSÉ LUIS SILVÁN CÁRDENAS

ASESOR:


DR. MARIO VÁZQUEZ PEÑA

ASESOR:


DR. GUSTAVO ARÉVALO GALARZA

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
DEDICATORIA.....	ix
DATOS BIOGRÁFICOS	x
RESUMEN GENERAL	xi
GENERAL ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	13
1.1 Justificación	16
1.2 Hipótesis.....	17
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 General.....	17
1.3.2 Particulares.....	18
1.4 Organización del documento	18
1.5 Referencias.....	19
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....	23
2.1 Primeras investigaciones en intercepción de lluvia	23
2.2 Investigaciones internacionales de intercepción de lluvia: Nuevos enfoques y perspectivas	25
2.3 Investigaciones nacionales de intercepción de lluvia por dosel en bosques de coníferas	28
2.4 Referencias	29
CAPÍTULO 3. INTERCEPCIÓN DE LLUVIA POR DOSEL EN PINO (<i>Pinus hartwegii</i>) Y OYAMEL (<i>Abies religiosa</i>).....	33

3.1 Resumen	33
3.2 Abstract	34
3.3 Introducción	34
3.4 Materiales y métodos	35
3.4.1 Descripción del sitio de estudio	35
3.4.2 Caracterización de parcelas experimentales	36
3.4.3 Instrumentación para los componentes de la Intercepción	37
3.4.4 Diseño experimental	38
3.5 Resultados y discusión	40
3.5.1 Características dasométricas de las especies a nivel parcela	40
3.5.2 Características de los eventos de precipitación	40
3.5.3 Intercepción de lluvia y sus componentes	42
3.6 Conclusiones	46
3.7 Agradecimientos	47
3.8 Referencias	47
CAPÍTULO 4. ESTIMACIÓN DE INTERCEPCIÓN DE LLUVIA EN PINO (<i>Pinus hartwegii</i>) Y OYAMEL (<i>Abies religiosa</i>) UTILIZANDO MODELOS ANALÍTICOS Y NUBES DE PUNTOS	52
4.1 Resumen	52
4.2 Abstract	53
4.3 Introducción	53
4.4 Teoría	55
4.4.1 Modelo analítico de Gash (1979)	55
4.4.2 Modelo analítico de Gash modificado por Valente <i>et al.</i> (1997)	57
4.3 Materiales y Métodos	59

4.3.1 Sitio de estudio	59
4.3.2 Instrumentación	59
4.3.3 Parámetros meteorológicos	60
4.3.4 Parámetros de la estructura del dosel.....	62
4.3.5 Implementación de los modelos.....	66
4.3.6 Validación de los modelos	67
4.4 Resultados y discusión	68
4.4.1 Intercepción de lluvia, flujo de traslocación y cortical	68
4.4.2 Parámetros meteorológicos	69
4.4.3 Parámetros de estructura de dosel	70
4.4.4 Desempeño de los modelos considerados.....	71
4.4.5 Análisis de sensibilidad	75
4.5 Conclusiones	76
4.6 Agradecimientos	77
4.7 Referencias	77
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
5.1 Conclusiones	85
5.2 Recomendaciones	87

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 3	Página
Figura 1. Localización del área de estudio	36
Figura 2. Instrumentación para determinar el Índice de Área Foliar	37
Figura 3. Arreglo general de la instrumentación en la parcela experimental de <i>P. hartwegii</i> para el flujo de traslocación y cortical, incluyendo la vista ortogonal de la proyección de copas.	39
Figura 4. Arreglo general de la instrumentación en la parcela experimental de <i>A. religiosa</i> para el flujo de traslocación y cortical, incluyendo la vista ortogonal de la proyección de copas.	39
Figura 5. Flujo de traslocación en los 13 sitios de medición por tamaño de evento de lluvia, para <i>P. hartwegii</i> (A) y <i>A. religiosa</i> (B).	45
Figura 6. Intercepción de lluvia por dosel como función de la precipitación incidente (P, mm) en <i>P. hartwegii</i> (A) y <i>A. religiosa</i> (B).	46
CAPÍTULO 4	
Figura 1. Diagrama de flujo del método propuesto para el fraccionamiento de la nube de puntos por clases.	64
Figura 2. Diagrama de flujo para la normalización de la nube de puntos.	65
Figura 3. Intercepción de precipitación acumulada (mm) para los eventos de parametrización y validación	75
Figura 4. . Análisis de sensibilidad de los parámetros para los modelos a) Gash (1979) y b) Gash modificado por Valente et al. (1997). No anclar las figuras y sus títulos en las páginas porque se dificulta la corrección del escrito.	76

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 3

Página

Cuadro 1. Estadísticas de las características dasométricas más importantes para ambas parcelas experimentales.....	40
Cuadro 2. Caracterización de los eventos de precipitación registrados	41

CAPÍTULO 4

Cuadro 1. Componentes de la intercepción de lluvia para el modelo analítico de Gash (1979).....	56
Cuadro 2. Componentes de intercepción de lluvia para el modelo Gash modificado por Valente et al. (1997)	58
Cuadro 3. Especificaciones principales de los drones.....	60
Cuadro 4. Parámetros y constantes utilizadas en el cálculo de la evaporación (E).	61
Cuadro 5. Configuración de vuelos.	63
Cuadro 6. Condiciones meteorológicas del grupo de eventos de precipitación para la parametrización de los modelos.	67
Cuadro 7. Condiciones meteorológicas del grupo de eventos de precipitación para la validación de los modelos.	67
Cuadro 8. Cuantificación de los componentes de la intercepción de los 20 eventos de lluvia.	68
Cuadro 9. Valores estimados de los parámetros de la estructura de dosel.	71
Cuadro 10. Valores de la intercepción observada (I obs) y modelada (I mod) para <i>P. hartwegii</i> con las combinaciones de los parámetros meteorológicos y de dosel. ..	72
Cuadro 11. Valores de la intercepción observada (I obs) y modelada (I mod) para <i>A. religiosa</i> con las combinaciones de los parámetros meteorológicos y de dosel. ...	74

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico otorgado para poder realizar mis estudios de maestría.

A mi alma mater, la Universidad Autónoma Chapingo, por permitirme concluir una etapa más en mi vida profesional.

Al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, al departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, a la división de Ciencia Forestales y al Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A.C. "Centro Geo", por brindarme su soporte científico y humano para desarrollar satisfactoriamente las actividades del trabajo de investigación.

Agradezco especialmente al Dr. J. Víctor Prado Hernández por su valiosa dirección en este trabajo, sus conocimientos y consejos transmitidos y ante todo por su confianza depositada en mí.

También de manera especial le agradezco al Dr. José Luis Silván Cárdenas por aceptar co-dirigir este trabajo, por transmitirme sus conocimientos, consejos y orientación, así como su siempre amable disposición.

A los Dres. Mario Vázquez Peña y Gustavo Arévalo Galarza por su valioso apoyo, enseñanzas y sugerencias brindadas para mejorar el proyecto de investigación.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez por todos sus conocimientos transmitidos, su apoyo invaluable y su amistad brindada.

Al Biol. José Manuel Madrigal Gómez, por su apoyo y colaboración en las prácticas realizadas.

Con mención especial agradezco a mis estimados amigos de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan: Ing. Fortino García Moreno, C. Flor del R. Agustín, C. Patricia Díaz, C. Roberto Lazcano, C. Diego Rosalino, C. Roberto Moreno, C. Marcelino Gonzales y familias, por brindarme su valioso apoyo en la realización de la fase experimental, por acompañarme en esos momentos difíciles, pero sobre todo por acobijarme y hacerme sentir parte de su familia.

DEDICATORIA

A dios, por su infinita bondad y bríndame la oportunidad de lograr un triunfo más en mi vida.

A mis padres, Irma y José, por ser mis maestros de vida, forjar la persona que soy, ser mi inspiración, pero sobre todo por su amor. Los amo.

A mi querido Andrés, por su apoyo y compañía, por motivarme cada día y brindarme todo su amor, cariño y comprensión.

A mis hermanos, Chio, Chemo, Feli y Paco por ser parte de mi corazón y de mi vida, e incentivarne a superarme cada vez más.

A mis grandes amigas y hermanas, Cynthia Serna Abascal y Leticia Alvarado Hernández, por su amistad única e invaluable, por todas las alegrías compartidas e inolvidables momentos.

A mis amigos y familiares

DATOS BIOGRÁFICOS

La autora nació el 18 de febrero de 1993 en Tehuacán, Puebla. Realizó sus estudios de educación básica y media superior en el municipio de origen, e inició su formación profesional en la Universidad Autónoma Chapingo en el programa de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables iniciando en el año 2011 y obteniendo el título en 2016. Formó parte del Programa de Formación de Jóvenes Investigadores (PROFONI) del 2012 al 2016; apoyando en proyectos de desertificación y cambio climático. Colaboró en la realización del Manual de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos, dirigido a los municipios pertenecientes del Área Natural Protegida Tehuacán-Cuicatlán. Realizó su estancia profesional en la subgerencia de Suelos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) en oficinas centrales de Zapopan, Jalisco en 2015, colaborando en proyectos de compensación ambiental, verificando obras de conservación, gestionando las bases de datos de proyectos efectuados en 2013 y 2014 a nivel nacional. Participó en cursos de actualización de “Gestión de obras de conservación de suelo y agua en ecosistemas forestales” y de “Estudios Técnicos Justificados para cambio de uso de suelo en terrenos forestales”. En 2016 formó parte del Curso de Gestión Ambiental, impartido en la Universidad de Costa Rica (UCR), en San José, Costa Rica, enfocado en la toma de decisiones en la administración de recursos naturales en diferentes ecosistemas. Y al término de dicho curso inició sus estudios de Posgrado en la Maestría de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, enfocándose en el estudio del proceso de intercepción de lluvia como abstracción del ciclo hidrológico, mediante medición de campo y la aplicación a modelos.

INTERPCEPCIÓN DE LLUVIA POR DOSEL EN PINO (*Pinus hartwegii*) Y OYAMEL (*Abies religiosa*) MEDIANTE NUBE DE PUNTOS¹

RESUMEN GENERAL

Las cubiertas vegetales cumplen una función importante al retener a través de su follaje un porcentaje considerable de la precipitación, conocida como intercepción de lluvia. En los últimos años se ha reconocido esta abstracción como un componente fundamental en los procesos hidrológicos y en la gestión de recursos hídricos a nivel cuenca, por lo tanto, su cuantificación y estimación a través de modelos ha sido objeto de estudio por diversos autores con la finalidad de incluirla dentro de los balances hídricos y precisar la disponibilidad de agua subterránea y superficial. Con el objetivo de analizar este proceso en *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa*, se cuantificaron los componentes: flujo de traslocación, flujo cortical, precipitación incidente y otras variables meteorológicas durante los meses mayo y junio de 2018, en 21 eventos de lluvia. Las mediciones se realizaron mediante colectores bajo dosel, collarines en fustes y el uso de una estación meteorológica. Además, se evaluaron los modelos: Gash (1979) y el modelo Gash modificado por Valente, para implementar los modelos se dedujeron los parámetros meteorológicos a partir de la tasa de evaporación por Penman-Monteith (PM) y Gash (GASH), para los parámetros de dosel se utilizaron dos métodos, uno gráfico (A) y un nuevo método propuesto (B) mediante nubes de puntos generadas con fotogrametría de drones. Para *P. hartwegii*, el modelo Gash (1979) usando (GASH) y el método (A) resultó mejor con un RMSE de 0.37 mm, En *A. religiosa*, el mejor ajuste lo presentó el modelo Gash modificado por Valente usando (PM) y el nuevo método propuesto de nube de puntos (B) con un RMSE de 0.61 mm.

Palabras clave: *Especies forestales, fotogrametría de drones, modelos analíticos, nube de puntos.*

¹ Tesis: Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del agua, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Claudia Bolaños Sánchez
Director de tesis: Dr. J. Víctor Prado Hernández

CANOPY RAINFALL INTERCEPTION BY PINO (*Pinus hartwegii*) AND OYAMEL (*Abies religiosa*) USING POINT CLOUD²

GENERAL ABSTRACT

Forest coverages play an important role retaining a considerable percentage of rainfall, known as canopy rainfall interception. In recent years this abstraction has been recognized as a fundamental component in hydrological processes and in the management of water resources at basin level, therefore its quantification and estimation through models has been the subject of study by various authors to include it within the water balance and to better account for in water yield. For the purpose of analyzing this process of rainfall interception in *Pinus hartwegii* and *Abies religiosa*, the components were quantified like throughfall, stemflow, gross precipitation and other meteorological variables during May and June 2018, in 21 storms. The measurement was obtained by canopy collectors, collars on trunks and the data of a meteorological station. In addition, were applied the Gash model (1979) and the Gash model modified by Valente to evaluate their performance. To implement the models the meteorological parameters were deduced from the evaporation rate by Penman-Monteith (PM) and Gash (GASH), for the canopy parameters two methods were used, one graphic (A) and new proposed method (B) by point clouds generated with drone photogrammetry. For *P. hartwegii*, the Gash model (1979) using (GASH) and method (A) was better with RMSE of 0.37 mm. In *A. religiosa*, the best performance was presented for Gash model modified by Valente using (PM) and the proposed new method of points cloud (B) with RMSE of 0.61 mm.

Keywords: *Analytical models, drones photogrammetry, forest species, points cloud.*

²Thesis: Universidad Autónoma Chapingo
Author: Claudia Bolaños Sánchez
Advisor: Dr. J. Víctor Prado Hernández

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La intercepción de lluvia por dosel es una abstracción del ciclo hidrológico, en este proceso los árboles interceptan y almacenan la lluvia que cae sobre ellos, para posteriormente ser redistribuida en el tiempo; contribuyendo a la humedad del suelo y a la evaporación (David *et al.*, 2005; Gerrits, 2006). Desde el punto de vista hidrológico el impacto que ejerce la intercepción de lluvia afecta el balance hídrico (Mastachi *et al.*, 2010) e influye en la diferencia de caudales en cuencas. A pesar de su importancia la intercepción comúnmente es despreciada, y se debe principalmente a la falta de datos, a la complejidad de la obtención de información y al laborioso método para obtener un valor representativo de intercepción. Debido a ello algunos modelos predictivos han sido desarrollados para predecir la intercepción de lluvia basándose en las variables meteorológicas del sitio y las características de la arquitectura del dosel (Muzylo *et al.*, 2009).

De acuerdo a lo anterior la intercepción de lluvia por dosel puede ser estudiada bajo dos perspectivas; la medición directa en campo y la estimación aplicando modelación. El trabajo en campo, estima la intercepción de lluvia a través de la cuantificación de cada uno de sus componentes: el *flujo de traslocación*, que es la cantidad de lluvia que pasa a través del follaje y no es retenida para posteriormente drenar y gotear al suelo; y el *flujo cortical*, compuesto de la precipitación que entra al dosel, se dirige al tronco y escurre por su corteza (Carlyle-Moses y Gash, 2011). La estimación se realiza a través de un balance hídrico en el dosel, restando a la precipitación incidente el flujo de traslocación y el flujo cortical (Besteiro y Rodríguez-Vagaría, 2012). Los métodos de medición incluyen estaciones meteorológicas, pluviómetros, colectores manuales, canaletas y collarines de manguera; cada uno de ellos colecta la cantidad de lluvia por cada componente y se cuantifica su volumen para posteriormente convertirlo en láminas (Santiago-Hernández, 2007).

La intercepción de lluvia estimada mediante la cuantificación de sus componentes es expresada en porcentaje y se ha aplicado a diferentes ecosistemas, siendo los bosques templados o de coníferas las coberturas forestales más estudiadas (Muzylo *et al.*, 2009). De acuerdo con Besteiro y Rodríguez-Vagaría (2012) la intercepción varía del 12.2% al 27.2% en plantaciones forestales templadas, coincidiendo con León *et al.* (2010), Reid y Lewis (2009) y Fan *et al.* (2014) que reportan un 19%, 22.4% y 22.9%, respectivamente. Sin embargo, Pérez-Arellano *et al.* (2015), Gavazzi *et al.* (2016) y Chen *et al.* (2013) difieren al reportar un porcentaje del 29.6%, 33.4% y 33.2%, para bosques de coníferas de *Pinus pinea*, *Pinus taeda* L. y *Pinus tabulaeformis*, respectivamente.

Sadeghi *et al.* (2015) describe las variaciones entre bosques deciduos y bosques perennes, reportando un 25% y 40%, respectivamente. Deguchi *et al.* (2006) reportó la variación de la intercepción a los cambios estacionales de especies caducas en la fase de crecimiento y de dormancia de 17.6% y 14.3%, respectivamente, concluyendo que existe una disminución de la intercepción debido a la pérdida de follaje y a la disminución de su densidad arbórea. Con lo anterior se fundamenta el aumento de intercepción para bosques tropicales debido a su alta densidad de follaje y a la condición de poseer diversos estratos que aumentan la retención de lluvia, para estos se reportan valores de 39% hasta más del 50% de la precipitación incidente (Crockford y Richardson, 2000; Schellekens *et al.*, 1999). En especies de ecosistemas semiáridos los rangos varían del 2% al 5% de la precipitación total (Carlyle-Moses, 2004; López *et al.*, 2017; Návar *et al.*, 2008; Sadeghi *et al.*, 2014), siendo este tipo de ambientes los menos estudiados debido a la complejidad de su metodología y escasa precipitación anual.

Respecto a la modelación, los primeros autores que la desarrollaron emplearon ecuaciones simples de regresión lineal para predecir y extrapolar la intercepción de lluvia con algunas mediciones previas de campo, que solo incluía la relación entre las variables de precipitación incidente con la intercepción. Sin embargo, dentro de este proceso hidrológico intervienen diversas variables relacionadas a la arquitectura de dosel, tales como: índice de área foliar, densidad de follaje, tipo y

forma de hojas, tipo de corteza del tronco, ángulo de ramas, y capacidad de almacenamiento dosel (Crockford y Richardson, 2000); y variables meteorológicas como: precipitación incidente, evaporación potencial, velocidad del viento, humedad relativa y temperatura (Carlyle-Moses, 2011). Horton (1919) fue pionero en incluir en la modelación algunas de las variables anteriores con el propósito de caracterizar y entender el proceso, sin embargo, carecía aún de fundamento físico. En la década de los 70's surgen los primeros modelos complejos: el modelo Rutter (1971,1975) y el modelo analítico Gash (1979,1995); que asumen el balance hídrico como principio e incluyen las variables que afectan el proceso en su derivación. Muzylo *et al.* (2009) reconoce hasta el año 2008 un total de 15 modelos, que incluyen modificaciones de los modelos clásicos: Rutter y Gash, y propuestas basadas en fundamentos numéricos (Mulder, 1985) y estocásticos (Calder, 1986).

Dada la variedad de modelos que existen, es importante distinguir que modelo ofrece mejores resultados de predicción de acuerdo a la cubierta vegetal bajo estudio, debido a ello la comparación de los rendimientos entre diversos modelos ha sido causa de estudio, siendo el modelo Gash con sus variantes el más aplicado y comparado, ofreciendo resultados satisfactorios para bosques mediterráneos, de coníferas, tropicales, caducifolios y en coberturas arbustivas (Chen *et al.*, 2013; Cui y Jia, 2014; Fan *et al.*, 2014; David *et al.*, 2006; Hassan *et al.*, 2017; Herbst *et al.*, 2006; Limousin *et al.*, 2008; Schellekens *et al.*, 1999; Valente *et al.*, 1997, Zhang y Li, 2016).

En años recientes surgen variaciones que incluyen uso de modelos apoyados de tecnologías relacionadas a la percepción remota; ya que, este tipo de herramientas permiten obtener información de las coberturas forestales, condiciones del sitio de estudio e incluso recolectar información climatológica; lo cual facilitaría la estimación de la intercepción de lluvia. Por ejemplo; Vegas *et al.* (2012) desarrollaron un método simple que integró productos terrestres del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) con el modelo Rutter para calcular la intercepción de lluvia en cuencas de montaña. Cui y Jia (2014) también aplicaron MODIS utilizando el modelo Gash para estimar la

intercepción de lluvia para bosques heterogéneos a escala regional con aproximaciones de coeficientes de determinación de 0.82 y RMSE 0.6 mm. Por su parte Hassan *et al.* (2017) propusieron un método novedoso de ampliación espacial utilizando imágenes de satélite para calcular la intercepción de lluvia en árboles a nivel parcela y cuenca de *Quercus ilex* y *Quercus pyrenaica*, obteniendo resultados de intercepción de lluvia del 46% a 51% y del 10% al 16% en *Quercus ilex* y *Quercus pyrenaica*, respectivamente.

A pesar de que los resultados han sido satisfactorios, los investigadores que proponen estos procedimientos sugieren mejorarlos y proponer más alternativas para facilitar la estimación de la intercepción de lluvia, ya que, a pesar de que actualmente han incrementado los estudios relacionados al cálculo de esta abstracción, no son suficientes y deben extenderse a la gran variedad de cubiertas vegetales para la estimación precisa de la disponibilidad de recursos hídricos en los ecosistemas.

Con el objetivo de analizar este proceso en dos especies forestales de gran importancia para la Sierra Nevada: *P. hartwegii* y *A. religiosa*, se midieron en campo la precipitación incidente, los flujos de traslocación y cortical para estimar la intercepción de lluvia por dosel mediante un balance en el dosel. También se implementaron dos modelos analíticos, utilizando información meteorológica de los eventos de precipitación medidos, y nuevo método basado en nubes de puntos creadas a partir fotogrametría de drones de los árboles bajo estudio.

1.1 Justificación

La disponibilidad de los recursos hídricos a nivel cuenca se realiza mediante balances hídricos que incluyan todos los componentes que intervienen en el proceso. Dentro de estos componentes se encuentra la intercepción de lluvia, abstracción y componente crítico del ciclo hidrológico en el que las cubiertas vegetales retienen parte considerable de la precipitación, usualmente al no contarse con información precisa del porcentaje captado por follaje de cada cubierta vegetal se desprecia y se toma como cero. Sin embargo, estudios en la materia han

señalado lo indispensable que es cuantificar y estimar la intercepción de lluvia, debido al impacto que ejercen sobre otros componentes del ciclo hidrológico como la evaporación, escurrimiento e infiltración.

El impacto principal al estimar la intercepción de lluvia es la mejora del balance hídrico, generando mayor precisión en la cuantificación de agua disponible superficial y subterránea, y por tanto permitiría la planificación de la concesión de volúmenes a los distintos sectores (agrícolas, doméstico, industrial y pecuario) y la construcción de obras de almacenamiento, traduciendo esto a beneficios sociales y económicos. Como beneficio ambiental, la intercepción de lluvia impacta en la reducción del choque de gotas de lluvia al suelo, disminuyendo la erosión del mismo, a su vez minimiza la velocidad de esorrentía y permite una mayor infiltración del agua al suelo.

De acuerdo a todo lo anterior, resulta importante conocer la intercepción de lluvia por dosel en los diferentes ecosistemas. Sin embargo, desafortunadamente en nuestro país se carece de esta información para la mayoría de las coberturas vegetales, por lo que es importante continuar esta línea de investigación dentro de la hidrología forestal.

1.2 Hipótesis

La estimación de intercepción de lluvia con modelos analíticos, alimentados de información generada por nubes de puntos, ofrece resultados satisfactorios evitando la medición en campo.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Medir la intercepción de lluvia por dosel en las especies forestales: *P. hartwegii* y *A. religiosa* y proponer un nuevo método para estimar la intercepción de lluvia utilizando dos modelos analíticos y el uso de nube de puntos creada a partir de fotogrametría de drones.

1.3.2 Particulares

- Cuantificar el proceso de intercepción de lluvia por dosel para ambas especies forestales.
- Determinar la relación entre los componentes cuantificados de la intercepción de lluvia.
- Estimar los parámetros derivados de la geometría de dosel y meteorológicos para las dos especies bajo estudio.
- Aplicar dos modelos analíticos y validar la bondad de ajuste de la intercepción calculada con la observada
- Comparar los resultados que ofrecen los modelos utilizando los parámetros derivados del método propuesto con los procedimientos convencionales

1.4 Organización del documento

Esta tesis está organizada en cinco capítulos, incluyendo el presente. El primer capítulo plantea el problema de investigación, presenta la introducción, hipótesis, justificación y objetivos. El capítulo dos, incluye un análisis del estado del arte de la intercepción de lluvia por dosel, siguiendo una secuencia cronológica de las investigaciones más relevantes en un contexto nacional y mundial, también se incluye un breve resumen de los modelos más importantes aplicados a este proceso hidrológico.

En el capítulo tres, se analiza el proceso de la intercepción de lluvia en *P. hartwegii* y *A. religiosa*, mediante parcelas experimentales y la cuantificación de los componentes: flujo de traslocación, flujo cortical y precipitación incidente, usando instrumentación como lo son colectores, collarines y una estación meteorológica. Además, se analiza la relación entre los mismos y el impacto que ejerce el follaje en la retención expresada en porcentaje de intercepción.

En el capítulo cuatro se compara el rendimiento de dos modelos analíticos para estimar la interceptación de lluvia en las dos especies bajo estudio, se obtienen los parámetros meteorológicos y de dosel para alimentar los modelos y se propone un nuevo procedimiento para calcular los parámetros del dosel utilizando una nube de puntos de fotogrametría de drones.

Por último, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones generales y recomendaciones para investigaciones futuras.

1.5 Referencias

- Besteiro, S. I., & Rodríguez Vagaría, A. M. (2012). Redistribución de las precipitaciones sobre plantaciones forestales en un predio del partido de La Plata, Buenos Aires. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 111(2), 75-82.
- Carlyle-Moses, D., & Gash, J. C. (2011). Rainfall Interception Loss by Forest Canopies. En D. Levia, D. Carlyle-Moses, & T. Tanaka, *Forest Hydrology and biogeochemistry* (págs. 407-423). Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Carlyle-Moses, D. (2004). Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. *Journal of Arid environments*, 58(2), 181-202.
- Chen, S., Chen, C., Zou, C., Stebler, E., Zhang, S., Hou, L., & Wang, D. (2013). Application of Gash analytical model and parameterized Fan model to estimate canopy interception of a Chinese red pine forest. *J For Res*, 18, 335-344.
- Crockford, R., & Richardson, D. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological processes*, 14(1), 2903-2920.
- David, T., Gash, J., Valente, F., Pereira, J., & Ferreira, M. (2006). Rainfall interception by an isolated evergreen oak tree in a Mediterranean savannah. *Hydrological processes*, 20, 2713–2726.

- Deguchi, A., Hattori, S., & Park, T. (2006). The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. *Journal of Hydrology*, 318, 80-102.
- Flores-Ayala, E., Guerra-De la Cruz, V., Terrazas-Gonzales, G., Carrillo-Anzures, F., Islas-Gutiérrez, F., Acosta-Mireles, M., & Buendía-Rodríguez, 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.
- Gash, J. (1979). An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 105, 43-55.
- Gash, J., Valente, F., & David, J. (1999). Estimates and measurements of evaporation from wet, sparse pine forest in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94, 149-158.
- Gavazzi, M., Sun, G., McNulty, S., Treasure, E., & Wigham, M. (2016). Canopy rainfall interception measured over ten years in a coastal plain loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation. *Transactions of the ASABE*, 59(2), 601-610.
- Gerrits, A. M. (2006). Measuring forest floor interception in a beach forest in Luxembourg. *Hydrological Earth System Sciences*, 3, 2323-2341.
- Hassan, T., Ghimire, C., & Lubczynski, M. (2017). Remote sensing upscaling of interception loss from isolated oaks: Sardon catchment case study, Spain. *Journal of Hydrology*, 555, 489-505.
- Herbst, M., Roberts, J., Rosier, P., & Gowing, D. (2006). Measuring and modelling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141, 244–256.
- Léon Peláez, J. D., González Hernández, M. I., & Gallardo Lancho, J. F. (2010). Distribución del agua en tres bosques altoandinos de la Cordillera Central de Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(1), 5319-5336.
- Limousin, J., Rambal, S., Ourcival, J., & Joffre, R. (2008). Modelling rainfall interception in a mediterranean *Quercus ilex* ecosystem: Lesson from a throughfall exclusion experiment. *Journal of hydrology*(357), 57-66.

- López Lambraño, Á., Fuentes, C., González-Sosa, E., & López-Ramos, Á. (2017). Pérdidas por intercepción de la vegetación y su efecto en la relación intensidad, duración y frecuencia (IDF) de la lluvia en una cuenca semiárida. *IMTA*, VIII(4), 37-56.
- Mastachi , L., González, E., Becerril , R., & Braud , I. (2010). Pérdidas por intercepción en mezquite (*Prosopis laevigata*) y huizache (*Acacia farnesiana*) de la Región semiárida del centro de México. *Tecnologías y Ciencias del Agua*, 1(1), 103-120.
- Mulder, J. (1985). Simulating interception loss using standard meteorological data In: Hutchison, B., Hicks, B. (Eds.) *The Forest–Atmosphere Interaction*. Reidel. 77-196.
- Muzylo, A., Llorens, P., Valente , F., Keizer, J., Domingo, F., & Gash, J. (2009). A review of rainfall interception modelling. *Journal of Hydrology*, 370, 191-206.
- Návar-Cháidez , J., Méndez-González, J., & González-Rodríguez, H. (2008). Intercepción de la lluvia en especies de leguminosas del noreste de México. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 61-68.
- Pérez Arellano, R., Moreno Pérez, M., & Roldán Cañas , J. (2015). Interceptación de la lluvia en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*: efecto de diferentes parámetros climáticos. *IV Jornadas de Ingeniería del Agua La precipitación y los procesos erosivos Córdoba, 21 y 22 de Octubre 2015*.
- Reid, L. M., & Lewis, J. (2009). Rates, timing, and mechanisms of rainfall interception loss in a coastal redwood forest. *Journal of Hydrology*, 375, 459–470.
- Rutter, A., Kershaw, K., Robins , P., & Morton, A. (1971). A predictive model of rainfall interception in forest, I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine . *Agricultural Meteorology*, 367-384.
- Sadeghi, S. M., Attarod, P., & Pypker, T. G. (2015). Differences in Rainfall Interception during the Growing and Non-growing Seasons in a *Fraxinus rotundifolia* Mill. Plantation Located in a Semiarid Climate. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(1), 145-156.

- Santiago-Hernández, L. (s.f.). Medición y análisis de la intercepción de lluvia en un bosque de encino: aplicación a la Microcuenca la Barreta. Tesis de grado de Maestría en Ciencias. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. México. 143.
- Schellenkens , J., Scatena , F., Bruijnizel, L., & Wickel , A. (1999). Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico. *Journal of Hidrology*, 225, 168-184.
- Valente , F., David , J., & Gash, J. (1997). Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hidrology*, 190, 141-162.
- Vegas, F., Álvarez , C., García, A., & Revilla , J. (2012). Estimated distributed rainfall interception using a simple conceptual model and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *Journal of Hydrology*, 468, 213-228.
- Zhang, S.-Y., & Xiao-Yan, L. (2016). Measurement and modelling of rainfall partitioning by deciduous *Potentilla fruticosa* shrub on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*. doi:10.5194/hess-2016-589, 2016

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1 Primeras investigaciones en intercepción de lluvia

La intercepción de lluvia como componente fundamental en el balance hídrico ha sido objeto de estudio por diversos autores. Los primeros indicios de investigación sobre este componente datan desde hace un siglo, Horton (1919) presenta las bases para la conceptualización de la modelación e interpretación del proceso de intercepción de lluvia en diversas especies, presenta por primera vez el concepto de capacidad de almacenamiento de dosel e identifica la intervención de factores bióticos (características de dosel) y abióticos (variables climáticas) dentro del proceso hidrológico. En cuanto a la modelación, presenta una regresión lineal simple que muestra la relación de las pérdidas por intercepción de lluvia con respecto a la precipitación incidente; sin embargo, también plantea un modelo en base a la duración de la tormenta, la tasa de evaporación, el área o superficie de evaporación, y la intensidad de lluvia.

Después del trabajo de Horton (1919), en años siguientes surgen más investigaciones relacionadas al tema de intercepción, pero se considera la década de los 70's como punto clave para la evolución de la investigación en este tema. Los investigadores de la época aportan el despegue de diversos estudios de intercepción aplicados en diferentes coberturas vegetales y el planteamiento de los modelos clásicos; fuente de gran influencia para estudios posteriores y actuales. Rutter *et al.* (1971, 1975) desarrollaron el primer modelo de fundamento físico y numérico, su trabajo de investigación estableció el modelo basado en el equilibrio de balance de agua en el follaje de la vegetación, sus predicciones fueron mensuales y requirió de datos a escala horaria. Sus suposiciones se basaron en un follaje cerrado que cubre toda el área de estudio, dando lugar a la evaporación uniforme en el follaje. El modelo se derivó de mediciones realizadas en un bosque

de *Pinus nigra* por Robins (1969) y consistió en la integración de la tasa de evaporación respecto al tiempo.

Posteriormente surgió el modelo analítico de Gash (1979), el cual es una simplificación del modelo Rutter, pero que conserva a la vez el fundamento físico. Consideró una serie de eventos discretos separados por un periodo de secado, cada uno de ellos contempla tres fases: el humedecimiento del follaje, la saturación del follaje y el periodo de secado del follaje una vez concluida la tormenta. La integración analítica del modelo fue lograda a través de su principal suposición: la tasa media de evaporación y la intensidad media de lluvia se mantienen durante todas las tormentas, ya que se estiman a partir de condiciones de saturación del dosel (cuando la lluvia acumulada por hora es igual o superior a 5 mm). Este mismo modelo se reformuló por el mismo autor (Gash, 1995), su principal modificación fue asumir una bidimensionalidad del área de estudio, separando el área total en área cubierta por dosel (expresada en c) y área descubierta, permitiendo con ello aplicar el modelo en bosques dispersos. Además, modificó la expresión algebraica errónea que representaba el humedecimiento del dosel, expresado como la diferencia entre la unidad, el coeficiente libre de traslocación (p), y del coeficiente de flujo desviado al fuste y ramas (pt), multiplicado por la intensidad de lluvia (\bar{R}), evitando con esto un logaritmo negativo cuando la relación anterior era menor al valor de la evaporación (\bar{E}).

Valente *et al.* (1997) realizaron modificaciones a los modelos originales de Rutter *et al.* (1971,1975) y Gash (1979,1995), su principal aportación es similar a la que realizó Gash (1995) a su modelo original, dividiendo la zona de estudio en área cubierta por dosel, y área despejada, lo anterior modificó la estimación y expresión de algunos parámetros por el coeficiente c . También se modificó la evaporación media, cambiando su estimación de unidad de follaje por unidad de suelo, resolviendo así la problemática de sobreestimar la interceptación de lluvia en cubiertas forestales dispersas. Además, propusieron la introducción de la variable ϵ , para relacionar la proporción del dosel respecto al área proyectada de los troncos, y la existencia de una cantidad de lluvia necesaria para saturar el tronco y el follaje.

Los modelos anteriores son base de la mayoría de los modelos actuales, debido al fundamento físico que proponen en su derivación y a los resultados favorables que han ofrecido a través de los años y a su aplicabilidad a distintas especies.

2.2 Investigaciones internacionales de intercepción de lluvia: Nuevos enfoques y perspectivas

El desarrollo del conocimiento relacionado a la intercepción de lluvia ha avanzado a grandes pasos en los últimos años, distintos autores han investigado el porcentaje de retención de diversas coberturas vegetales y se han propuesto nuevos procedimientos o herramientas para su estimación. A continuación, se presentan algunos estudios similares a la presente investigación comparando sus resultados y los obtenidos en este trabajo.

Chen *et al.* (2013) realizaron una comparación del desempeño de los modelos Gash y Fan con los valores observados de intercepción de pino rojo chino (*Pinus tabulaeformis*) para 100 eventos de precipitación de 2006 a 2008. El objetivo principal de este estudio fue: estimar los parámetros y coeficientes necesarios para alimentar los modelos. Como resultado se observaron porcentajes de intercepción de 35.9% y 53.6%, utilizando los modelos Gash y Fan, respectivamente. El modelo que presento mejor desempeño al emplearse los parámetros obtenidos fue el modelo Gash, con una variación de -0.3% a 7.1% entre los valores medidos y estimados por tormentas, ya que el modelo Fan tuvo resultados favorables solo con tormentas superiores a los 50 mm (-3.4% a 1.3%) y errores considerables en precipitaciones pequeñas. (21.2% a 37.2%).

Un estudio con algunas características parecidas al anterior fue realizado por Fan *et al.* (2014), en este se cuantificaron y compararon la intercepción de lluvia para dos tipos de cobertura forestal, un bosque nativo de *Banksia* (BW) y un bosque plantado de pino (PP), las mediciones se realizaron durante un año, adicionalmente se empleó el modelo Gash reformulado y el modelo Wimo. \bar{E} se obtuvo mediante dos métodos: Penman-Monteith (PM) y derivada de \bar{E}/\bar{R} . Los resultados mostraron que la intercepción total fue de 6.4% al 22.9% para BW y PP, respectivamente. Los

modelos subestimaron la intercepción anual en un rango de 5.2% a 8.2%. La investigación demostró variedad en los desempeños de los modelos dependiendo la \bar{E} utilizada. Este comportamiento se también se encontró en este trabajo, lo anterior demuestra la importancia de la relación de la \bar{E} en el proceso de la intercepción de lluvia por dosel.

Peréz *et al.* (2015) en su estudio abordaron dos especies; *Pinus taeda* y *Citrus ladanifer*, la cuantificación en campo de los componentes: flujo cortical (FC) y flujo de traslocación (TH) se realizó por individuo durante cuatro meses, posteriormente aplicaron cuatro modelos: dos clásicos (modelos Rutter y Gash), y estos mismos modificados por Valente *et al.* (1997). La intercepción de *Pinus taeda* fue de 29.6% de la precipitación total. Los valores estimados a través de los modelos modificados por Valente *et al.*, 1997 resultaron favorables con una variación respecto a los valores observados de -0.3%. Lo anterior sugiere seguir investigando los modelos tipo Valente *et al.* (1997) principalmente en especies dispersas, ya que demostró obtener resultados más favorables con respecto a las modelos originales.

Los trabajos anteriores son investigaciones recientes de intercepción de lluvia por dosel por distintas coberturas forestales y aplicando diversos modelos; sin embargo, recientemente han surgido nuevas propuestas que además de incluir la medición directa de la intercepción de lluvia y su modelación utilizan herramientas de percepción remota. De acuerdo con Carlyle-Moses (2011) este tipo de información permitirá mejorar las estimaciones, debido a los datos detallados que pueden ofrecer de la arquitectura y morfología de las especies forestales. Ejemplo de lo anterior se encuentra la investigación de Vegas *et al.* (2012), este trabajo resulta interesante por la propuesta de alternar el modelo clásico Rutter y productos terrestres del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS); con ello proponen un método simple para obtener el índice de área foliar (IAF), la fracción de cubierta del dosel por MODIS_NDVI y MODIS_LAI. También estiman la capacidad de almacenamiento del dosel a través de expresiones que relacionan el IAF con características morfológicas de las especies. Los resultados que obtuvieron

a escala regional los reportaron como favorables; esto sugiere continuar investigando este nuevo método y proponer alternativas.

Cui & Jia (2014) retoman parte del planteamiento de Vegas *et al.* (2012) aplicando el modelo analítico de Gash y estimando la intercepción de lluvia por dosel a nivel regional, específicamente en una cuenca en el noreste de China. Hicieron uso de productos MODIS para obtener el área cubierta por follaje, la fracción de vacíos y la capacidad de almacenamiento de dosel. Los resultados del estudio demostraron que el modelo subestimó la intercepción de lluvia en 14.2% y 13.6%, en Dayekou y Pailugou, respectivamente.

Las imágenes de satélite también son una opción para calcular la intercepción de lluvia, esta alternativa se utilizó en el estudio de Hassan *et al.* (2017), implementando el método analítico de Gash. El estudio se llevó a cabo en dos especies de roble (*Quercus ilex* y *Quercus pirenaica*) durante dos años, de octubre de 2011 al 30 de septiembre de 2013. La propuesta del método es una ampliación espacial de la pérdida de intercepción de lluvia diaria de árboles por especie a escalas a nivel parcela y a nivel de cuenca. En la metodología se utilizó la clasificación supervisada por criterio de objeto, y una variación estacional utilizando imágenes multiespectrales de alta resolución.

Para la aplicación del modelo analítico realizaron una separación de los eventos de precipitación en dos grupos, uno para calibrar y otro para validar. Esto último resulta muy interesante, ya que en la mayoría de los trabajos anteriores no ocurre este proceso y, que desde el punto de vista de los autores del presente trabajo esto debería ocurrir en casi la totalidad de las investigaciones. Además, existió una discrepancia en la intercepción de lluvia estimada utilizando \bar{E} a partir de PM y de \bar{E}/\bar{R} . Los resultados demostraron ser satisfactorios utilizando \bar{E} calculada a partir de \bar{E}/\bar{R} . Este trabajo ofrece métodos novedosos y se aprecia el interés de los autores por realizar una comparación del desempeño del modelo, utilizando parámetros derivados del uso de imágenes de satélites y de parámetros meteorológicos obtenidos por dos métodos diferentes. El trabajo de investigación sirvió a los autores

del presente como referente para desarrollar la obtención de los parámetros y la inclusión de nuevas herramientas tecnológicas con modelos matemáticos.

2.3 Investigaciones nacionales de intercepción de lluvia por dosel en bosques de coníferas

Para el caso de México existen diversos estudios de intercepción de lluvia, debido a la variedad de ecosistemas que hay en nuestro país y al auge reciente de investigaciones en este tema. Navár-Cháidez (2017) reporta que existen 98 estudios de intercepción de lluvia compilados en 21 documentos científicos, los cuales se clasifican por tipo de ecosistema: bosques templados, bosque de niebla tropical montañoso, árido y semiárido y bosque seco tropical. Los ecosistemas áridos y semiáridos son los más estudiados; sin embargo, para este trabajo de investigación resulta más importante analizar los casos de estudio de intercepción aplicados a bosques templados.

Véliz-Chávez *et al.* (2014) presentan un análisis de intercepción de lluvia para un bosque de *Ficus benjamina L.*, en su estudio consideran dinámicas a las variables: capacidad de almacenamiento de dosel y el coeficiente libre de traslocación (p). Uno de los objetivos de su trabajo fue evaluar los modelos clásicos Rutter y Gash en la estimación de los flujos de traslocación y cortical, en 39 eventos de precipitación de 2005 y 2006. Los resultados mostraron que este tipo de cobertura retiene en su follaje un rango de intercepción que va del 59.46% y hasta el 70.98% de la precipitación total, mientras que la aplicación de los modelos Rutter y Gash obtuvieron una subestimación y sobreestimación del 69% y 88%, respectivamente, siendo el modelo Gash el que mejor se ajustó a los datos observados.

El trabajo realizado por Gómez-Tagle *et al.* (2015) tuvo como objetivo principal diferenciar de la precipitación incidente los flujos corticales y de traslocación para un bosque de pino-encino, con mediciones de 26 meses. La mayoría de sus eventos fueron láminas muy pequeñas con menos de 5 mm. La instrumentación para la cuantificación de los flujos fue manual, para el flujo cortical se utilizaron canaletas

de acero galvanizado con 25 m² y para el flujo cortical se colocaron 22 collarines de manguera. La intercepción total fue de 17.2% de la precipitación total.

El estudio de Flores-Ayala *et al.* (2016) es una investigación que estimó el porcentaje de intercepción de lluvia para las mismas especies utilizadas en este trabajo (*A. religiosa* y *P. hartwegii*), además de incluir *Quercus spp.* El cálculo de la intercepción de lluvia se realizó con la diferencia de la precipitación incidente y el flujo de traslocación, y obtuvieron modelos empíricos para las tres especies forestales. El sitio de su estudio se ubica dentro del parque Nacional Izta-Popo-Zoquiapan, localizado en el eje Neovolcánico. Las mediciones se realizaron usando 75 pluviómetros distribuidos en toda la parcela experimental para coleccionar el flujo de traslocación. Los porcentajes que representaron a la intercepción de lluvia por dosel fueron de 26.1% y 19.2% para *P. hartwegii* y *A. religiosa*, respectivamente. Las diferencias entre la intercepción de lluvia por dosel registrada de Flores-Ayala *et al.*, (2016) y las del presente trabajo se asocian a las condiciones morfológicas y estructurales de los árboles de cada bosque y a las distintas condiciones meteorológicas registradas en cada evento de precipitación.

Por último, el trabajo más reciente de intercepción de lluvia para bosques templados es el reportado por Návar-Cháidez (2017), quien aplicó cinco modelos diferentes para pronosticar la intercepción de lluvia (modelo Rutter, 1971; modelo Gash, 1979; modelo Liu, 1997 y dos modelos nuevos NvMxa and NvMxa). Esta investigación planteó comparar el rendimiento de los cinco modelos en tres ecosistemas principales; áridos y semiáridos, bosque de montaña y bosque templado. Su principal conclusión es que el desempeño de cada modelo se debe principalmente a que cada uno se adapta a ciertas especies.

2.4 Referencias

Carlyle-Moses , D., & Gash, J. C. (2011). Rainfall Interception Loss by Forest Canopies. En D. Levia , D. Carlyle-Moses, & T. Tanaka, *Forest Hydrology and biogeochemistry* (págs. 407-423). Dordrecht, Netherlands: Springer.

- Chen, S., Chen, C., Zou, C., Stebler, E., Zhang, S., Hou, L., & Wang, D. (2013). Application of Gash analytical model and parameterized Fan model to estimate canopy interception of a Chinese red pine forest. *J For Res*, 18, 335-344.
- Cui, Y., & Jia, L. (2014). A Modified Gash Model for Estimating Rainfall Interception Loss of Forest Using Remote Sensing Observations at Regional Scale. *Journal Water*, 6, 993-1012.
- Fan, J., Oestergaard, K., Guyot, A., & Lockington, D. (2014). Measuring and modeling rainfall interception losses by a native Banksia woodland and an exotic pine plantation in subtropical coastal Australia. *Journal of hidrology*, 515, 156-165.
- Gash, J. (1979). An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 105, 43-55.
- Gash, J., Lloyd, C., & Lachaud, G. (1995). Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 170, 79-86.
- Gash, J., Valente, F., & David, J. (1999). Estimates and measurements of evaporation from wet, sparse pine forest in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94, 149-158.
- Ghimire, C., Bruijnzel, A., Lubczynski, M., Ravelona, M., Zwarttendijk, B., & Meerveld, H. (2016). Measurement and modeling of rainfall interception by two differently aged secondary forests in upland eastern Madagascar. *Journal of Hydrology*, 545, 212-225.
- Hassan, T., Ghimire, C., & Lubczynski, M. (2017). Remote sensing upscaling of interception loss from isolated oaks: Sardon catchment case study, Spain. *Journal of Hidrology*, 555, 489-505.
- Horton, R. (1919). Rainfall interception. *Monthly weather review*, 47(9), 603-623.
- Liu, J. (1988). A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy. *Ecological Modelling*, 42, 111-123.

- Monteith , J. (1965). Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol*, 205-234.
- Morejon-Miranda , Y. M., Vega-Carreño, M. B., Escarré-Esteve, A., Peralta-Vital, J. L., Quintero-Silverio, A., & González-Piedra, J. I. (2015). Análisis de balance hídrico en cuencas hidrográficas de la Sierra de los Órganos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2), 94-108.
- Návar-Cháidez , J., Méndez-González, J., & González-Rodríguez, H. (2008). Intercepción de la lluvia en especies de leguminosas del noreste de México. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 61-68.
- Navar-Cháidez, J. (2017). Fitting rainfall interception models to forest ecosystems of Mexico. *Journal of Hydrology*, 548, 458-470.
- Pérez Arellano, R., Moreno Pérez, M., & Roldán Cañas , J. (2015). Interceptación de la lluvia en individuos aislados de Pinus pinea y Cistus ladanifer: efecto de diferentes parámetros climáticos. *IV Jornadas de Ingeniería del Agua La precipitación y los procesos erosivos Córdoba, 21 y 22 de Octubre 2015*.
- Robins, P. (1974). A Method of measuring the aerodynamic resistance to the transport of water vapour from forest canopies. *Journal of applied ecology*, 11(1), 315-325.
- Rutter, A., Kershaw, K., Robins , P., & Morton, A. (1971). A predictive model of rainfall interception in forest, I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine . *Agricultural Meteorology*, 367-384.
- Rutter, J., Morton, A., & Robins, P. (1975). A Predictive Model of Rainfall Interception in Forests. II. Generalization of the Model and Comparison with Observations in Some Coniferous and Hardwood Stands. *Journal of Applied Ecology*, 12(1), 367-380.
- Valente , F., David , J., & Gash, J. (1997). Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hidrology*, 190, 141-162.

- Véliz-Chávez , C., Mastachi, C., González-Sosa, E., Becerril-Peña, R., & Ramos-Salinas, N. M. (2014). Canopy Storage Implications on Interception Loss Modeling. *American Journal of Plant Sciences*, 5(20), 3032-3048.
- Zhang, S.-Y., & Xiao-Yan, L. (2016). Measurement and modelling of rainfall partitioning by deciduous *Potentilla fruticosa* shrub on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*. doi:10.5194/hess-2016-589, 2016

CAPÍTULO 3

INTERCEPCIÓN DE LLUVIA POR DOSEL EN PINO (*Pinus hartwegii*) Y OYAMEL (*Abies religiosa*)³

CANOPY RAINFALL INTERCEPTION BY PINO (*Pinus hartwegii*) AND OYAMEL (*Abies religiosa*)

3.1 Resumen

Las cubiertas forestales tienen un efecto directo en la redistribución de la precipitación y por tanto en la regulación de los flujos hidrológicos a nivel cuenca; sin embargo, regularmente su influencia no se considera como una abstracción en los balances hídricos, principalmente por la falta de información sobre la capacidad de retención de lluvia en cada especie forestal. Con el propósito de analizar este proceso, se estudió el efecto de la cobertura forestal en la precipitación vertical de dos especies dominantes de la Sierra Nevada: pino (*Pinus hartwegii*) y oyamel (*Abies religiosa*). Para ello, se analizaron 21 eventos de lluvia en el período mayo-junio de 2018 en dos parcelas experimentales, de 0,25 ha cada una, en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ). La medición de la precipitación se hizo con una estación meteorológica automatizada y el registro de la intercepción con colectores situados bajo el dosel y collarines en los fustes. En el *P. hartwegii* se observó una intercepción del 23,4% de la precipitación, 73,3% de flujo de traslocación y 3,2% de flujo cortical. El *A. religiosa* registró 37,6% de intercepción, 60,4% de flujo de traslocación y sólo 1,92% de flujo cortical.

³ Tesis: Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Claudia Bolaños Sánchez
Director de tesis: Dr. J. Víctor Prado Hernández
Artículo enviado a la Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo (Argentina)

Palabras clave: *efecto de dosel, flujo cortical, flujo de traslocación, intercepción de lluvia*

3.2 Abstract

Forest coverages have a direct effect on the redistribution of precipitation and therefore on the regulation of hydrological flows at the basin level, however, this variable is not considered in water balances, one reason is that we do not know the rainfall retention capacity in each forest species. For the purpose of analyzing this process, this study presents the effect of forest coverage on vertical precipitation, was studied in two main species of the Sierra Nevada: pine (*Pinus hartwegii*) and oyamel (*Abies religiosa*) through experimental plots implemented at the Experimental Forest Station Zoquiapan, for the months May to June 2018, in 21 events of rainfall. The measurement was obtained by canopy collectors, collars on trunks and the data of a meteorological station. The results showed that pine *P. hartwegii* intercepts 23.4% of the precipitation, 73.3% corresponds to throughfall and 3.2% to stemflow. For the *A. religiosa* the recorded interception was 37.6%, 60.4% for throughfall and 1.92% for stemflow.

Keywords: *canopy effect, throughfall, rainfall interception, stemflow*

3.3 Introducción

Los ecosistemas forestales a través de su follaje, ramas, hojas y tronco retienen parte de la precipitación (intercepción), de esta agua captada una fracción regresa a la atmósfera como evaporación, y otro escurre por la estructura del dosel (flujo de traslocación) o pasa a través del tronco (flujo cortical), para posteriormente caer al suelo, producir flujos superficiales y finalmente integrarse al suelo como infiltración. Este proceso presenta una gran complejidad y forma parte del ciclo hidrológico, su importancia recae principalmente en la relación que existe entre el efecto de la cobertura arbórea y las modificaciones que esta ejerce al balance hídrico (33). Por lo anterior, diversos autores han realizado estudios para contabilizar la cantidad y distribución de precipitación que intervienen en la intercepción de lluvia. Las

coberturas forestales de climas templados y formadas por coníferas son el tipo de ecosistemas más estudiados (22). De acuerdo con Besteiro y Rodríguez-Vagaría (2012), la intercepción varía del 12,2% al 27,2% en plantaciones forestales templadas, coincidiendo con León *et al.* (2010), Reid y Lewis (2009) y Fan *et al.* (2014) que reportan 19, 22,4 y 22,9%, respectivamente para especies similares. Sin embargo, Pérez-Arellano *et al.* (2015), Gavazzi *et al.* (2016) y Chen *et al.* (2013) difieren al reportar un porcentaje del 29,6%, 33,4% y 33,2%, para bosques de coníferas de *Pinus pinea*, *Pinus taeda* L. y *Pinus tabulaeformis*, respectivamente.

Sadeghi *et al.* (2015) describen las variaciones entre bosques deciduos y bosques perennes, reportando un 25% y 40% respectivamente. Para bosques tropicales se reportan valores próximos a 39% (10). Para especies de ecosistemas semiáridos los rangos varían del 2% al 5% de la precipitación total (6, 20, 23), siendo este tipo de ambientes los menos estudiados debido a la complejidad metodológica para su medición y escasa precipitación anual.

A pesar de que en los últimos años la intercepción de lluvia ha tomado importancia dentro de estudios hidrológicos y de hidrología forestal, el incremento de estudios en distintas coberturas y ecosistemas no son suficientes para establecer una fracción constante de la precipitación como intercepción, debido a que la distribución varía de acuerdo a las características propias de cada cobertura y a las condiciones meteorológicas particulares de la zona, por lo que este trabajo de investigación tuvo como objetivo estimar la intercepción de lluvia por dosel, a través de la cuantificación de los componentes de este proceso hidrológico en las especies forestales *P. hartwegii* y *A. religiosa*, utilizando parcelas experimentales y realizando medición directa de la intercepción de la lluvia con colectores.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Descripción del sitio de estudio

El área experimental se ubicó dentro de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), cuya superficie es de 1638 ha y altitudes que varían de 3200 a 3500 msnm (11). Se localiza al sureste del Estado de México a 35 km del municipio

de Ixtapaluca, inmersa en el sistema orográfico de la Sierra Nevada perteneciente al Eje Neovolcánico. El clima es templado frío con lluvias en verano, con precipitaciones de 900 a 1200 mm por año. La temperatura media anual es de 11,1 °C. La vegetación es principalmente *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii* y *Alnus firmifolia*. (11). Se seleccionaron dos parcelas experimentales de 0,25 ha (50 x 50 m), una para *A. religiosa* y otra para *P. hartwegii*, en la parte central de la EFEZ a una distancia de 600 metros entre ellas (Figura 1).

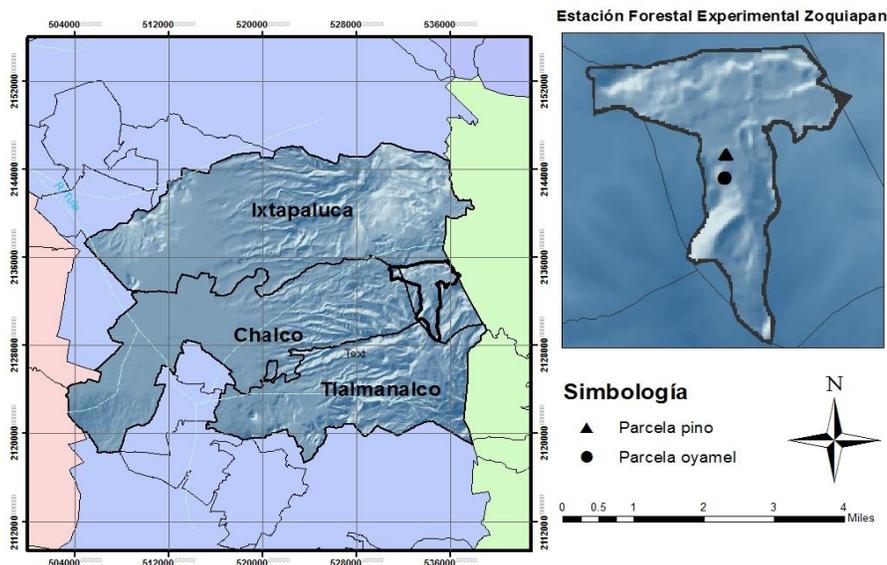


Figura 1. Localización del área de estudio

3.4.2 Caracterización de parcelas experimentales

3.4.2.1 Parámetros dasométricos

De mediciones hechas en 64 árboles de *P. hartwegii* y 50 de *A. religiosa*, seleccionados aleatoriamente, se obtuvieron la media, desviación estándar, mediana, máximo y mínimo de los siguientes parámetros dasométricos: altura del árbol y del fuste (H y Hf), diámetro normal (Dn), diámetro mayor y menor de copa (DM y Dm). Los parámetros H y Hf se obtuvieron con un altímetro tipo pistola de Haga marca GAFMEX®, el Dn se midió a una altura de 1,30 m con una forcípula de

aluminio marca MANTRAX® de 102 cm, y el DM y Dm se obtuvieron de la proyección ortogonal de la copa al suelo con una cinta de fibra de vidrio de 50 m.

3.4.2.2 Índice de área foliar

Para caracterizar el dosel se estimó el índice de área foliar (IAF), mediante un sensor marca LI-COR® modelo LAI-2200C (Figura 2). Para ello, se hicieron cuatro perfiles en el interior de cada parcela, midiendo cada 0,5 m; dos de forma diagonal, uno en dirección norte-sur y el otro en dirección este-oeste.



Figura 2. Instrumentación para determinar el Índice de Área Foliar

3.4.3 Instrumentación para los componentes de la Intercepción

3.4.3.1 Flujo de traslocación

Para obtener el flujo de traslocación se utilizaron como colectores botellas de plástico (3 L de capacidad), sujetados por bases de madera a una altura de 1,20 m. Previamente los colectores fueron calibrados con la estación meteorológica Chapingo, en la Universidad Autónoma Chapingo, Campus Chapingo. Los resultados entre las láminas medidas por los colectores y las de la estación de referencia no mostraron diferencias significativas ($P < 0,05$). El volumen se cuantificó al término de cada evento de precipitación con probetas de plástico de 10 ml (precisión de 0,1 ml) y de 100 ml (precisión de 1 ml).

Las láminas del flujo de traslocación se obtuvieron con la siguiente ecuación:

$$TH = \frac{vm}{ac} \quad (1)$$

donde TH, es la lámina del flujo de traslocación (mm); vm, es el volumen medido por cada colector (ml); y ac, es el área de captación del colector (cm²).

3.4.3.2 Flujo Cortical

Para medir el flujo cortical se instalaron dispositivos tipo collarín, elaborados de manguera colocada alrededor del fuste formando un espiral de 2,5 vueltas. La precipitación colectada por el dispositivo se concentró en botellas de plástico con capacidad de 3 L, y al término de cada evento se midió el volumen colectado con una probeta de plástico de 100 ml. Para estimar la lámina correspondiente al flujo cortical se empleó la ecuación de Price y Carlyle-Moses (2003):

$$FC = \frac{n \times FC(a)}{FA} \quad (2)$$

donde FC, es la lámina de flujo cortical (mm); n, el número de árboles muestreados; FC(a), es el volumen medio medido de los árboles instrumentados (ml), y FA es el área basal de copas del n número de árboles muestreados (m²).

3.4.3.3 Precipitación incidente y variables meteorológicas

Se analizaron 21 eventos de precipitación ocurridos en los meses de mayo y junio de 2018. La precipitación incidente (P, mm), temperatura media, mínima y máxima (°C), humedad relativa (%), velocidad (m s⁻¹), dirección de viento, radiación solar (W m⁻²) y presión barométrica (mb), fueron registrados cada 10 minutos, por una estación meteorológica marca DAVIS® modelo Vantage Pro2™ Inalámbrica. La precipitación se registró en incrementos de 0,2 mm. La estación meteorológica se ubicó en un área despejada y cercana a ambas parcelas con la finalidad de que la lámina obtenida por el pluviómetro fuera representativa de los dos sitios experimentales.

3.4.4 Diseño experimental

La medición del flujo de traslocación se hizo con 39 colectores, distribuidos aleatoriamente en 13 sitios de medición con características de cobertura diferentes (fracción de vacíos, densidad de follaje y fenología). El flujo cortical se cuantificó en cinco árboles de cada especie, empleando un collarín por árbol (Figuras 1 y 2); los

árboles seleccionados presentaron fustes verticales y ausencia de bifurcaciones a una altura de 1,3 m.

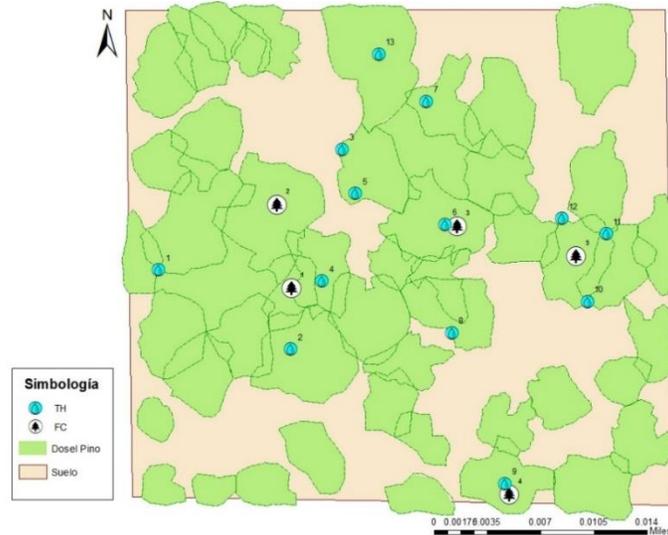


Figura 3. Arreglo general de la instrumentación en la parcela experimental de *P. hartwegii* para el flujo de traslocación y cortical, incluyendo la vista ortogonal de la proyección de copas.

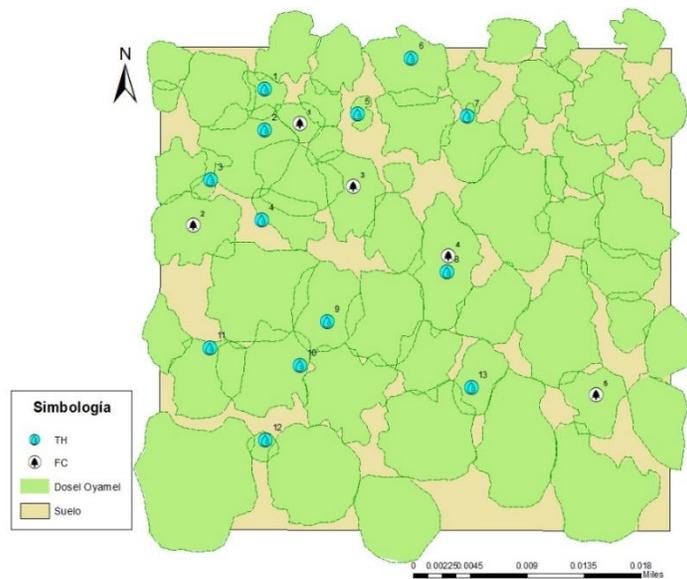


Figura 4. Arreglo general de la instrumentación en la parcela experimental de *A. religiosa* para el flujo de traslocación y cortical, incluyendo la vista ortogonal de la proyección de copas.

3.5 Resultados y discusión

3.5.1 Características dasométricas de las especies a nivel parcela

Los resultados mostraron diferencias dasométricas y de cobertura foliar entre los bosques de *P. hartwegii* y *A. religiosa*. El *P. hartwegii* presentó una menor altura de árbol (H), de IAF y del diámetro normal (Dn), pero una mayor altura del fuste (Hf) que *A. religiosa*. El *A. religiosa* presentó mayores dimensiones en los diámetros mayor y menor de sus copas (DM y Dm), proporcionando una mayor área cubierta por follaje y menos fracción de vacíos entre copas que el *P. hartwegii* (Tabla 1). Los valores de IAF obtenidos de *P. hartwegii* (2,83) y *A. religiosa* (2,99), correspondieron a los rangos reportados para especies forestales (21, 25, 26).

Flores Ayala *et al.* (2016) implementaron módulos experimentales en bosques de *P. hartwegii* y *A. religiosa*, pertenecientes también a la Sierra Nevada, para obtener la intercepción de lluvia por dosel. Estos presentaron similitud en la altura media de los árboles de este estudio; sin embargo, difieren en el diámetro normal y por consiguiente en la madurez de las especies (30).

Cuadro 1. Estadísticas de las características dasométricas más importantes para ambas parcelas experimentales

Estadísticas	<i>P. hartwegii</i>					<i>A. religiosa</i>				
	H (m)	Hf (m)	Dn (cm)	DM (m)	Dm (m)	H (m)	Hf (m)	Dn (cm)	DM (m)	Dm (m)
Media	21,14	15,13	37,56	7,81	4,55	23,24	11,62	50,50	8,41	5,85
Desviación estándar	5,92	5,51	14,32	2,47	1,34	6,71	4,76	27,84	2,75	2,33
Máximo	32,00	25,00	71,00	13,85	8,50	35,00	23,00	105,00	14,30	10,55
Mínimo	8,00	1,80	15,00	3,30	1,95	10,00	2,20	14,00	2,10	1,70

3.5.2 Características de los eventos de precipitación

La lámina total de los 21 eventos de lluvia analizados fue de 126,2 mm, con una desviación estándar de 5,6 mm, un valor máximo y mínimo de 17,8 mm y 0,4 mm, respectivamente (Tabla 2). La mediana fue de 4,4 mm y la moda de 1,2 mm con

una ocurrencia de tres eventos. Los eventos considerados en el estudio pertenecen a lluvias ligeras y moderadas, según el criterio de CONAGUA (13).

El 57% de los eventos de lluvia correspondieron a precipitaciones de 0 a 5 mm, un 23,8% de 10 a 15 mm y un 9,5% de 5 a 10 mm y de 15 a 20 mm.

Cuadro 2. Caracterización de los eventos de precipitación registrados

E ¹	Fecha	Hora de inicio	Duración (h)	P ² (mm)	IM ³ (mm h ⁻¹)	IMM ⁴ (mm h ⁻¹)	Tm ⁵ (°C)
1	19/05/2018	05:00 p.m.	5,00	11,80	2,36	18,00	8,40
2	20/05/2018	04:50 p. m.	12,50	11,40	0,91	26,40	6,60
3	21/05/2018	03:20 p. m.	0,70	1,20	1,80	0,40	10,24
4	22/05/2018	08:00 p. m.	1,30	2,60	1,95	6,00	8,90
5	06/06/2018	05:50 p. m.	3,00	11,20	3,73	13,20	9,60
6	07/06/2018	04:50 p. m.	0,70	11,40	17,10	28,80	10,20
7	12/06/2018	03:40 p. m.	17,00	6,80	0,40	2,40	8,43
8	13/06/2018	12:00 p. m.	1,20	1,20	1,02	2,40	11,00
9	13/06/2018	09:50 p. m.	10,80	5,60	0,51	4,80	8,40
10	14/06/2018	01:50 p. m.	14,20	17,80	1,25	15,60	9,27
11	15/06/2018	04:20 p. m.	5,30	12,00	2,25	10,80	9,70
12	16/06/2018	09:30 p. m.	7,00	3,60	0,51	6,00	8,80
13	17/06/2018	12:50 p. m.	5,30	16,00	3,00	33,60	11,60
14	18/06/2018	02:00 p. m.	1,20	1,20	1,03	4,80	9,67
15	18/06/2018	07:20 p. m.	7,80	4,60	0,59	2,40	6,40
16	21/06/2018	01:00 a. m.	7,00	0,80	0,11	1,20	6,04
17	22/06/2018	12:50 a. m.	0,50	0,80	1,60	3,60	8,20
18	22/06/2018	10:50 p. m.	1,20	0,40	0,34	1,20	7,80
19	23/06/2018	09:30 p. m.	1,80	0,40	0,21	1,20	8,50
20	24/06/2018	02:20 p. m.	0,80	1,00	1,20	2,40	9,70
21	25/06/2018	04:30 p. m.	7,20	4,40	0,61	3,60	8,70

¹ Número de Evento de precipitación, ² Precipitación incidente, ³Intensidad Media, ⁴ Intensidad Media Máxima, ⁵ Temperatura media.

3.5.3 Intercepción de lluvia y sus componentes

3.5.3.1 Flujo de traslocación (TH)

El flujo de traslocación de *P. hartwegii* fue de 100,8 mm, correspondiente al 73,36% de la precipitación total (Tabla 3). Resultó similar al 76,2% reportado por Ghimire *et al.* (2012) para bosques forestales de pino, al 79,0% observado por Santiago-Hernández (2007) para bosques de montaña y al 70,0% encontrado por Pérez-Arellano *et al.* (2015) para *Pinus pinea*. Sin embargo, fue menor que el 89,0% observado por Gavazzi *et al.* (2016) en *Pinus taeda* L. y mayor que el 64,0% reportado por Ullca *et al.* (2001) en módulos experimentales de pino. Las diferencias se atribuyen a que fueron distintos los eventos de precipitación y las condiciones meteorológicas, así como las características de los árboles estudiados.

El flujo de traslocación en *A. religiosa* resultó menor que en *P. hartwegii*, con un 60,43% de la precipitación total. Las diferencias encontradas entre las dos especies se explican por su morfología, IAF y área cubierta por copas. El *A. religiosa* es un árbol con copa cónica en multicapas que presenta inserción de sus hojas en forma espiralada (2); este tipo de estructura y geometría permitió retener más la precipitación en el dosel que en el *P. hartwegii*, el cual es un árbol de copa redonda hemisférica, con menor IAF y espesor de follaje (34).

El flujo de traslocación obtenido en *A. religiosa* resultó semejante a algunos de los resultados reportados en especies con geometría y morfología del dosel similar. Iroume y Huber (2000) y Besteiro & Rodríguez-Vagaría (2012) observaron 60% y 60%-75%, respectivamente. Sin embargo, León-Peláez *et al.* (2010), Oyarzún *et al.* (1984) y Valente *et al.* (1997) reportaron porcentajes mayores de 81%, 74%-80% y 82.6% respectivamente.

Distintos autores reportan una relación lineal positiva entre el flujo de traslocación y la precipitación incidente (5, 6, 9, 22, 26). En este estudio, se encontró el mismo comportamiento, expresado por las Ecuaciones 3 y 4 para *P. hartwegii* y *A. religiosa*, respectivamente:

$$TH = 0,8452 P - 0,2795 \quad (3)$$

$$TH = 0,8441 P - 0,7209 \quad (4)$$

donde TH es el flujo de traslocación (mm) y P es la precipitación incidente (mm).

Los coeficientes de determinación obtenidos fueron 0,99 y 0,98, y RMSE de 0,50 y 0,61 mm para *P. hartwegii* y *A. religiosa*, respectivamente.

3.5.3.2 Efecto del dosel en el flujo de traslocación

Los análisis de varianza realizados indicaron una diferencia altamente significativa ($P < 0,05$) entre las medias de las láminas colectadas de los sitios de muestreo, por tamaño de evento de lluvia. De lo anterior, se infiere que las características del dosel los sitios de muestreo fueron distintos. Los intervalos de confianza ($P < 0,05$) y valores medios obtenidos por tamaño de evento, permitieron identificar cierta uniformidad en las láminas colectadas en los sitios de muestreo 3, 5, 8, 10 y 11 en *P. hartwegii* y en los sitios 4, 6, 8 y 9 en *A. religiosa* (Figura 5). Este resultado sugiere la posibilidad de reducir el número de sitios muestreados para una próxima investigación en el mismo sitio de estudio.

3.5.3.3 Flujo cortical (FC)

El flujo cortical registrado en la parcela de *P. hartwegii* fue 3,22% de la precipitación total, coincidiendo con los resultados de Ghimire *et al.* (2012) quien reportó 3,1%. Resultó mayor que lo encontrado por Pérez Arellano *et al.* (2015) y Ullca *et al.* (2001) quienes reportaron un 0,3% y 0,1% respectivamente, y resultó inferior al 6,7% reportado por Santiago-Hernández (2007). La diferencia de los resultados con algunos autores puede explicarse por las diferencias en la morfología de ramas y fustes de los árboles.

En la parcela de *A. religiosa* se obtuvo un flujo de cortical de 1,92%, porcentaje inferior al obtenido en la parcela de *P. hartwegii*, debido al área expuesta total del fuste que permitió un mayor retenimiento de precipitación y la producción de una menor cantidad de flujo cortical, además de presentar características en su corteza y madera que influyeron un mayor almacenamiento de precipitación en su interior.

El porcentaje registrado para *A. religiosa*, no coincide con el de otros estudios en especies similares y se atribuye a las diferencias en las características morfológicas y fenológicas de los fustes de las especies (3, 17, 18, 23).

En ambas especies se observó una relación lineal positiva del flujo cortical (FC, en mm) y la precipitación incidente (P, en mm), tendencia similar a la reportada en otras investigaciones (5, 6, 9, 22). La ecuación 5 corresponde a *P. hartwegii* y la 6 a *A. religiosa*, con coeficientes de determinación de 0,77 y 0,86, y RMSE de 0,11 y 0,10 mm, respectivamente:

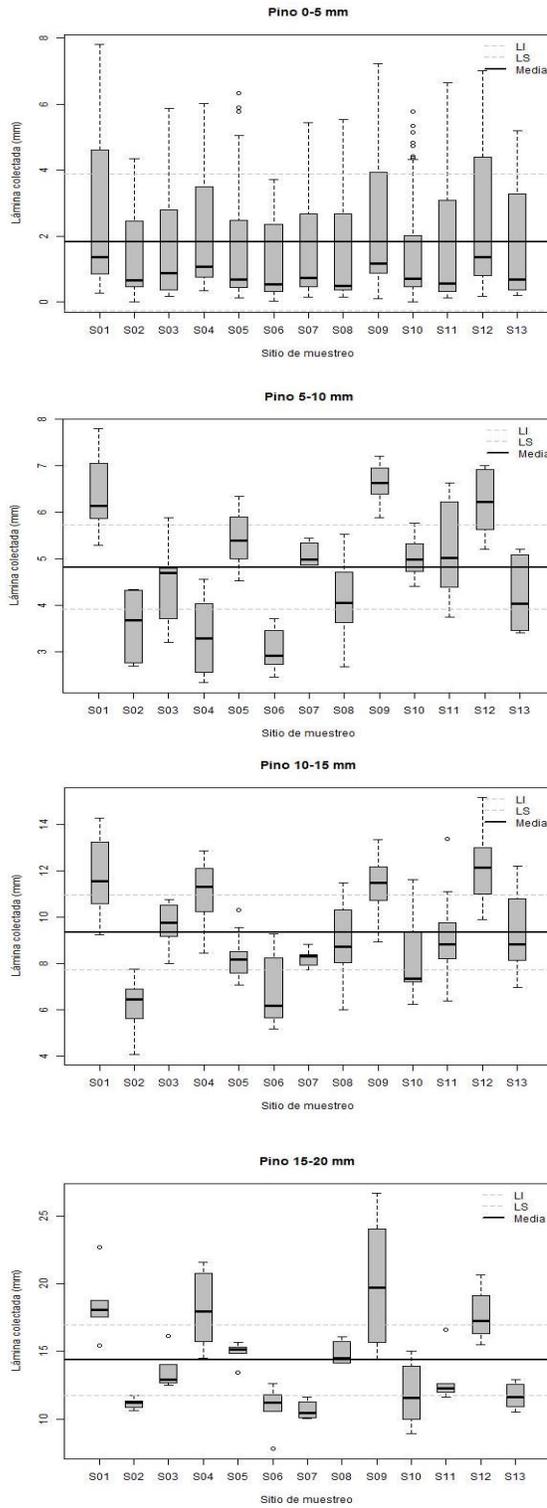
$$FC = 0,0382 P - 0,0043 \quad (5)$$

$$FC = 0,0398 P - 0,0646 \quad (6)$$

3.5.3.4 Intercepción de lluvia por dosel

La intercepción calculada para *P. hartwegii* y *A. religiosa* fue de 20,67 mm y 31,40 mm respectivamente, correspondiente a 23,40% y 37,64% de la precipitación total (Tabla 3). Flores Ayala *et al.* (2016) reportaron valores distintos en un estudio realizado para las mismas especies de este estudio, con 19,20% en *P. hartwegii* y 26,1% en *A. religiosa*. La variación entre los resultados de un trabajo y otro se atribuyen a las diferencias en el diseño experimental, puesto que: 1) Flores Ayala *et al.* (2016) estudiaron estratos distintos; 2) Flores Ayala *et al.* (2016) tomaron información de los eventos de precipitación de todo un año, mientras que en esta investigación se tomaron en cuenta sólo los dos primeros meses de lluvia del año, y 3) los componentes de la intercepción evaluados por Flores Ayala *et al.* (2016) se focalizaron en el flujo de traslocación y efecto del follaje, mientras que este estudio consideró adicionalmente la influencia de los fustes mediante la cuantificación del flujo cortical en el proceso de intercepción. Investigaciones anteriores en especies semejantes al *P. hartwegii* reportan valores similares a lo obtenido en esta investigación (16, 26, 33). Para *A. religiosa*, existen similitudes con lo reportado por Iroume y Huber (2000) y Besteiro y Rodríguez-Vagaría (2012), pero hay diferencias con lo obtenido por Oyarzún *et al.* (1984), Valente *et al.* (1997) y León Peláez *et al.*

A



B

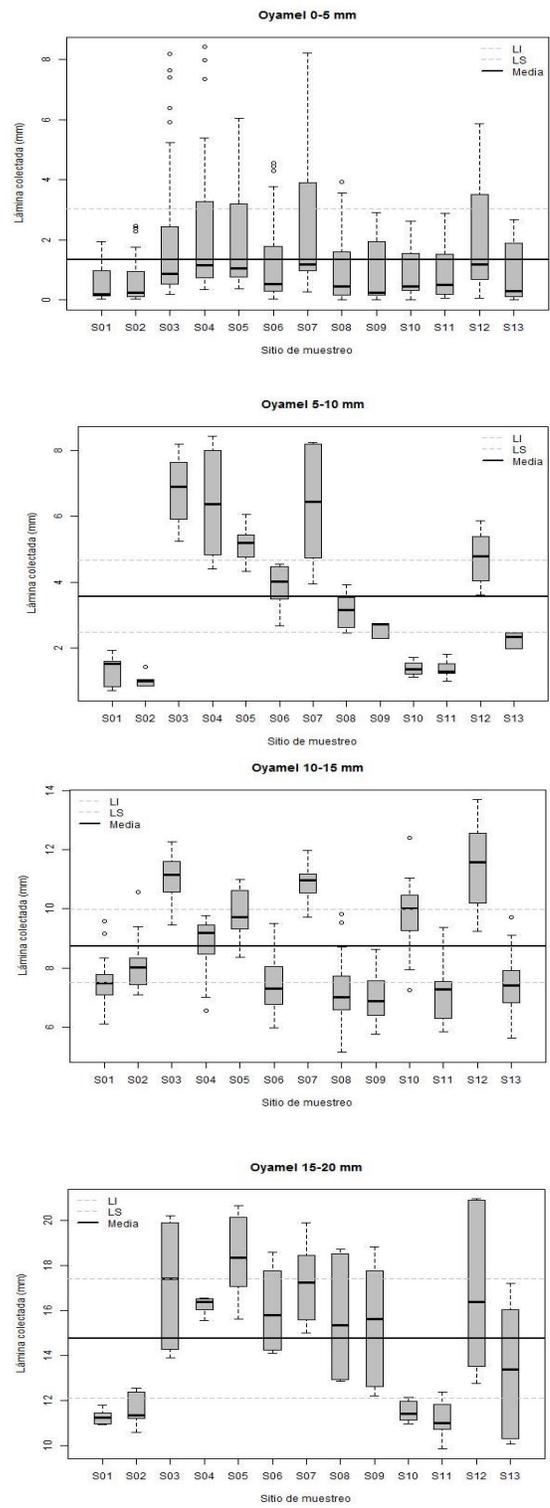


Figura 5. Flujo de traslocación en los 13 sitios de medición por tamaño de evento de lluvia, para *P. hartwegii* (A) y *A. religiosa* (B).

LI = Límite inferior del intervalo; LS = Límite superior del intervalo; Media = media aritmética.

(2010). Las discrepancias de la precipitación interceptada entre especies confirman que la redistribución de lluvia por dosel está en función de las características morfológicas y estructurales del tipo de vegetación, de las características de la precipitación y condiciones meteorológicas durante los eventos (17). La relación entre la intercepción de lluvia porcentual con la precipitación incidente, se expresó mediante una función exponencial negativa para ambas parcelas, con coeficientes de determinación de 0,78 y 0,88, y RMSE de 4,89 y 7,05 mm para *P. hartwegii* y *A. religiosa*, respectivamente. Algunos autores reportaron una relación similar entre esos dos componentes (3, 6, 5, 23). Se observó que a medida que incrementan las cantidades de precipitación, la intercepción de lluvia decrece, con un decaimiento rápido en cantidades pequeñas y con comportamiento asintótico en cantidades grandes, saturándose con valores más pequeños en *P. hartwegii* (Figura 6).

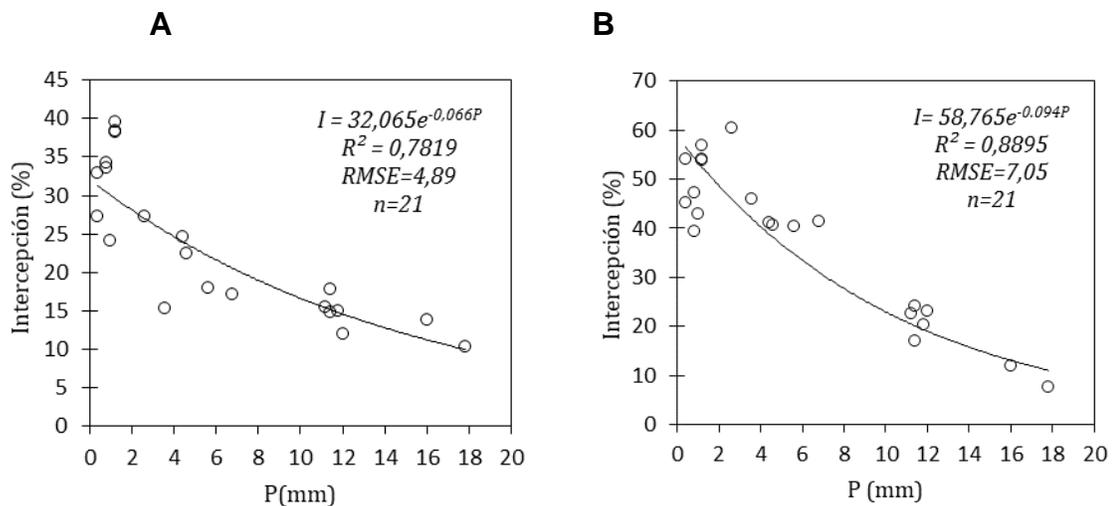


Figura 6. Intercepción de lluvia por dosel como función de la precipitación incidente (P, mm) en *P. hartwegii* (A) y *A. religiosa* (B).

3.6 Conclusiones

La intercepción de lluvia por dosel fue mayor en la parcela de *A. religiosa* que en *P. hartwegii*, con 37,6% y 23,4%, respectivamente. La diferencia se asocia a las distintas características del dosel en ambas especies, reflejado en los valores obtenidos de IAF y en los parámetros dasométricos reportados, principalmente en el tamaño de copas.

El *A. religiosa*, presentó una densidad de dosel y diámetro de copa mayor que el *P. hartwegii*, lo cual propició un menor aporte de agua a través de la cubierta vegetal hacia el suelo (60,43% y 73,36%, respectivamente); en cambio, generó una retención de agua mayor en el fuste debido a su corteza más rugosa y gruesa y mayor diámetro normal medio.

La intercepción porcentual con respecto a la precipitación incidente se representó por una función exponencial negativa, con coeficientes de determinación mayores que 0,78 en ambas especies, con un decaimiento mayor en *A. religiosa*.

3.7 Agradecimientos

Los autores agradecen su apoyo al personal y jefe de la EFEZ en la fase experimental y al Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial A.C. por su invaluable colaboración técnica.

3.8 Referencias

1. Aguirre-Salado, C. A.; Valdez-Lazalde, J. R.; Ángeles-Pérez, G.; de los Santos-Posada, H. M.; Aguirre-Salado, A. I. 2011. Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos SPOT 5 HRG: regresión y k-nn. *Agrociencia*. 45: 105-119.
2. Arriola-Padilla, V. J.; Flores-García, A.; Gijón-Hernández, A. R.; Pineda-Ojeda, T.; Jacob-Cervantes, V.; Nieto de Pascual, C. 2015. Producción de planta de *Abies religiosa* Kunth Schltld. ; Cham. En vivero. Folleto Técnico Núm. 19 CENID-COMEF. INIFAP. México, D.F., México .
3. Besteiro, S. I.; Rodríguez-Vagaría, A. M. 2012. Redistribución de las precipitaciones sobre plantaciones forestales en un predio del partido de La Plata, Buenos Aires. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*. 1112: 75-82.

4. Brown-Manrique, Ó.; Díaz Ruíz, R., Gallardo-Ballat, Y.; Valero-Freyre, J. 2017. Caracterización de precipitaciones diarias en el municipio de Ciego de Ávila, Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 38: 44-58.
5. Carlyle-Moses , D.; Gash, J. C. 2011. Rainfall Interception Loss by Forest Canopies. En D. Levia , D. Carlyle-Moses; T. Tanaka, *Forest Hydrology and biogeochemistry*. Dordrecht, Netherlands: Springer págs. 407-423.
6. Carlyle-Moses, D. 2004. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. *Journal of Arid environments*. 582: 181-202.
7. Carlyle-Moses, D.; Price , A. 1999. An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. *Journal of Hydrology*. 214: 103-110.
8. Chen, S.; Chen, C.; Zou, C.; Stebler, E.; Zhang , S.; Hou, L.; Wang, D. 2013. Application of Gash analytical model and parameterized Fan model to estimate canopy interception of a Chinese red pine forest. *Journal of Forest Research*. 18(4): 335-344.
9. Córcega-Pita, E.; Silva-Escobar, O. 2011. Evaluación de la intercepción de la lluvia en plantaciones de cacao *Theobroma cacao* L., bosque tropical semideciduo y conuco en laderas de montaña. *Revista de la Facultad de Agronomía Universidad Central de Venezuela*. 372: 47-54.
10. Crockford, R.; Richardson, D. 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological processes*. 141: 2903-2920.
11. DICIFO, UACH. 2005. Programa de manejo para el aprovechamiento de arbolado muerto en la estación forestal experimental Zoquiapan. *Manifestación de Impacto Ambiental, Modalidad Particular*. Disponible en <http://sinat.semarnat.gob.mx> (fecha de consulta: 14/12/2018)
12. Escalante , C.; Amores , L. 2013. Análisis de la precipitación en la costa de Chiapas». XI Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica y VII Seminario Internacional del Uso del Agua. 1-5 de Octubre, ISBN: 978-607-7601-96-8, Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción.

13. Fan, J.; Oestergaard, K.; Guyot, A.; Lockington, D. 2014. Measuring and modeling rainfall interception losses by a native *Banksia* woodland and an exotic pine plantation in subtropical coastal Australia. *Journal of hidrology*. 515: 156-165.
14. Flores-Ayala, E.; Guerra-De la Cruz, V.; Terrazas-Gonzales, G.; Carrillo-Anzures, F.; Islas-Gutiérrez, F.; Acosta-Mireles, M.; Buendía-Rodríguez, E. 2016. Intercepción de lluvia en bosques de montaña en la cuenca del río Texcoco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 737: 65-76.
15. Gavazzi, M.; Sun, G.; McNulty, S.; Treasure, E.; Wightman, M. 2016. Canopy rainfall interception measured over ten years in a coastal plain loblolly pine *Pinus taeda* L. plantation. *Transactions of the ASABE*. 592: 601-610.
16. Ghimire, C. P.; Bruijnzeel, A.; Lubczynski, M. W.; Bonell, M. 2012. Rainfall interception by natural and planted forests in the Middle Mountains of Central Nepal. *Journal of Hydrology*. 475: 270-280.
17. Iroume, A.; 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. *Revista Bosque*. 211: 45-56.
18. León-Peláez, J. D.; González-Hernández, M. I.; Gallardo-Lancho, J. F. 2010. Distribución del agua en tres bosques altoandinos de la Cordillera Central de Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 631: 5319-5336.
19. López-Lambraño, Á.; Fuentes, C.; González-Sosa, E.; López-Ramos, Á. 2017. Pérdidas por intercepción de la vegetación y su efecto en la relación intensidad, duración y frecuencia IDF de la lluvia en una cuenca semiárida. *IMTA*. 8(4): 37-56.
20. López-Serrano, F.; Morote, F.; Barrero, J.; Landete, T.; Andrés, M. 1996. Estimación directa del índice de área foliar LAI en árboles individuales de *Pinus halepensis* Mill. Departamento de Ciencia y Tecnología Agroforestal de la Escuela Superior Técnica de Ingenieros Agrónomos de Albacete. 353-358.
21. Muzylo, A.; Llorens, P.; Valente, F.; Keizer, J.; Domingo, F.; Gash, J. 2009. A review of rainfall interception modelling. *Journal of Hydrology*. 370: 191-206.

22. Návar-Cháidez, J.; Méndez-González, J.; González-Rodríguez, H. 2008. Intercepción de la lluvia en especies de leguminosas del noreste de México. *Terra Latinoamericana*. 261: 61-68.
23. Oyarzún, C.; Huber, A.; Vásquez, S. 1984. Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata* L. *Revista Bosque*. 61: 3-14.
24. Papamijja-Muñoz, D.; García-Solórzano, C. 2012. Estimación del índice de área foliar en plantaciones de *Eucalyptus grandis* W. Hill. *Colombia Forestal*. 152: 261-271.
25. Peduzzi, A. 2007. Leaf Area Assessments of the overstory and understory vegetation in pine plantations located in south Georgia and North Florida, US. Thesis M.Sc. Raleigh: North Carolina State University. 42 p .
26. Pérez-Arellano, R.; Moreno-Pérez, M.; Roldán Cañas, J. 2015. Interceptación de la lluvia en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*: efecto de diferentes parámetros climáticos. IV Jornadas de Ingeniería del Agua La precipitación y los procesos erosivos Córdoba, 21 y 22 de Octubre 2015.
27. Price, A.; Carlyle-Moses, D. 2003. Measurement and modelling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*. 119: 69-85.
28. Promis, Á. 2013. Medición y estimación del ambiente lumínico en el interior del bosque: Una revisión. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 191: 139-146.
29. Quiñonez-Barraza, G.; De los Santos Posadas, H. M.; Álvarez González, J. G. 2015. Crecimiento en diámetro normal para *Pinus* en Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 629: 108-125.
30. Reid, L. M.; Lewis, J. 2009. Rates, timing, and mechanisms of rainfall interception loss in a coastal redwood forest. *Journal of Hydrology*. 375: 459–470.
31. Rutter, A.; Kershaw, K.; Robins, P.; Morton, A. 1971. A predictive model of rainfall interception in forest, I. Derivation of the model from observations in a plantation of *Corsican pine*. *Agricultural Meteorology*. 367-384.

32. Sadeghi, S. M.; Attarod, P.; Pypker, T. G. 2015. Differences in Rainfall Interception during the Growing and Non-growing Seasons in a *Fraxinus rotundifolia* Mill. Plantation Located in a Semiarid Climate. Journal of Agricultural Science and Technology. 171: 145-156.
33. Santiago-Hernández, L. 2007. Medición y análisis de la intercepción de lluvia en un bosque de encino: aplicación a la Microcuenca la Barreta. Tesis de grado de Maestría en Ciencias. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. México. 143 p.
34. Tivo-Fernández, Y. 2004. Evaluación del polen de la población de *Pinus hartwegii* Lindl. del Cofre de Perote, Veracruz, México. Tesis de grado de Maestría en Ciencias. Instituto de Genética Forestal. Universidad Veracruzana. México. 157 p.
35. Torres-Rojo, J. M. 2014. Exploring volume growth-density of mixed multiaged stands in Northern México. Agrociencia. 48: 447-461.
36. Ullca, A.; Rivera, S.; Barbier, B. 2001. Intercepción de la lluvia por cuatro tipos de cobertura vegetal, en la cuenca del Río Jalapa, Yorito, Departamento de Yoro, Honduras. Escuela Nacional de Ciencias Forestales. 73-83.

CAPÍTULO 4

ESTIMACIÓN DE INTERCEPCIÓN DE LLUVIA EN PINO (*Pinus hartwegii*) Y OYAMEL (*Abies religiosa*) UTILIZANDO MODELOS ANALÍTICOS Y NUBES DE PUNTOS⁴

ESTIMATED RAINFALL INTERCEPTION BY PINO (*Pinus hartwegii*) AND OYAMEL (*Abies religiosa*) USING ANALYTICAL MODELS AND POINT CLOUDS

4.1 Resumen

La intercepción de lluvia por dosel como abstracción del ciclo hidrológico es un componente crítico en los balances hídricos a nivel cuenca, por lo que su comprensión resulta muy importante; debido a ello, en años recientes diversos autores han propuesto distintos modelos para explicar este proceso e identificar cuál de ellos se adapta mejor a cada especie forestal. En este contexto, esta investigación tuvo como propósito evaluar los modelos Gash (1979) y Gash modificado por Valente en *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa*, utilizando mediciones de 20 eventos de precipitación registrados en los meses de mayo y junio de 2018. La tasa de evaporación se calculó por el método de Penman-Monteith (PM) y por el propuesto por Gash (GASH). Los parámetros de dosel también se calcularon con dos métodos, uno gráfico (A) y un método nuevo (B), propuesto en esta investigación, mediante nubes de puntos generadas con fotogrametría de drones. Para *P. hartwegii*, el modelo Gash (1979) con la tasa de evaporación de Gash y el método A para los parámetros de dosel fue el más preciso con un RMSE de 0.37 mm. En *A. religiosa*, el mejor ajuste lo presentó el modelo Gash modificado por Valente, con la tasa de evaporación de PM y el método nuevo propuesto B, con un RMSE de 0.61 mm.

⁴ Tesis: Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Claudia Bolaños Sánchez
Director de tesis: Dr. J. Víctor Prado Hernández

Palabras clave: *Especies forestales, fotogrametría de drones, nube de puntos, modelación.*

4.2 Abstract

The canopy rainfall interception as an abstraction of hydrological cycle is a critical component in water balances at basin level, so its understanding is very important; due to this, recently several authors have proposed different models to explain this process and identify which one best suits each forest species. In this context, the following research aimed to evaluate the performance of the Gash model (1979) and the Gash model modified by Valente in *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa*, using measurements of 20 rainfall events recorded in May and June 2018. The evaporation rate was calculated by the Penman-Monteith method (PM) and by that proposed by Gash (GASH). The canopy parameters were also calculated with two methods, one graph (A) and one new method (B), proposed in this research, using point clouds generated with drone photogrammetry. For *P. hartwegii*, the Gash model (1979) with the Gash evaporation rate and method A for canopy parameters was the most accurate with an RMSE of 0.37 mm. In *A. religiosa*, the best adjustment was presented by the modified Gash model by Valente, with the evaporation rate of PM and the proposed new method B, with an RMSE of 0.61 mm.

Keywords: *drone photogrammetry, modelling, points cloud, forest species*

4.3 Introducción

La intercepción de lluvia por dosel es el proceso hidrológico en el que las cubiertas vegetales retienen en su follaje una fracción dinámica de la precipitación incidente, e influye en la cantidad real de escurrimiento, evaporación e infiltración que intervienen dentro del ciclo hidrológico. Derivado de ello resulta importante cuantificar y modelar la cantidad de precipitación interceptada para incluirla dentro de los balances hídricos a nivel cuenca y evaluar los efectos de las cubiertas vegetales en la cantidad de recursos hídricos disponibles. (Cantú & Okumara, 1996; Pérez-Arellano *et al.*, 2015).

La mayoría de los modelos utilizan como principio el balance hídrico en el follaje, e incluyen variables asociadas a las características estructurales de las cubiertas vegetales y de las condiciones meteorológicas del sitio (Carlyle-Moses & Gash, 2011; Fan *et al.*, 2014). Horton (1919) a principios del siglo XX fue el primero en plantear un modelo basado en la capacidad de almacenamiento del dosel, duración de la tormenta, tasa y superficie de evaporación e intensidad de lluvia, con ello estableció las bases para que años más tarde algunos investigadores desarrollaran modelos más complejos y exactos, que actualmente siguen vigentes y son considerados como modelos clásicos de la intercepción de lluvia (Chen *et al.*, 2012; Valente *et al.*, 1997). El primero de ellos es el modelo Rutter; estructurado para ser un modelo físicamente basado, que implica un análisis estricto de las tormentas y requiere de diversas variables, (Rutter *et al.*, 1971, 1975), después surgió el modelo Gash (1979, 1995) que simplificó el modelo Rutter a través de expresiones analíticas, pero conservando el fundamento físico, y mejorando la estimación de la tasa de evaporación en su última reformulación. Posteriormente surgieron modificaciones de los modelos originales (Hörmann *et al.*, 1996; Liu, 1988,1997; Murakami 2007; Valente *et al.*, 1997; Van Dijk & Bruijnzeel, 2001; y Xiao *et al.* (2000) y nuevas propuestas como modelos numéricos (Mulder, 1985), estocásticos (Calder, 1986) y empíricos parametrizados (Fan *et al.* (2007). Carlyle-Moses & Gash (2011) sugieren incluir el uso de tecnologías emergentes como herramientas para precisar y mejorar la estimación de la intercepción de lluvia, tales como la percepción remota mediante imágenes de satélite, fotogrametría, radar, y LIDAR que pueden cuantificar la arquitectura de dosel. Debido a ello recientemente han surgido investigaciones que hacen uso de este tipo de tecnologías y modelos previos para calcular la intercepción (Cui & Jia, 2014; Hassan *et al.*, 2017; Vegas *et al.*, 2012).

Dada la gran variedad de modelos que existen y su aplicabilidad para predecir la intercepción de lluvia, es importante identificar qué modelo es apropiado y corresponde con las características de cada cubierta vegetal. De acuerdo a lo reportado por Muzylo *et al.* (2009) el modelo más aplicado es el modelo Gash original con sus reformulaciones y se ha empleado en diferentes cubiertas vegetales

como: bosques mediterráneos (David *et al.*, 2006; Hassan *et al.*, 2017; Limousin *et al.*, 2008; Valente *et al.*, 1997), bosques tropicales (Schellekens *et al.*, 1999), bosques de coníferas (Chen *et al.*, 2013; Cui & Jia, 2014; Fan *et al.*, 2014), arbustos y herbáceas (Herbst *et al.*, 2006; Zhang & Li, 2016), bosques secundarios (Deguchi *et al.*, 2008; Ghimire *et al.*, 2016), bosques caducifolios (Klingaman *et al.*, 2007) y en vegetación semiárida (Sadeghi *et al.*, 2014).

Los bosques de *P. hartwegii* y *A. religiosa* son dominantes en la Sierra Nevada perteneciente al Eje Neovolcánico, y su importancia es derivada de la riqueza biológica que albergan, la captura de carbono y su influencia en la disponibilidad de recursos hídricos para el Valle de México y Puebla. Estudios anteriores reportan la cuantificación de la intercepción de lluvia de 26.1 y 19.2% para *A. religiosa* y *P. hartwegii*, respectivamente (Ayala *et al.*, 2016). Sin embargo, no existe una modelación basada en las características del dosel y las condiciones meteorológicas que puedan pronosticar escenarios futuros de intercepción de lluvia para estas especies y se incluyan dentro de los balances hídricos. Por lo tanto, éste trabajo de investigación tuvo como objetivos: (1) estimar la intercepción de lluvia por dosel para las dos especies bajo estudio empleando el modelo analítico original de Gash (1979) y el modelo Gash modificado por Valente; (2) obtener los parámetros de dosel y meteorológicos; (3) proponer un nuevo método para obtener los parámetros a partir de la arquitectura del dosel, obtenida con nubes de puntos y fotogrametría de drones; y, (4) evaluar la precisión de los dos modelos empleados en ambas especies.

4.4 Teoría

4.4.1 Modelo analítico de Gash (1979)

El modelo presentado por Gash en 1979 es una simplificación del modelo Rutter (Rutter *et al.*, 1971, 1975) que conserva la objetividad y razonamiento físico en su análisis y derivación, además incorpora algunas características del modelo de regresión lineal de la precipitación incidente contra la intercepción de lluvia para su deducción (Valente *et al.*, 1997).

La precipitación es representada como una serie de eventos discretos, cada uno con tres fases diferentes. Una de las fases es de humedecimiento, cuyo inicio coincide con el comienzo de la precipitación y finaliza cuando se satura el dosel. Otra de ellas es la saturación, que se presenta cuando se alcanza la máxima retención de precipitación en el follaje. La tercera fase es de secado e inicia al término de la precipitación y finaliza cuando el árbol se seca totalmente. Entre los eventos de precipitación considerados en la modelación debe existir un periodo de secado. La estimación de la intercepción de lluvia es calculada por la evaporación de la precipitación interceptada en el dosel y tronco (Cuadro 1) y a partir de la cantidad de precipitación necesaria para saturar el dosel ($P'g$) como se indica en la Ecuación 1.

$$P'g = -\frac{\bar{R}S}{\bar{E}} \ln \left\{ 1 - \frac{\bar{E}}{\bar{R}(1-p-pt)} \right\} \quad (1)$$

donde: S , es la capacidad de almacenamiento del dosel en condiciones de cero evaporación (mm); p , el coeficiente libre de traslocación (%); St , la capacidad de almacenamiento del tronco (mm); pt , la fracción de precipitación que se dirige a las ramas y tronco del árbol. Estos parámetros están asociados al dosel y se obtienen siguiendo el método gráfico descrito en el modelo Rutter (Rutter *et al.*, 1971, 1975).

Cuadro 1. Componentes de la intercepción de lluvia para el modelo analítico de Gash (1979)

Componente de la intercepción	Formulación
<i>Intercepción de lluvia por el dosel</i>	
Para m eventos de precipitación insuficientes para saturar el dosel ($P \leq P'g$)	$(1-p-pt) \sum_{j=1}^m P_{,j}$
Para n eventos de precipitación suficientemente grandes para saturar el dosel ($P \geq P'g$)	$n(1-p-pt)P'g - nS$: fase de humedecimiento $\left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right) \sum_{j=1}^n (P - P'g)$: fase de saturación nS : fase de secado
<i>Intercepción de lluvia por el tronco</i>	
Para q eventos de precipitación que logran saturar el tronco ($P \geq \frac{St}{pt}$)	qSt
Para $m+n-q$ eventos de precipitación que no saturan el tronco ($P \leq \frac{St}{pt}$)	$pt \sum_{j=1}^q P - qSt$

El modelo supone que las condiciones meteorológicas basadas en los parámetros de la tasa media de evaporación (\bar{E}) y la intensidad media de lluvia (\bar{R}) prevalecen en todos los eventos de precipitación y pueden extrapolarse para la simulación.

La \bar{E} es calculada usando la ecuación de Penman-Monteith (1965) y \bar{R} se toma del promedio de los registros meteorológicos. La teoría de Gash indica que \bar{E} y \bar{R} deben ser estimados en condiciones de saturación; sin embargo, en la práctica esta restricción es difícil de cumplir, por lo que Gash sugiere considerar al dosel saturado cuando la precipitación acumulada es igual o mayor que 0.5 mm por hora.

Este modelo tiene 3 variables de salida. Las variables son la interceptación de lluvia total I (Ecuación 2), el flujo de traslocación TH (Ecuación 3) y el flujo cortical FC (Ecuación 4). El modelo puede emplearse por evento o a nivel diario, asumiendo la ocurrencia de un solo evento por día.

$$\sum_{j=1}^{n+m} I = (n(1-p-pt)P'g) + \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right) \sum_{j=1}^n (P,j - P'g) + \left\{ (1-p-pt) \sum_{j=1}^m P,j \right\} + qSt + pt \sum_{j=1}^{m+n-q} P,j \quad (2)$$

$$TH = p \sum_{j=1}^{m+n} P,j - \left[(1-p-pt) - \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}}\right) \right] \sum_{j=1}^n (P,j - P'g) \quad (3)$$

$$FC = pt \sum_{j=1}^q P,j - qSt \quad (4)$$

4.4.2 Modelo analítico de Gash modificado por Valente *et al.* (1997)

Gash *et al.* (1995) reformuló el modelo original de 1979 con la intención de mejorar las estimaciones de interceptación de lluvia para bosques dispersos, debido a que el primer modelo no consideraba este tipo de coberteras.

El modelo asume la división del área de estudio en un área abierta y un área cubierta por dosel (c). Este enfoque mejora la precisión en la estimación de la tasa media de evaporación en condiciones de saturación, ya que ahora se identifican la evaporación del dosel y la del suelo. El cálculo de \bar{E} se realiza mediante la ecuación de Penman-Monteith al igual que en Gash (1979), pero se ajusta al parámetro c y a

la constante ϵ , que representa la relación de proporción que existe entre el dosel y tronco. De este modo ($P'g$) de la Ecuación 1 se reformula con la Ecuación 5.

$$P'g = -\frac{\bar{R}}{(1-\epsilon)\bar{E}c} * \frac{S}{c} \ln \left\{ 1 - \frac{(1-\epsilon)\bar{E}c}{\bar{R}} \right\} \quad (5)$$

Valente *et al.* (1997) sugirió que el drenaje desde el dosel (Dr_j) solo se presentaba en los eventos de precipitación que sobrepasaban la saturación. Considerando un balance de agua en el dosel para estos eventos de precipitación, el drenaje para un evento de lluvia j lo expresó con la Ecuación 6.

$$Dr_j = \left[1 - \frac{(1-\epsilon)\bar{E}c}{\bar{R}} \right] (P - P'g) \quad (6)$$

También sugirió incluir $P''g$, que representa cantidad de precipitación necesaria para saturar los troncos (Ecuación 7). La introducción de c modifica la formulación de los componentes de la intercepción de lluvia (Cuadro 2).

$$P''g = \frac{\bar{R}}{\bar{R} - (1-\epsilon)\bar{E}c} \frac{St}{pd} + P'g \quad (7)$$

Cuadro 2. Componentes de intercepción de lluvia para el modelo Gash modificado por Valente *et al.* (1997)

Componente de la intercepción	Formulación
<i>Intercepción de lluvia por el dosel</i>	
Para m eventos de precipitación insuficientes para saturar el dosel ($P \leq P'g$)	$c \sum_{j=1}^m P, j$
Para n eventos de precipitación suficientemente grandes para saturar el dosel ($P \geq P'g$)	$c [n P'g] - nS$: fase de humedecimiento $c \left[\left(\frac{(1-\epsilon)\bar{E}c}{\bar{R}} \right) \sum_{j=1}^n (P - P'g) \right]$: fase de saturación cnS : fase de secado
<i>Intercepción de lluvia por el tronco</i>	
Para q eventos de precipitación que logran saturar el tronco ($P \geq P''g$)	qSt
Para $n-q$ eventos de precipitación que no saturan el tronco ($P \leq P''g$)	$pd c \left[1 - \frac{(1-\epsilon)\bar{E}c}{\bar{R}} \right] \sum_{j=1}^n P, j - P'g$

4.3 Materiales y Métodos

4.3.1 Sitio de estudio

El área de estudio se ubicó dentro de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, localizada en el municipio de Ixtapaluca, Edo. De México, con alturas de los 3200 a 3500 msnm y una superficie de 1638 ha. La precipitación anual varía de los 900 mm a 1200 mm por año y la temperatura media anual es de 11.1 °C. La vegetación predominante es *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii* y *Alnus firmifolia* (DICIFO, 2005).

Para obtener los datos de intercepción de lluvia se instalaron dos parcelas experimentales (0.25 ha cada una), una *P. hartwegii* y otra de *A. religiosa*. El índice de área foliar promedio de *P. hartwegii* es de 2.83 y 2.99 para *A. religiosa*. Los árboles de *P. hartwegii* presentan un diámetro normal promedio de 37.56 cm y una altura promedio 21.14 m, mientras que los árboles de *A. religiosa* tuvieron un diámetro normal promedio de 50.50 cm y 23.40 m de altura promedio.

4.3.2 Instrumentación

Las mediciones se realizaron durante los meses de mayo y junio de 2018. La precipitación incidente (P , mm), temperatura media, máxima y mínima (T , T_{max} , T_{min} , °C), velocidad de viento (u , m/s), humedad relativa (HR, %), radiación solar (R_s , W/m^2) y presión barométrica (P_b , mb) fueron registrados cada 10 minutos por una estación meteorológica marca DAVIS® modelo Vantage Pro2™ Inalámbrica. El flujo de traslocación (TF, mm) se cuantificó utilizando 39 colectores colocados aleatoriamente por cada parcela, los datos fueron colectados manualmente al término de cada evento de precipitación utilizando probetas. El flujo cortical (FC, mm) se midió utilizando 5 collarines de manguera por parcela, colocados alrededor del fuste de los árboles seleccionados, la recolección de datos también fue manual utilizando probetas para la cuantificación. La intercepción de lluvia (I , mm) se estimó por evento de precipitación, restando la suma del flujo de traslocación y cortical a la precipitación incidente (Besteiro & Rodríguez, 2012).

Los equipos utilizados para la toma de fotografías fueron: un drone modelo Phantom 4 y un drone modelo Inspire, ambos marca DJI®. Sus características principales se resumen en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Especificaciones principales de los drones.

Características	Drone Phantom 4	Drone Inspire
Peso (g)	1380.0	2935.0
Velocidad máx. (m s ⁻¹)	20.0	22.0
Máx. Duración vuelo (min)	28.0	18.0
Modelo cámara	FC6310	FC350
Píxeles efectivos (M)	12.0	12.4
Tamaño de imagen	4000 x 3000	4000 x 3000

4.3.3 Parámetros meteorológicos

El cálculo de la tasa de evaporación en condiciones de saturación se realizó mediante dos métodos. El primero utilizó la ecuación de Penman-Monteith (Rutter et al., 1971; Rutter et al., 1975; Allen et al., 2006; Limousin, 2008):

$$\bar{E} = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho C_p \frac{(es - ea)}{r_a}}{\lambda(\Delta + \gamma)} \quad (8)$$

donde \bar{E} es la tasa de evaporación (mm h⁻¹), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación (Pa K⁻¹), Rn es la radiación neta (W m⁻²), G es el flujo de calor en el suelo (W m⁻²), ρ es la densidad del aire promedio a presión constante (kg m⁻³), C_p es el calor específico del aire (J kg⁻¹ K⁻¹), $(es - ea)$ es el déficit de presión de vapor del aire (Pa), r_a es la resistencia aerodinámica (m h⁻¹), λ es el calor latente de vaporización (J kg⁻¹), y γ es la constante psicométrica (Pa K⁻¹). Algunos parámetros de la ecuación (10) se estimaron a partir de datos proporcionados por la estación meteorológica (Cuadro 4). El valor de 0.15 fue utilizado para el albedo en ambas especies como es sugerido por Klingaman *et al.*, (2007) y Villalobos & Fereres (2017).

Cuadro 4. Parámetros y constantes utilizadas en el cálculo de la evaporación (E).

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidades
ρ	Densidad del aire a presión constante	1.05	kg m ⁻³
C_p	Calor específico del aire	1013.00	J kg ⁻¹ K ⁻¹
γ	Constante psicométrica	66.00	Pa K ⁻¹
λ	Calor latente de vaporización	2.45	J kg ⁻¹
α	Albedo	0.15	n/a

La resistencia aerodinámica se estimó utilizando la velocidad y rugosidad de superficie, usando una relación que asume los efectos de la estabilidad atmosférica en el dosel de los árboles (Thom, 1975; Schellekens et al., 1999)

$$r_a = \frac{(\ln \frac{Z-d}{Z_0})^2}{k^2 u} \quad (9)$$

donde r_a es la resistencia aerodinámica (m h⁻¹), k es la constante de Von Karman (0.41), Z es la altura de medición de viento (m), d es el plano de altura de desplazamiento cero (m), Z_0 representa la longitud de la rugosidad y u es la velocidad del viento (m h⁻¹). Para obtener los valores de Z_0 y d , se calcularon con 0.1 h, y 0.75 h respectivamente, donde h es la altura promedio de los árboles (Thom, 1971; Rutter *et al.*, 1975).

La tasa media de evaporación en condiciones de saturación por Penman-Monteith (PM) se obtuvo promediando los valores de todos los eventos de precipitación registrados en condiciones de saturación.

Para el segundo, se utilizó la analogía entre el modelo empírico de la Ecuación 12 y el modelo físicamente basado de Rutter (1971,1975) para obtener el modelo analítico de Gash (1979) (Ecuación 13). Puesto que la pendiente (a) de la ecuación 12 corresponde al cociente (\bar{E}/\bar{R}) de la ecuación 13, la tasa de evaporación media (\bar{E}) se obtuvo con la intensidad media de lluvia (\bar{R}) medida y la pendiente de la relación lineal entre las láminas precipitadas e interceptadas medidas de los eventos de lluvia. A esta evaporación se le denominó tasa media de evaporación de Gash (GASH). se obtuvo promediando los valores que cumplían las condiciones de saturación.

$$I = a * P + b \quad (10)$$

$$I = (\bar{E}/\bar{R}) P + \{(S + \int_0^{t'} \bar{E} dt) (1 - (\bar{E}/\bar{R}) (1 - p - pt)^{-1})\} \quad (11)$$

La intensidad de lluvia media (\bar{R}) se obtuvo del registro de la estación meteorológica, siguiendo las restricciones descritas por Gash (1979) y promediando los valores obtenidos por cada evento de precipitación.

4.3.4 Parámetros de la estructura del dosel

Los parámetros derivados del dosel para el modelo Gash (1979) fueron S, p, St, y pt. Para el modelo Gash modificado por Valente se obtuvieron los parámetros Sc, pd, y c. En la estimación de los parámetros se implementaron dos métodos: un método gráfico (A), basado en mediciones de campo y utilizando regresiones lineales, descrito por Rutter et al. (1971, 1975); y un método por nube de puntos (B), propuesto en esta investigación, basado en los valores de índice de área foliar (IAF) y fotogrametría de drones.

4.3.4.1 Método A

En el método gráfico, los parámetros S y St se determinaron mediante el intercepto en el eje de las ordenadas de la regresión lineal de la precipitación incidente contra el flujo de traslocación y cortical (Rutter *et al.*, 1971; Gash & Morton, 1978). Los valores de p y pt se asumieron como la pendiente de la regresión entre la precipitación incidente contra el flujo de traslocación y el flujo cortical, respectivamente. En el modelo Gash modificado por Valente, Sc fue calculado por el cociente de S entre c, y pd asumió el valor de pt. El parámetro c fue el porcentaje de cobertura de copas respecto al área total de estudio, obtenido de las ortoimágenes.

4.3.4.2. Método B

En este método S se calculó con la expresión: $S=0.3 \times IAF$, sugerida por Deguchi *et al.* (2006). St se obtuvo del producto de S por la constante ϵ , sugerida por Valente *et al.*, 1997 y Sc se estimó a través del cociente de S entre c. Para estimar los parámetros p, pt, pd, y c se utilizó fotogrametría de drones. La toma de fotografías se realizó en junio de 2018 en 4 vuelos (Cuadro 5), en condiciones de radiación homogéneas y estables (Bendig *et al.*, 2015). Los ajustes de la cámara se establecieron con respecto a la iluminación y se colocaron distintos puntos de control por cada parcela.

Cuadro 5. Configuración de vuelos.

Drone	Vuelo	Parcela	Altura (m)	Traslape		
				%	Tipo	
Inspire	1	<i>P. hartwegii</i>	100	90	Frontal	
				85	Lateral	
	2		100	90	Frontal	
			85	Lateral		
	3		<i>A. religiosa</i>	100	90	Frontal
					85	Lateral
4	80	90		Frontal		
		85		Lateral		

Se obtuvieron 207 fotografías para la parcela de *P. hartwegii* y 130 fotografías para la parcela de *A. religiosa*. El procesamiento de las fotografías se realizó mediante el software *Pix4D Mapper Pro*, El procesamiento de las fotografías se realizó en tres etapas secuenciales: en la etapa uno (*initial processing*), se hizo una calibración y el cómputo de puntos de control; en la etapa dos (*point cloud and mesh y DSM*), se generó la densidad de punto 3D del modelo 3D; y finalmente, en la etapa tres (*orthomosaic and index*), se construyeron modelos 3D y ortomosaicos.

Fracción de la nube de puntos en tres clases

La estimación de los parámetros p, pt, y pd se calcularon utilizando la fracción correspondiente para tres clases de la nube de puntos: vegetación verde alta (dosel), vegetación seca alta (troncos y ramas), y vegetación baja y suelos. El

procedimiento para el cálculo de la fracción de clases se hizo en tres etapas secuenciadas (Figura 1).

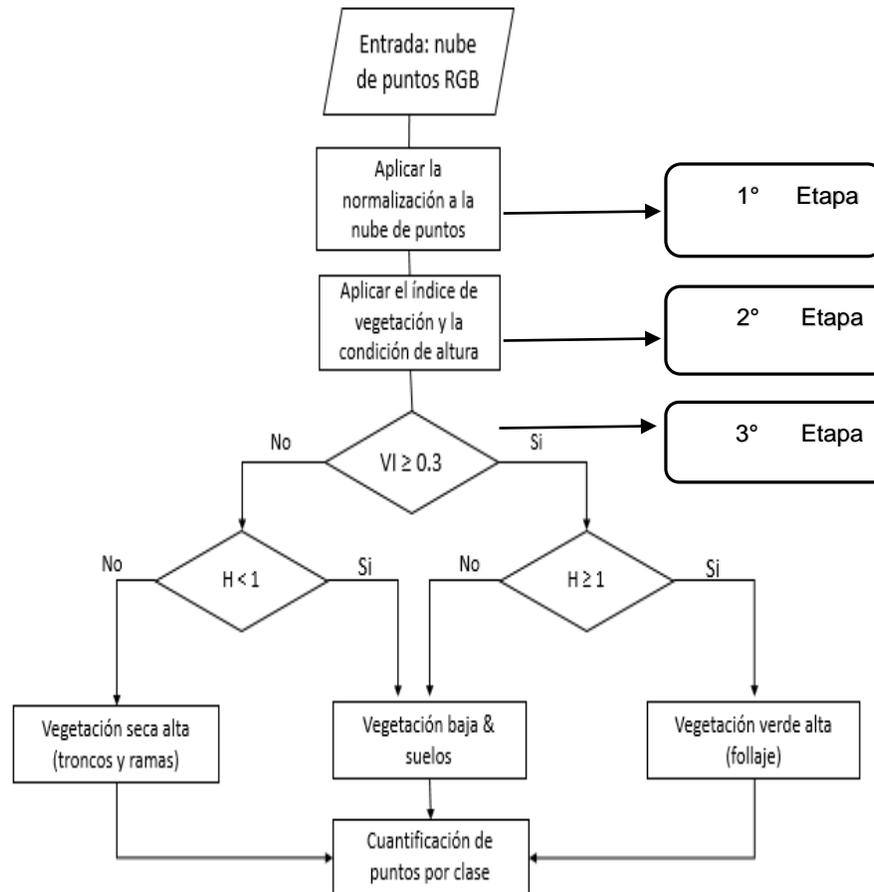


Figura 7. Diagrama de flujo del método propuesto para el fraccionamiento de la nube de puntos por clases.

La primera etapa del proceso denominada *normalización de la nube de puntos*, tuvo por objetivo calcular las alturas de los árboles, eliminando la variabilidad de los puntos en Z (altura) y las características complejas del terreno. En este proceso se hizo una rasterización de la nube de puntos utilizando la altura como valor para cada pixel, posteriormente se segmentó y se aplicó un proceso de filtrado e interpolación (Silván, 2013), para finalmente obtener la normalización de la nube de puntos y obtener el terreno como una capa distinta y separada de los árboles (Figura 2).

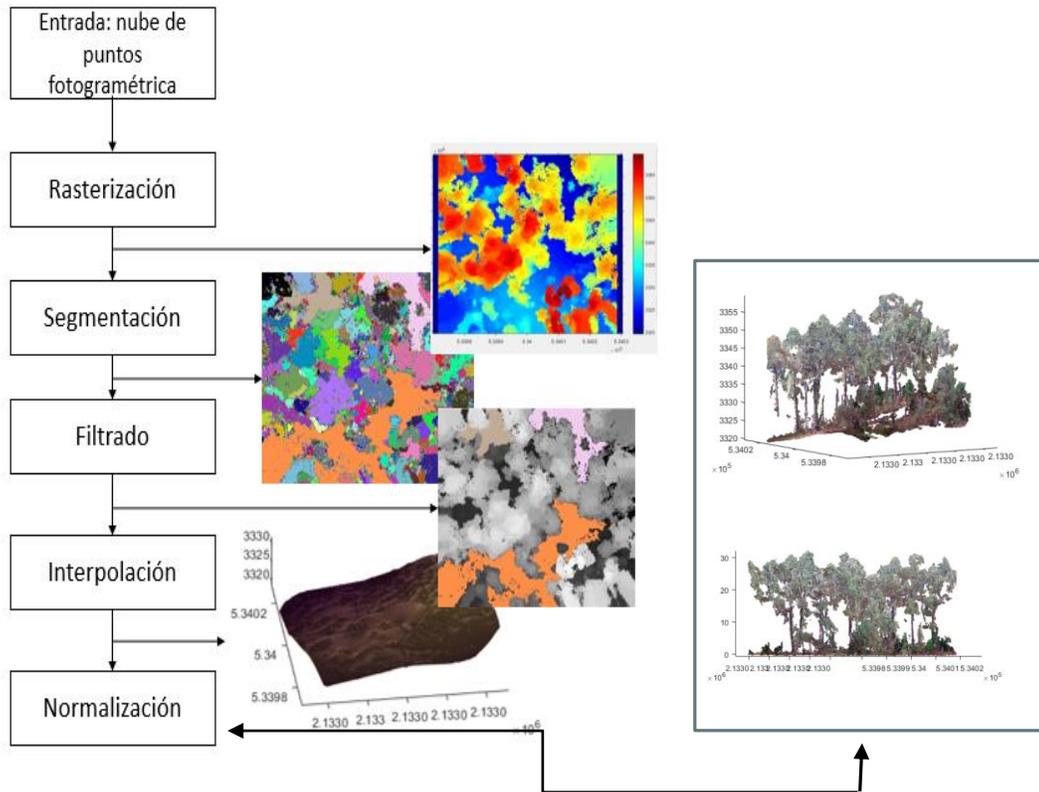


Figura 8. Diagrama de flujo para la normalización de la nube de puntos.

En la segunda etapa se obtuvo la discretización de cada punto de acuerdo a su color, tomando como referencia la ortoimagen de cada parcela y aplicando el índice de vegetación VI (Ecuación 12) sugerido por Silván (2018).

$$VI = \frac{4G - R - B}{4G + R + B} \quad (12)$$

donde VI es el índice de vegetación; G , es el valor de la reflectancia de la banda verde; R , es el valor de reflectancia de la banda roja y B representa el valor de la reflectancia de la banda azul. Los valores del índice varían de -1 a +1.

La aplicación del índice de vegetación VI se realizó en diversas áreas de la ortoimagen, esto determinó que los valores mayores o iguales que 0.3 correspondieron a vegetación, coincidiendo con otros índices de vegetación en este criterio (Zaitunnah *et al.*, 2018).

La tercera etapa tuvo como objetivo diferenciar el follaje, troncos y ramas y el suelo. Para diferenciar el follaje se usó un VI mayor o igual que 0.3 y una altura ($H=Z$) mayor o igual que 1 m. Para diferenciar los troncos y ramas se usó un VI menor que 0.3 y una altura mayor o igual que 1 m. Finalmente, para diferenciar el suelo se usó un VI menor que 0.3 o mayor o igual que 0.3 y una altura menor que 1 m.

La fracción correspondiente a la vegetación verde alta (dosel) y vegetación seca alta (ramas y troncos) se atribuyó a los parámetros p y pt , respectivamente. El parámetro pd se homologó al parámetro pt . El parámetro c se estimó con la clasificación de color en la ortoimagen, utilizando el porcentaje de área cubierta por vegetación verde y el porcentaje cubierto por suelo en cada parcela.

4.3.5 Implementación de los modelos

4.3.5.1 Eventos de precipitación

Se analizaron 20 eventos de precipitación ocurridos en los meses de mayo y junio de 2018, cada uno de ellos con una separación mínima de 6 horas sin lluvia (Hassan *et al.*, 2017) con una lámina total de 121.60 mm. El número total de eventos de precipitación se dividió aleatoriamente en dos subgrupos. El grupo uno se utilizó en conjunto, principalmente promediando las condiciones meteorológicas para la obtención de los parámetros de los modelos (Cuadro 6), y el grupo dos se usó para la validación de los modelos (Cuadro 7). En cada caso se hicieron cuatro simulaciones por modelo y por especie forestal, ya que se usaron los parámetros de la estructura de dosel obtenidos por los métodos A y B, y los valores promedio de la tasa de evaporación obtenidos por los métodos de Penman-Monteith (PM) y Gash (GASH)

Cuadro 6. Condiciones meteorológicas del grupo de eventos de precipitación para la parametrización de los modelos.

Fecha	P (mm)	R (mm h ⁻¹)	T mín. (°C)	T Máx. (°C)	T media (°C)	HR (%)	PB (mb)	u (m/s)	Rs (W m ⁻²)
19/05/2018	11.80	3.47	7.60	16.20	8.40	94.20	1007.68	1.92	18.76
21/05/2018	1.20	1.80	9.20	11.40	10.24	88.00	1009.94	1.28	73.80
06/06/2018	11.20	3.73	8.20	15.90	9.60	90.36	1005.32	2.18	28.52
07/06/2018	11.40	17.10	8.10	14.90	10.20	85.20	1002.44	5.78	18.40
13/06/2018	1.20	1.02	8.20	9.20	11.00	91.00	1012.56	2.00	231.81
13/06/2018	5.60	0.52	10.30	11.40	8.40	97.04	1011.62	0.00	4.66
15/06/2018	12.00	2.25	9.20	12.40	9.70	96.61	1008.22	1.21	16.20
21/06/2018	0.80	0.11	4.10	8.20	6.04	95.00	1011.69	0.60	1.30
22/06/2018	0.80	1.60	8.10	8.40	8.20	93.20	1012.96	0.00	0.00
24/06/2018	1.00	1.20	8.70	9.90	9.70	89.80	1011.34	0.60	90.40

Precipitación incidente (P), intensidad de lluvia media (R), temperatura mínima (T mín), temperatura máxima (T Máx), temperatura media (T media), humedad relativa (HR), presión barométrica (PB), velocidad de viento promedio (u) y radiación solar (Rs)

Cuadro 7. Condiciones meteorológicas del grupo de eventos de precipitación para la validación de los modelos.

Fecha	P (mm)	R (mm h ⁻¹)	T mín. (°C)	T Máx. (°C)	T media (°C)	HR (%)	PB (mb)	u (m/s)	Rs (W m ⁻²)
20/05/2018	11.40	3.34	3.40	14.70	6.60	94.97	1005.80	0.36	11.44
22/05/2018	2.60	2.05	7.80	11.20	8.90	90.00	1010.04	2.08	0.00
12/06/2018	6.80	0.94	7.40	10.60	8.43	95.34	1010.59	0.38	18.17
14/06/2018	17.80	1.25	7.60	10.50	9.27	96.52	1010.79	0.11	20.46
16/06/2018	3.60	0.51	6.80	10.00	8.80	96.72	1009.39	0.70	0.00
17/06/2018	16.00	3.00	10.00	13.60	11.60	92.72	1008.47	3.00	227.54
18/06/2018	1.20	1.03	9.20	10.10	9.67	98.00	1010.76	2.20	118.25
22/06/2018	0.40	0.34	7.80	8.10	7.80	95.42	1013.55	3.60	0.00
23/06/2018	0.40	0.21	8.40	8.80	8.50	93.09	1012.66	0.00	0.00
25/06/2018	4.40	0.61	7.30	11.30	8.70	94.06	1012.76	0.40	21.09

Precipitación incidente (P), intensidad de lluvia media (R), temperatura mínima (T mín), temperatura máxima (T Máx), temperatura media (T media), humedad relativa (HR), presión barométrica (PB), velocidad de viento promedio (u) y radiación solar (Rs)

4.3.6 Validación de los modelos

La evaluación de la precisión de los modelos se aplicó para el grupo de eventos de precipitación de validación y se hizo con la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés) y el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{o,i} - I_{mod,i})^2}{n}} \quad (13)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (I_{o,i} - I_{mod,i})}{\sum_{i=1}^n (I_{o,i} - \bar{I}_o)} \quad (14)$$

donde $I_{o,i}$, es la intercepción observada o medida en campo del evento de lluvia i (mm); $I_{mod, i}$, representa la intercepción modelada del evento de lluvia i (mm); \bar{I}_o es el promedio de las intercepciones observadas del número de eventos n .

Se hizo un análisis de sensibilidad de la intercepción de lluvia a los parámetros meteorológicos (\bar{E} y \bar{R}) y los asociados con la estructura del dosel (S , p , St , pt , Sc y pd) con la finalidad de identificar a aquellos de mayor influencia en los resultados. Para ello, se hicieron simulaciones de la respuesta de los dos modelos con valores modificados de los parámetros en -30%, -20%, -10%, +10%, +20% y +30%.

4.4 Resultados y discusión

4.4.1 Intercepción de lluvia, flujo de traslocación y cortical

El flujo de traslocación (TH) obtenidos para ambas especies coinciden con los encontrados en estudios anteriores en especies similares morfológicamente (Iroume & Huber, 2000; Santiago, 2007; Pérez *et al.*, 2015; Besteiro & Vagaría, 2012; Shin'ichi Iida *et al.*, 2017). El flujo cortical (FC) fue pequeño para ambas especies, representando menos del 4% de la intercepción de lluvia total, coincidiendo con lo encontrado por Llorens & Domingo (2007) quienes obtuvieron valores inferiores que el 12% (Cuadro 8).

Cuadro 8. Cuantificación de los componentes de la intercepción de los 20 eventos de lluvia.

Especie	Flujo de traslocación		Flujo cortical		Intercepción	
	mm	%	mm	%	mm	%
<i>P. hartwegii</i>	97.45	73.38	4.51	3.13	19.63	23.48
<i>A. religiosa</i>	88.77	60.61	3.54	1.89	29.27	37.49

La intercepción de lluvia estimada para *P. hartwegii* y *A. religiosa* fueron 23.48 % y 37.49%, respectivamente. Los valores encontrados se encuentran dentro de los rangos reportados en estudios con especies similares (Iroume & Huber, 2000; Besteiro & Vagaría 2012; Ghimire *et al.*, 2012; Pérez Arellano *et al.*, 2015).

4.4.2 Parámetros meteorológicos

La intensidad media de lluvia (\bar{R}) de los eventos de precipitación usados para parametrizar cada modelo en condiciones de saturación fue de 3.28 mm h⁻¹.

La tasa media de evaporación estimada con Penman-Monteith (PM) fue de 0.037 mm h⁻¹. Este parámetro se generalizó para ambas especies como lo recomiendan Ghimire *et al.* (2017), quienes sugieren que la evaporación de diferentes especies en una misma área no varía significativamente. Con el método propuesto por Gash (1979) se obtuvieron tasas medias de evaporación (GASH) de 0.43 y 0.49 mm h⁻¹ para *P. hartwegii* y *A. religiosa*, respectivamente. Los valores de (PM) resultaron aproximadamente diez veces menor que los valores estimados de (GASH) en las dos especies forestales. Estudios similares también reportan diferencias entre los valores de (PM) y (GASH), en los que los primeros son menores que los segundos (Fan *et al.*, 2014; Ghimire *et al.*, 2017; Hassan *et al.*, 2017; Klingaman *et al.*, 2007; Schellekens *et al.*, 1999).

En este estudio, las posibles causas de la discrepancia entre los valores de (PM) y (GASH) se asocian principalmente a tres aspectos: (1) hora de ocurrencia de los eventos de lluvia; (2) incertidumbre de la aplicación correcta de la resistencia aerodinámica de la vegetación sobre la topografía de la zona de estudio (Ghimire *et al.*, 2017; Hassan *et al.*, 2017); y, (3) a la dificultad de cuantificar la influencia de la densidad y estructura del dosel en la rapidez de la evaporación de las gotas de lluvia al chocar con la vegetación. Respecto al primero, los eventos de precipitación en su mayoría ocurrieron durante la tarde-noche en ausencia de energía radiante (R_n), lo cual provocó una disminución considerable en los valores estimados de la evaporación potencial durante las tormentas usando Penman Monteith (Klingaman *et al.*, 2017), ya que la ecuación otorga un peso mayor a la radiación solar como fuente principal de energía que permite el proceso de evaporación. Sin embargo a pesar de los bajos o nulos valores de radiación solar, en cada tormenta existen otros factores climáticos que permiten llevar a cabo el cambio de la precipitación líquida sobre la vegetación a vapor de agua, tales como la temperatura del aire, la humedad relativa durante y posterior a la tormenta y la velocidad del viento (Allen *et al.*, 2006;

Deguchi *et al.*, 2006). En cuanto al segundo aspecto, existe la posibilidad de que la resistencia aerodinámica de las especies bajo estudio no tenga el mismo comportamiento que el planteado por Thom (1975), quien estudio un ecosistema de vegetación escasa con árboles aislados. El tercer aspecto se refiere a la influencia de la rapidez de evaporación de las gotas de lluvia de acuerdo a su tamaño y con el choque con el dosel (Murakami, 2006).

4.4.3 Parámetros de estructura de dosel

Los valores estimados para los parámetros derivados del dosel obtenidos de los métodos A y B se resumen en el Cuadro 9.

La capacidad de almacenamiento S de ambas especies forestales resultaron en el rango reportado para bosques de coníferas de 0.3-3.0 mm (Llorens & Gallart, 2000) y son comparables a los reportados en especies forestales con características similares de 0.4-2.0 mm (Ghimire *et al.*, 2012; Iroume & Huber, 2000; Pérez, 2015; Valente *et al.*, 1997). La capacidad de almacenamiento del dosel S de *A. religiosa*, obtenida por los métodos A y B fue mayor que la estimada para *P. hartwegii*. Las diferencias se asocian a las características morfológicas propias de cada especie, así como del valor del índice de área foliar reportado, ya que de acuerdo con Zhang & Li (2016) y Ghimire *et al.* (2017) la capacidad de almacenamiento está relacionada linealmente con este índice y depende del almacenamiento específico del follaje.

El coeficiente libre de traslocación p para *P. hartwegii* resultó mayor que el estimado para *A. religiosa* con el método B, caso contrario con el método A. Sin embargo, se deduce que esta diferencia se compensó con los valores de pt para las dos especies del método B. Los valores estimados con el método A resultaron aproximadamente del 13 al 15% mayores que los calculados con la nube de puntos del método B, y sus valores son altos en comparación con el rango 0.13 a 0.62 obtenido en estudios similares (Chen *et al.*, 2013; Fan *et al.*, 2014; Ghimire *et al.*, 2012; Ghimire *et al.*, 2017; Pérez *et al.*, 2015; Valente *et al.*, 1997). Las estimaciones del método gráfico (A) al derivarse del flujo de traslocación colectado por debajo de los doseles, pudo haber provocado incertidumbre por el efecto del

choque de las gotas de lluvia con el dosel cuando este se encontraba saturado (Ghimire *et al.*, 2012). Por otra parte, los valores de p calculados a partir de la fracción de puntos correspondiente a la vegetación verde alta (dosel) suponen mejores estimaciones, debido a que se derivaron de la geometría del dosel a partir fotografías tomadas con drones en las parcelas de estudio. Los valores de p a partir del método B, resultaron semejantes a los reportados por Fan *et al.* (2014) de 0.53 para bosques de *Pinus elliotti* y *Pinus caribaea*.

La capacidad de almacenamiento del fuste St y la fracción de precipitación desviada al fuste pt resultaron pequeñas para ambas especies y en los dos métodos. Usualmente estos parámetros son mucho menores que los relacionados al follaje y no existen valores de referencia precisos, puesto que también se ven influenciados por características cualitativas del fuste y de las ramas. A consecuencia de que sus valores son bajos, su impacto no es relevante con respecto a otros parámetros en el proceso de intercepción, pero se sugiere sean considerados para mejorar la precisión de las estimaciones (Ghimire *et al.*, 2017).

El valor del parámetro c , correspondiente a la fracción de suelo que está cubierta por la copa de los árboles en cada parcela de estudio, resultó mayor en *A. religiosa*. En esta investigación no se consideró la fracción de vacíos en las copas y podría considerarse una posible fuente de error.

Cuadro 9. Valores estimados de los parámetros de la estructura de dosel.

	<i>A. religiosa</i>		<i>P. hartwegii</i>	
	Método A	Método B	Método A	Método B
S	0.80	0.89	0.70	0.85
p	0.84	0.51	0.82	0.67
St	0.03	0.02	0.45	0.19
pt	0.03	0.20	0.04	0.16
c		0.83		0.70

4.4.4 Desempeño de los modelos considerados

En *P. hartwegii*, el modelo Gash (1979) con la combinación del método gráfico (A) y la evaporación media calculada con el método de Gash (A, GASH) fue el más preciso en la estimación de la intercepción por evento, con un valor de RMSE de 0.37 mm y un NSE de 0.72 (Cuadro 10). Esto se debe a que la tasa de evaporación

utilizada (GASH) resulta derivada del mismo modelo y por lo tanto ofrece una mayor aproximación (Hassan *et al.*, 2017). En segundo lugar, el modelo Gash modificado por Valente con la combinación del método (A) y la evaporación media calculada con Penman-Monteith (A, PM) mostró un ajuste ligeramente mejor con un valor RMSE de 0.39 mm y un NSE de 0.69, que el modelo Gash (1979) con la combinación (A, P) con RMSE de 0.39 y un NSE de 0.69, ubicándose en tercer lugar en precisión.

Es importante destacar que los tres mejores ajustes fueron utilizando parámetros de dosel derivados del método gráfico (A). Sin embargo, el método propuesto (B) también arrojó buenos resultados en los dos modelos analizados, en las combinaciones (B, GASH) y (B, PM) con un RMSE de 0.42 y 0.46 mm y un NSE de 0.63 y 0.55, respectivamente. El método propuesto (B) tiene la ventaja de no requerir datos experimentales previos del flujo de traslocación y flujo cortical, lo cual se traduce en minimizar esfuerzos de trabajo de campo y costos del experimento. Los modelos que estimaron con menor exactitud las láminas interceptadas medidas por evento individual de precipitación fueron las combinaciones (A, GASH) y (B, GASH) del modelo Gash modificado por Valente. Estos modelos sobreestimaron las intercepciones con RMSE de 0.69 y 0.70 mm y un NSE de 0.01 y -0.03, respectivamente.

Cuadro 10. Valores de la intercepción observada (I obs) y modelada (I mod) para *P. hartwegii* con las combinaciones de los parámetros meteorológicos y de dosel.

No. Evento	Fecha	P (mm)	I obs (mm)	I mod del modelo Gash (1979) (mm)				I mod del modelo Gash modificado por Valente et al. (1997) (mm)			
				(A ¹ ,PM)	(A,GASH)	(B ² ,PM ³)	(B,GASH ⁴)	(A,PM)	(A,GASH)	(B,PM)	(B,GASH)
2	20/05/2018	11.40	1.68	1.25	2.05	1.14	2.10	1.27	2.54	1.16	2.42
4	22/05/2018	2.60	0.71	0.47	0.47	1.05	0.66	0.77	1.00	0.97	1.17
7	12/06/2018	6.80	1.17	1.02	1.22	1.09	1.41	0.93	1.63	1.11	1.83
10	14/06/2018	17.80	1.84	1.32	2.72	1.21	2.94	1.34	3.36	1.23	3.24
12	16/06/2018	3.60	0.55	0.65	0.65	1.38	0.84	0.81	1.15	1.08	1.42
13	17/06/2018	16.00	2.21	1.30	2.68	1.19	2.70	1.32	3.13	1.22	3.01
14	18/06/2018	1.20	0.47	0.22	0.22	0.58	0.40	0.71	0.79	0.84	0.84
18	22/06/2018	0.40	0.11	0.07	0.07	0.19	0.13	0.26	0.27	0.22	0.23
19	23/06/2018	0.40	0.13	0.07	0.07	0.19	0.13	0.26	0.27	0.22	0.23

21	25/06/2018	4.40	1.08	0.79	0.79	1.64	0.98	0.84	1.27	1.09	1.53
Σ Intercepción (mm)			9.95	7.16	10.94	9.67	12.30	8.51	15.41	9.15	15.93
RMSE			0.39	0.37	0.54	0.42	0.39	0.69	0.46	0.70	
NSE			0.68	0.72	0.40	0.63	0.69	0.01	0.55	-0.03	

¹ A: Método gráfico, ² B: Método propuesto por nube de puntos, ³ PM: Tasa media de evaporación con Penman-Monteith (\bar{E}_{PM}), ⁴ GASH: Tasa media de evaporación de Gash (\bar{E}_{GASH}). Ejemplo: en la combinación (A, PM), se usó el método gráfico (A) para calcular los parámetros del dosel y usó el método de con Penman-Monteith para calcular la evaporación.

Los modelos que tuvieron una mejor aproximación de la intercepción total acumulada para los veinte eventos de precipitación fueron las combinaciones (B, PM) y (A, PM) del modelo Gash modificado por Valente y (A, GASH) del modelo Gash, con errores relativos de -6.51%, -9.75% y 8.64% respectivamente (Figura 3a). Lo anterior coincide con los resultados de las aproximaciones por evento individual de precipitación, lo cual es satisfactorio debido a que regularmente la estimación que se utiliza más es la intercepción acumulada por periodos de tiempo; sin embargo, este tipo de estimaciones puede sobrevalorarse debido a la compensación de errores del conjunto de eventos por lo que un análisis individual para cada evento de lluvia permitirá resultados más confiables.

En el caso de *A. religiosa*, los resultados no fueron tan satisfactorios como en *P. hartwegii*, para esta especie forestal el modelo modificado por Valente con la combinación (B, PM) fue el único que obtuvo mejores resultados para predecir las láminas de intercepción por evento individual de precipitación, con un RMSE de 0.61 mm y un NSE de 0.52, este resultado es coherente con el reportado por Pérez *et al.*, (2015) para *Pinus pinea*. Para la estimación de la lámina de intercepción acumulada total, resultó más precisa la combinación (B, GASH) tanto en el modelo de Gash como en el modificado por Valente, con errores relativos del 17.86% y 26.17%, respectivamente (Figura 3b). En esta especie forestal no fue posible obtener los ocho modelos debido a que el componente $(1-p-pt) \bar{R}$ fue menor que la tasa media de evaporación (\bar{E}) cuando se calculó $P'g$, provocando con ello logaritmos negativos y la dificultad de continuar la modelación (Gash *et al.*, 1995). Lo anterior podría explicarse por la posible deficiencia en la derivación de los parámetros asociados al dosel tanto en el método (A) como (B), o porque los

modelos analíticos implementados no son los más apropiados para la especie (Peréz *et al.*, 2015).

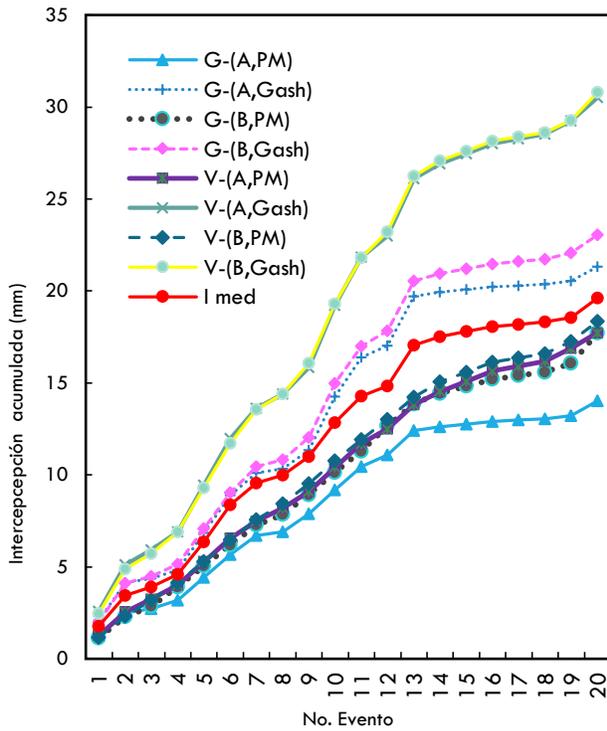
Los resultados anteriores de ambas especies, muestran que el modelo Gash es más eficiente utilizando la tasa de evaporación por el método de Gash (GASH), que aplicando la tasa de evaporación estimada por Penman-Monteith (PM). Estudios anteriores han obtenido este mismo resultado (Ghimire *et al.*, 2012; Ghimire *et al.*, 2017; Hassan *et al.*, 2017; Klingaman *et al.*, 2007; Schellekens *et al.*, 1999), reportando subestimaciones en las intercepciones estimadas con (PM), y buenas estimaciones con (GASH).

Cuadro 11. Valores de la intercepción observada (I obs) y modelada (I mod) para *A. religiosa* con las combinaciones de los parámetros meteorológicos y de dosel.

No. Evento	Fecha	P (mm)	I obs (mm)	I mod del modelo Gash (1979) (mm)			I mod del modelo Gash modificado por. Valente <i>et al.</i> (1997) (mm)			
				(A ¹ ,PM)	(B ² ,PM ³)	(B,GASH ⁴)	(A,PM)	(A,GASH)	(B,PM)	(B,GASH)
2	20/05/2018	11.40	2.76	0.92	1.22	2.79	1.29	2.76	1.82	2.69
4	22/05/2018	2.60	1.57	0.37	0.94	0.96	0.87	1.15	1.13	1.40
7	12/06/2018	6.80	2.82	0.87	1.17	1.96	1.05	1.87	1.85	2.02
10	14/06/2018	17.80	1.36	1.00	1.29	3.94	1.36	3.01	1.30	3.27
12	16/06/2018	3.60	1.65	0.50	1.13	1.25	0.92	1.32	1.14	1.55
13	17/06/2018	16.00	1.91	0.97	1.27	3.62	1.34	2.85	1.28	3.15
14	18/06/2018	1.20	0.65	0.19	0.54	0.56	0.82	0.91	0.93	1.00
18	22/06/2018	0.40	0.22	0.06	0.20	0.20	0.32	0.32	0.22	0.23
19	23/06/2018	0.40	0.18	0.06	0.20	0.20	0.32	0.32	0.22	0.23
21	25/06/2018	4.40	1.81	0.60	1.14	1.48	0.95	1.45	1.15	1.67
∑ Intercepción (mm)			14.92	5.55	9.08	16.96	9.23	15.95	11.04	17.19
RMSE				1.12	0.82	1.05	0.86	0.71	0.61	0.78
NSE				-0.63	0.14	-0.42	0.04	0.35	0.52	0.22

¹ A: Método gráfico, ² B: Método propuesto por nube de puntos, ³ PM: Tasa media de evaporación con Penman-Monteith (\bar{E}_{PM}), ⁴ GASH: Tasa media de evaporación de Gash (\bar{E}_{GASH}). Ejemplo: en la combinación (A, PM), se usó el método gráfico (A) para calcular los parámetros del dosel y usó el método de con Penman-Monteith para calcular la evaporación.

a) *P. hartwegii*



b) *A. religiosa*

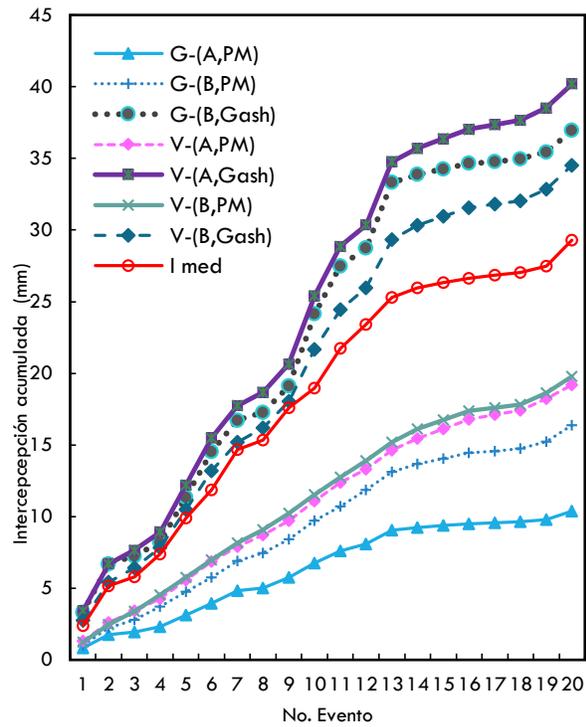


Figura 9. Intercepción de precipitación acumulada (mm) para los eventos de parametrización y validación

4.4.5 Análisis de sensibilidad

Los resultados muestran que tanto el modelo Gash (1979) como el modelo Gash modificado por Valente son sensibles a los parámetros \bar{R} , \bar{E} y S y poco sensibles a los parámetros St , pt y pd , lo que coincide con los estudios de Cui & Jia (2014), Fan *et al.* (2014), Limousin *et al.* (2008), Sun *et al.* (2014), Valente *et al.* (1997) y Zhang & Li (2016). En este estudio, un incremento del 30% en \bar{E} y S , la intercepción estimada aumenta un 11.90% y 6.54%, respectivamente. En cambio, un incremento de esta misma magnitud en \bar{R} genera una disminución en la intercepción calculada en 10.32%, la relación lineal negativa se debe a que una mayor intensidad de lluvia genera una saturación más rápida del dosel, lo que implica que el dosel intercepte menor cantidad de precipitación que con una lluvia más ligera (Figura 4).

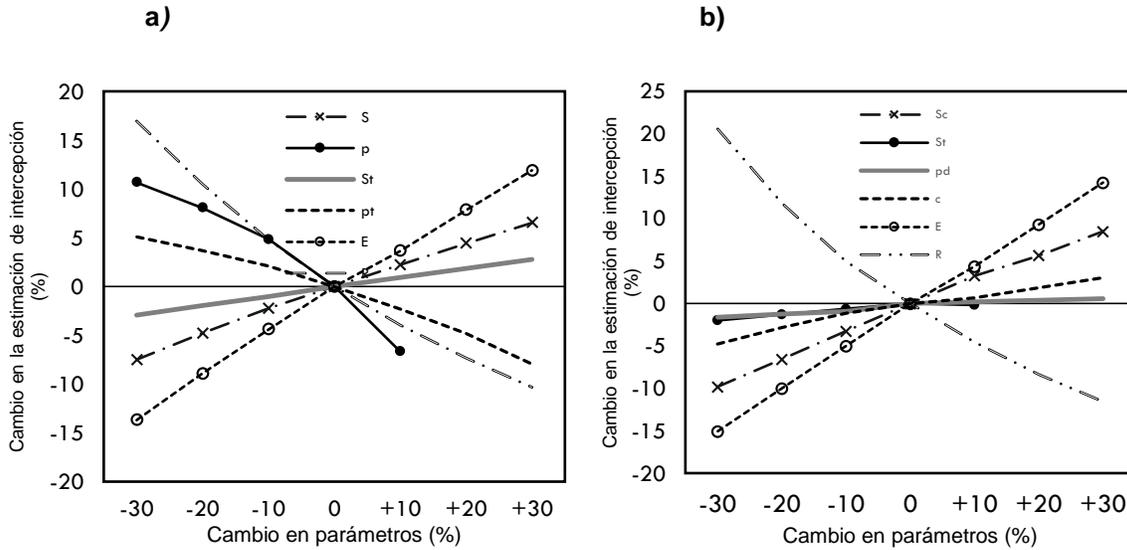


Figura 10. Análisis de sensibilidad de los parámetros para los modelos a) Gash (1979) y b) Gash modificado por Valente *et al.* (1997). No anclar las figuras y sus títulos en las páginas porque se dificulta la corrección del escrito.

En el modelo Gash modificado por Valente, el parámetro c regularmente ha sido reportado como altamente sensible al mismo nivel de \bar{R} , \bar{E} y S (Fan *et al.*, 2014 y Limousin *et al.*, 2008). Sin embargo, en este estudio el parámetro c , si bien no mostró alta sensibilidad tampoco fue despreciable, y es importante su inclusión en el modelo por ser el responsable de fraccionar el área real que corresponde a la cubierta por dosel.

4.5 Conclusiones

Para *P. hartwegii*, el modelo Gash (1979) con la tasa de evaporación de Gash y el método A para los parámetros de dosel fue el más preciso con un RMSE de 0.37 mm. En el caso de *A. religiosa*, el mejor ajuste lo presentó el modelo Gash modificado por Valente, con la tasa de evaporación de PM y el método nuevo propuesto B, con un RMSE de 0.61 mm.

El ajuste de las láminas pronosticadas a las observadas de los modelos analizados resultó más preciso por evento de lluvia que por grupo de eventos o por un período de tiempo más prolongado.

Los dos modelos analizados resultaron sensibles principalmente a los parámetros \bar{E} , \bar{R} y S.

4.6 Agradecimientos

Los autores agradecen su apoyo al personal y jefe de la EFEZ en la realización de la fase experimental y al Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial A. C. "Centro Geo" por su invaluable colaboración técnica.

4.7 Referencias

- Aguirre-Salado, C. A., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., de los Santos-Posada, H. M., & Aguirre-Salado, A. I. (2011). Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos SPOT 5 HRG: regresión y k-nn. *Agrociencia*, 45, 105-119.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) Folleto No. 56*, 1-79.
- Bedig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., . . . Bareth, G. (2015). Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 79-87.
- Besteiro, S. I., & Rodríguez Vagaría, A. M. (2012). Redistribución de las precipitaciones sobre plantaciones forestales en un predio del partido de La Plata, Buenos Aires. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 111(2), 75-82.
- Brown-Manrique, Ó., Díaz Ruíz, R., Gallardo-Ballat, Y., & Valero-Freyre, J. (2017). Caracterización de precipitaciones diarias en el municipio de Ciego de Ávila, Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38, 44-58.
- Calder, I. (1986). A stochastic model of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, 89, 65-71.
- Cantú, S., & Okurama, T. (1996). Rainfall partitioning a mixed white oak forest with dwarf bamboo undergrowth. *Journal of Environmental Hydrology*, 4.

- Carlyle-Moses , D., & Gash, J. C. (2011). Rainfall Interception Loss by Forest Canopies. En D. Levia , D. Carlyle-Moses, & T. Tanaka, *Forest Hydrology and biogeochemistry* (págs. 407-423). Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Carlyle-Moses, D. (2004). Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. *Journal of Arid environments*, 58(2), 181-202.
- Carlyle-Moses, D., & Price , A. (1999). An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. *Journal of Hydrology*, 214, 103-110.
- Carreira , J., & Niell , X. (1995). Análisis de los componentes principales sobre datos multiespectrales "Landsat-TM" e interpretación de cubiertas vegetales en las sierras de Tejada y Almirajara. *Acta Botanica Malacitina*, 153-164.
- Chen, S., Chen, C., Zou, C., Stebler, E., Zhang , S., Hou, L., & Wang, D. (2013). Application of Gash analytical model and parameterized Fan model to estimate canopy interception of a Chinese red pine forest. *J For Res*, 18, 335-344.
- Corcega, E. P., & Silva , O. E. (2011). Evaluación de la intercepción de la lluvia en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.), bosque tropical semideciduo y conuco en laderas de montaña. *Rev. Fac. Agron*, 37(2), 47-54.
- Crockford, R., & Richardson, D. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hidrological processes*, 14(1), 2903-2920.
- Cui, Y., & Jia , L. (2014). A Modified Gash Model for Estimating Rainfall Interception Loss of Forest Using Remote Sensing Observations at Regional Scale. *Journal Water*, 6, 993-1012.
- David, T., Gash , J., Valente , F., Pereira , J., & Ferreira , M. (2006). Rainfall interception by an isolated evergreen oak tree in a Mediterranean savannah. *Hidrological processes*, 20, 2713–2726.
- Deguchi, A., Hattori, S., & Park , T. (2006). The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. *Journal of Hidrology*, 318, 80-102.
- DICIFO, UACH. (2005). *Programa de manejo para el aprovechamiento de arbolado muerto en la estación forestal experimental Zoquiapan*. Manifestación de Impacto Ambiental, Modalidad Particular.
- Escalante , C., & Amores , L. (s.f.). Análisis de la precipitación en la costa de Chiapas». XI Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica y VII Seminario

Internacional del Uso del Agua. 1-5 de Octubre, ISBN: 978-607-7601-96-8, Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción.

- Fan, J., Oestergaard, K., Guyot, A., & Lockington, D. (2014). Measuring and modeling rainfall interception losses by a native *Banksia* woodland and an exotic pine plantation in subtropical coastal Australia. *Journal of hidrology*, 515, 156-165.
- Ferrero , S., & Campanella , O. (2002). Análisis de componentes principales en teledetección. Consideraciones estadísticas para optimizar su interpretación. *Revista de Teledetección*, 17, 43-54.
- Flores-Ayala, E., Guerra-De la Cruz, V., Terrazas-Gonzales, G., Carrillo-Anzures, F., Islas-Gutiérrez, F., Acosta-Mireles, M., & Buendía-Rodríguez, 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.
- Gash, J. (1979). An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 105, 43-55.
- Gash, J., Valente , F., & David , J. (1999). Estimates and measurements of evaporation from wet, sparse pine forest in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94, 149-158.
- Gavazzi, M., Sun , G., McNulty, S., Treasure , E., & Wigthman, M. (2016). Canopy rainfall interception measured over ten years in a coastal plain loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation. *Transactions of the ASABE*, 59(2), 601-610.
- Gerrits , A. M. (2006). Measuring forest floor interception in a beach forest in Luxembourg. *Hydrological Earth System Sciences*, 3, 2323-2341.
- Ghimire, C. P., Bruijnzeel, A., Lubczynski, M. W., & Bonell, M. (2012). Rainfall interception by natural and planted forests in the Middle Mountains of Central Nepal. *Journal of Hydrology*, 475, 270-280.
- Ghimire, C., Bruijnzell, A., Lubczynski, M., Ravelona, M., Zwarttendijk, B., & Meerveld, H. (2016). Measurement and modeling of rainfall interception by two differently aged secondary forests in upland eastern Madagascar. *Journal of Hydrology*, 545, 212-225.
- Gilabert , M., Piqueras , J., & Haro , J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, 8, 1-10.
- Hassan , T., Ghimire , C., & Lubczynski, M. (2017). Remote sensing upscaling of interception loss from isolated oaks: Sardon catchment case study, Spain. *Journal of Hidrology*, 555, 489-505.

- Herbst , M., Roberts , J., Rosier , P., & Gowing, D. (2006). Measuring and modelling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141, 244–256.
- Hörman , G., Branding , A., Clemen, T., Herbts , M., Hinrich, A., & Thamm, F. (1996). Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of a beech forest in Northern Germany. *Agric. For. Meteorol.*, 79, 131-148.
- Horton, R. (1919). Rainfall interception. *Monthly weather review*, 47(9), 603-623.
- INIFAP. (2015). Producción de planta de *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. & Cham. En vivero. *Folleto Técnico Núm. 19*.
- Iroume, A., & 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.
- Klingaman, N., Levia , D., & Frost , E. (2007). A Comparison of Three Canopy Interception Models for a Leafless Mixed Deciduous Forest Stand in the Eastern United States. *American Meteorological Society*, 25, 825-836.
- Léon Peláez , J. D., González Hernández , M. I., & Gallardo Lancho, J. F. (2010). Distribución del agua en tres bosques altoandinos de la Cordillera Central de Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(1), 5319-5336.
- Lida, S., Nanko , D., Sun , K., Tamai , T., & Shinohara , Y. (2017). Correction of canopy interception loss measurements in temperate forests: a comparison of necessary adjustments among three different rain gauges based on a dynamic calibration procedure. *Journal of Hydrometeorology*, 19(3), 547-553.
- Limousin , J., Rambal , S., Ourcival , J., & Joffre, R. (2008). Modelling rainfall interception in a mediterranean *Quercus ilex* ecosystem: Lesson from a throughfall exclusion experiment. *Journal of hidrology*(357), 57-66.
- Liu, J. (1988). A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy. *Ecological Modelling*, 42, 111–123.
- Llorens , P., & Gallart , F. (2000). A simplified method for forest water storage capacity measurement. *Journal of Hydrology*, 240, 131-144.
- Llorens, P., & Domingo , F. (2007). Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hidrology*, 37-54.
- López Lambraño, Á., Fuentes, C., González-Sosa, E., & López-Ramos, Á. (2017). Pérdidas por intercepción de la vegetación y su efecto en la relación

- intensidad, duración y frecuencia (IDF) de la lluvia en una cuenca semiárida. *IMTA*, VIII(4), 37-56.
- Lozano , J., & Alonso , G. (2016). El pliegue de Llumeres: aplicación de los drones para el estudio geológico. *IX Congreso Geológico de España*, Geo-Temas, 16 (1) ISSN 1576-5172.
- Mastachi , L., González, E., Becerril , R., & Braud , I. (2010). Pérdidas por interceptación en mezquite (*Prosopis laevigata*) y huizache (*Acacia farnesiana*) de la Región semiárida del centro de México. *Tecnologías y Ciencias del Agua*, 1(1), 103-120.
- Monteith , J. (1965). Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol*, 205-234.
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. México D.F.: LIMUSA.
- Morejon , M., Vega-Carreño, M., Escarré-Esteve, A., Peralta-Vital, J. L., Quintero , A. S., & Gonzalez-Piedra, J. (2015). Análisis de balance hídrico en cuencas hidrográficas de la Sierra de los Órganos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2), 94-108.
- Mulder, J. (1985). Simulating interception loss using standard meteorological data In: Hutchison, B., Hicks, B. (Eds.) *The Forest–Atmosphere Interaction*. Reidel. 77-196.
- Murakami, S. (2007). . Application of three canopy interception models to a young stand of Japanese cypress and interpretation in terms of interception mechanism. *Journal of Hydrology*, 342, 305-319.
- Muzylo, A., Llorens, P., Valente , F., Keizer, J., Domingo, F., & Gash, J. (2009). A review of rainfall interception modelling. *Journal of Hydrology*, 370, 191-206.
- Návar-Cháidez , J., Méndez-González, J., & González-Rodríguez, H. (2008). Interceptación de la lluvia en especies de leguminosas del noreste de México. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 61-68.
- Navar-Cháidez, J. (2017). Fitting rainfall interception models to forest ecosystems of Mexico. *Journal of Hydrology*, 548, 458-470.
- Oyarzún, C., Huber, A., & Vásquez, S. (1984). Balance hídrico en tres plantaciones de *Pinus radiata* L.: *BOSQUE*, 6(1), 3-14.
- Papamija-Muñoz, D., & García-Solorsano, C. (2012). Estimación del índice de área foliar en plantaciones de *Eucalyptus grandis* W. Hill. *Colombia Forestal*, 15(2), 261-271.

- Peduzzi, A. (2007). Leaf Area Assessments of the overstory and understory vegetation in pine plantations located in south Georgia and North Florida, US. (M.Sc. Thesis). Raleigh: North Carolina State University. 42 p .
- Pérez Arellano, R., Moreno Pérez, M., & Roldán Cañas , J. (2015). Interceptación de la lluvia en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*: efecto de diferentes parámetros climáticos. *IV Jornadas de Ingeniería del Agua La precipitación y los procesos erosivos Córdoba, 21 y 22 de Octubre 2015*.
- Possoch, M., Bieker, S., Hoffmeister, D., Bolten, A., Schelberg, J., & Bareth, G. (2016). Multi-temporal crop surface models combined with the RGB VEGETATION INDEX from UAV-Based images for forage monitoring in grassland. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1*.
- Promis , A. (2013). Medición y Estimación del ambiente lumínico en el interior del bosque. Una Revisión. *RCHSCFA*, 139-146.
- Quiñonez et al. (2015). Crecimiento en diámetro normal para *Pinus* en Durango. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(29), 108-125.
- Reid, L. M., & Lewis, J. (2009). Rates, timing, and mechanisms of rainfall interception loss in a coastal redwood forest. *Journal of Hydrology*, 375, 459–470.
- Robins, P. (1974). A Method of measuring the aerodynamic resistance to the transport of water vapour from forest canopies. *Journal of applied ecology*, 11(1), 315-325.
- Rutter, A., Kershaw, K., Robins , P., & Morton, A. (1971). A predictive model of rainfall interception in forest, I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine . *Agricultural Meteorology*, 367-384.
- Rutter, J., Morton, A., & Robins, P. (1975). A Predictive Model of Rainfall Interception in Forests. II. Generalization of the Model and Comparison with Observations in Some Coniferous and Hardwood Stands. *Journal of Applied Ecology*, 12(1), 367-380.
- Sadeghi, S. M., Attarod, P., & Pypker, T. G. (2015). Differences in Rainfall Interception during the Growing and Non-growing Seasons in a *Fraxinus rotundifolia* Mill. Plantation Located in a Semiarid Climate. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(1), 145-156.
- Sady, U. (2001). Interceptación de la lluvia por cuatro tipos de cobertura vegetal, en la cuenca del Río Jara, Yorito, Departamento de Yoro, Honduras. *Escuela Nacional de Ciencia Forestales*, 13(2), 73-83.

- Santiago-Hernández, L. (s.f.). Medición y análisis de la intercepción de lluvia en un bosque de encino: aplicación a la Microcuenca la Barreta. Tesis de grado de Maestría en Ciencias. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. México. 143.
- Schellenkens, J., Scatena, F., Bruijnzel, L., & Wickel, A. (1999). Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico. *Journal of Hydrology*, 225, 168-184.
- Silván, C. J. L. (2013) A multiscale erosion operator for discriminating ground points in LiDAR point clouds. Pattern Recognition (JA Carrasco-Ochoa, JF Martínez-Trinidad, J Salas-Rodríguez & G. Sanniti di Baja.), LNCS 7914:213-223, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-38989-4_22
- Silván, C. J. L. (2018). Documento interno: Índices de vegetación. Centro en Ciencias de Información Geoespacial A.C. "Centro Geo"
- Sun, X., Onda, Y., & Kato, H. (2014). Incident rainfall partitioning and canopy interception modeling for an abandoned Japanese cypress stand. *J FOR RES*, 19, 317-328.
- Thom, A. (1975). *Momentum, Mass and Heat Exchange of Plant Communities*. Londres.
- Tivo-Fernández, Y. (s.f.). Evaluación del polen de la población de *Pinus hartwegii* Lindl. del Cofre de Perote, Veracruz, México. Tesis de grado de Maestría en Ciencias. Instituto de Genética Forestal. Universidad Veracruzana. México. 157 p.
- Torres, R. (2014). Exploring volume growth-density of mixed multiaged stands in northern Mexico. *Agrociencia*, 48(4), 447-461.
- Valente, F., David, J., & Gash, J. (1997). Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hydrology*, 190, 141-162.
- Van Dijk, A., & Bruijnzel, L. (2001). Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model, part 1. Model description. *Journal of Hydrology*, 230-238.
- Vegas, F., Álvarez, C., García, A., & Revilla, J. (2012). Estimated distributed rainfall interception using a simple conceptual model and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *Journal of Hydrology*, 468, 213-228.

- Villalobos, F., & Ferreres, E. (2017). The radiation balance. En *Principles of Agronomy for sustainable Agriculture* (págs. 34-35). Córdoba, España: Springer.
- Xiao, Q., Mc Person, E., & Grismer, M. (2000). A new approach to modeling tree rainfall interception. *Journal of Geophysical Research*, 105, 173-188.
- Zaitunah, A., Samsuri, S., Ahmad, A., & Safitri, R. (2018). Normalized difference vegetation index (NDVI) analysis for land cover types using landsat 8 oli in besitang watershed, Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 126.
- Zhang, S.-Y., & Xiao-Yan, L. (2016). Measurement and modelling of rainfall partitioning by deciduous *Potentilla fruticosa* shrub on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*. doi:10.5194/hess-2016-589, 2016

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La intercepción de lluvia por dosel de *A. religiosa* fue mayor que la de *P. hartwegii* con 37.6% y 23.4% respectivamente. La discrepancia de los resultados se debe, principalmente, a las distintas características morfológicas y estructurales del dosel en cada especie.
- La fracción de área cubierta por dosel ejerce un control importante sobre la intercepción de lluvia, ya que representa la proporción de área disponible para almacenar precipitación.
- El flujo de traslocación presenta una relación inversa a la densidad de follaje y cobertura de copas, y una correlación positiva a la fracción de vacíos. Mientras que el flujo cortical mostró una ligera relación con el diámetro de los troncos. Sin embargo, no fue tan evidente, debido a la influencia de características cualitativas como el tipo de corteza y madera, así como de la capacidad de la madera de absorber agua de cada especie.
- La intensidad de lluvia presenta una correlación negativa a la cantidad de retención de lluvia por el dosel, y se debe principalmente al tiempo en que se alcanza el punto de saturación del follaje y no puede seguir reteniendo lluvia.
- El porcentaje de precipitación que se convierte en intercepción de lluvia al entrar al dosel decrece asintóticamente con la profundidad de precipitación, hasta alcanzar un valor casi constante (punto de saturación) y podría considerarse como el porcentaje representativo que puede alcanzar determinada especie.
- En eventos de precipitación pequeños la intercepción de lluvia puede ser relativamente grande, mientras que si los eventos son de láminas mayores la intercepción es comparativamente pequeña.

- El análisis de intercepción de lluvia es mejor cuando se procesa por rangos o frecuencias en lugar de analizar todos los eventos de precipitación como conjunto, ya que permite un análisis más detallado y profundo.
- La modelación matemática aplicada a la intercepción de lluvia permite extrapolar datos sin la necesidad de instrumentar y medir sus componentes. Los datos pueden obtenerse por tormenta, diario y en periodos de tiempo (mensual, anual, otro).
- Los modelos clásicos son los más aplicados actualmente, de ellos destaca el modelo analítico Gash con sus variantes, debido a que ofrece resultados satisfactorios al comparar las láminas calculadas a las observadas y se adaptan mejor a diversas coberturas forestales dispersas o densas. El desempeño de los modelos recae principalmente en la tasa media de evaporación, por lo que se debe ser cuidadoso en la estimación de este parámetro meteorológico.
- El proceso de evaporación en el la intercepción de lluvia no solo requiere energía solar, sino un mecanismo de transporte del vapor de agua del dosel a la atmósfera, a través de la diferencia de temperaturas del ambiente y de la superficie de las hojas, a las condiciones de humedad y viento durante y después de la tormenta.
- Para *P. hartwegii*, el modelo Gash (1979) con la tasa de evaporación de Gash y el método A para los parámetros de dosel fue el más preciso con un RMSE de 0.37 mm. En el caso de *A. religiosa*, el mejor ajuste lo presentó el modelo Gash modificado por Valente, con la tasa de evaporación de PM y el método nuevo propuesto B, con un RMSE de 0.61 mm.

5.2 Recomendaciones

- Considerando el proceso de investigación y las implicaciones que se tuvieron a lo largo del periodo experimental y de análisis, se sugiere prestar atención a los siguientes puntos con la finalidad de mejorar futuras investigaciones en este tema.
- La instrumentación debe ser previamente calibrada, aunque no sea automatizada.
- En el caso de la instrumentación, es importante experimentar previamente distintos métodos de medición, para distinguir que instrumentos son los más adecuados y precisos dependiendo de la especie bajo estudio y las condiciones del área.
- En el caso del flujo de traslocación, independientemente del tipo de colector usado, es recomendable automatizar el proceso de medición, ya que disminuye errores de medición y precisión, además de disminuir el trabajo manual al investigador. Automatizar los colectores permitiría realizar el análisis de distribución en el tiempo de la intercepción de lluvia.
- Para el flujo cortical, se debe tener especial cuidado al colocar los collarines de manguera, ya que el escurrimiento de la lluvia por el tronco ocurre con mayor influencia de un lado, usualmente el escurrimiento es contrario a la dirección de la caída natural del árbol. También se sugiere evitar arboles con canales en el tronco o demasiado inclinados.
- Se sugiere analizar la intercepción de lluvia por individuo aislado, y realizar un acomodo radial de colectores que permita identificar el área de influencia de intercepción de lluvia por árbol.
- La estimación de intercepción de lluvia se sugiere sea para, mínimo, un periodo anual, con la finalidad de tener más eventos para el análisis.
- El cálculo de un balance hídrico con todos sus componentes en una parcela experimental demostraría la importancia e impacto de la intercepción de lluvia en el proceso hidrológico.

- El cálculo de fracción de vacíos es indispensable en el estudio de intercepción de lluvia, se sugiere obtener esta variable a través de un densímetro forestal y estimarla en las áreas de medición.
- El método propuesto en esta investigación debe seguir probándose en otras cubiertas forestales, con la finalidad de afinar y mejorar los resultados; se sugiere utilizar este proceso en cubiertas forestales dispersas para permitir la reconstrucción de las nubes de puntos. En cuanto a la obtención de la fracción de puntos por clase, se sugiere tomar en cuenta la densidad local de puntos, lo que permitiría afinar los parámetros de dosel.
- Aplicar el nuevo método a nubes de puntos, pero obtenidas de LIDAR con RGB, y auxiliarse de otros modelos de intercepción de lluvia.