

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Forestal

Intercepción de lluvia en tres estadios sucesionales del Bosque seco Tropical, Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica



Tesis para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Forestal

César Jiménez Rodríguez (B.Sc.)

Cartago, Costa Rica.
2010

Intercepción de Lluvia en tres estadios sucesionales del Bosque Seco Tropical, Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica

Resumen

Se realizaron medidas sobre la lluvia incidente, el flujo de copas, el flujo de fustes y la intercepción de mantillo en tres estadios sucesionales de Bosque seco Tropical en el Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica. Tres parcelas permanentes de medición de 1000m² cada una, fueron establecidas para determinar la intercepción total de lluvia en cada estadio sucesional. La composición florística y la estructura de los estadios expresada por el Índice de Complejidad de Holdridge [ICH], Índice de Área Vegetal [IAV] y la Cobertura de Copas [CC] aumentan conforme se avanza en los estadios sucesionales. El periodo de muestreo fue de 53 días, registrando una precipitación total de 327,22mm, 272,06mm y 471,29mm para el estadio temprano, intermedio y tardío respectivamente. La intercepción total de la lluvia mostró diferencias estadísticas entre estadios, en donde el 20,99% de la precipitación incidente es retenida por el estadio temprano, el 40,99% por el intermedio y el 55,87% por el tardío. El flujo de fustes para todos los estadios es menor a un 1% de la lluvia mientras que la intercepción de mantillo es menor a un 2,5%. La intercepción total se correlacionó linealmente con el IAV, aumentando conforme se incrementa el área foliar de cada estadio sucesional. Las diferencias mostradas por la intercepción de lluvia de cada estadio sucesional, predicen que se debe tratar de forma independiente los análisis hidrológicos en cada tipo de bosque secundario de Bosque seco Tropical.

Palabras Clave: Flujo de Fustes, Flujo de Copas, Flujo de Mantillo, Hidrología Forestal, Bosque Secundario.

Rainfall interception in three forest stages of Tropical dry Forest. Santa Rosa National Park, Costa Rica.

Abstract

Rainfall, throughfall, stemflow and litter interception were measured in three sucesional stages of Tropical dry Forest in Santa Rosa National Park, Costa Rica. Three permanent plots of 1000m² were used to estimate total Rainfall Interception (RI). The floristic composition and forest structure were described using the Holdridge Complexity Index [HCI], Vegetal Area Index [VAI-Licor-2000] and Canopy Cover [CC in %]. All these indices increased with the maturity of each sucesional stage. The sample size was of 53 days, with a sampled total rainfall range of 327,22 mm, 272,06 mm and 471,29 mm for early, intermediate and late forest stage respectively. The RI in the early forest was around 20,99%, 40,99% in the intermediate and 55,87% in the late stage. The stemflow was less than 1% of the incident rainfall and the rain interception by the litter layer was around 2%. The RI increased linearly with the VAI. By the differences observed among sucesional stages of Tropical dry Forest it is recommended to evaluate independently each forest stages for futures studies.

Key Words: Rainfall interception, stemflow, throughfall, Litter-interception, tropical dry forest.

***Intercepción de lluvia en tres estadios sucesionales del Bosque Seco Tropical, Parque
Nacional Santa Rosa, Costa Rica***

Tesis para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Forestal

Miembros del tribunal

Julio Calvo Alvarado, Ph.D.
Escuela de Ingeniería Forestal
Profesor Guía

Bráulio Vilchez Alvarado, M.Sc.
Escuela de Ingeniería Forestal
Lector

Dagoberto Arias Aguilar, Ph.D.
Escuela de Ingeniería Forestal
Lector

Dedicatoria

A mis **Padres**.

Quienes con su esfuerzo y ejemplo, forjaron mi futuro al brindarme las mejores herramientas para labrar mi vida.

Agradecimientos

A mis padres y hermanos quienes me alentaron a continuar con mi formación.

A Cristian Baltodano quien con su esfuerzo me facilitó la toma de datos.

A mi novia Andrea Molina Alcázar y a mis amigos Pablo Artavia, Dinia Rojas y Allan Montoya, quienes me impulsaron y apoyaron en todo momento.

A mi tutor Julio Calvo Alvarado, que me brindo nuevamente la oportunidad de trabajar con él.

A todo el personal del Área de Conservación Guanacaste, quienes me apoyaron durante todo el periodo de estudio.

Al Water Stroud Research Center y al proyecto Tropi-Dry por proporcionarme el financiamiento y la oportunidad de desarrollar mi tesis.

Intercepción de lluvia en tres estadios sucesionales del Bosque Seco Tropical, Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica

Rainfall interception in three forest stages of Tropical Dry Forest. Santa Rosa National Park, Costa Rica

Índice General

Resumen	i
Abstract	ii
Miembros del tribunal	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Índice General	vi
Índice de Cuadros	viii
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Anexos.....	xi
Introducción	1
1.1 <i>Bosques secos Tropicales [Bs-T]</i>	<i>2</i>
1.2 <i>Sucesión Secundaria de Bs-T en Costa Rica</i>	<i>4</i>
1.3 <i>Hidrología de Ecosistemas Forestales</i>	<i>5</i>
1.3.1 <i>Importancia de la Intercepción de Precipitación</i>	<i>7</i>
1.3.2 <i>Intercepción de Precipitación</i>	<i>7</i>
1.3.3 <i>Síntesis climática del PNSR</i>	<i>9</i>
2.1 <i>Objetivo General.....</i>	<i>11</i>
2.2 <i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>11</i>

Metodología.....	12
3.1 <i>Descripción del sitio.....</i>	12
3.2 <i>Diseño experimental.....</i>	13
3.2.1 <i>Precipitación a Cielo Abierto.....</i>	14
3.2.2 <i>Precipitación de copas.....</i>	15
3.2.3 <i>Escorrentía de Fustes.....</i>	15
3.2.4 <i>Flujo de Mantillo.....</i>	15
3.2.5 <i>Variables Estructurales Complementarias.....</i>	17
3.3 <i>Colecta de datos.....</i>	18
3.4 <i>Análisis de datos.....</i>	19
3.4.1 <i>Estructura y Composición Florística.....</i>	19
3.4.2 <i>Intercepción de precipitación.....</i>	20
3.4.3 <i>Análisis Estadístico.....</i>	21
Resultados	23
4.1 <i>Estructura y Composición Florística.....</i>	23
4.2 <i>Intercepción de Precipitación.....</i>	26
Discusión	31
5.1 <i>Intercepción de precipitación versus Estadios sucesionales.....</i>	31
5.2 <i>Modelos de Regresión y Estimación del Error.....</i>	35
5.3 <i>Consideraciones Finales.....</i>	37
Conclusiones	40
Recomendaciones	41
Bibliografía.....	42
Anexos.....	51

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Descripción de tres estados sucesionales en el bosque seco tropical del Parque Nacional Santa Rosa (200-300msnm).....	6
Cuadro 2. Descripción florística y estructural de tres estadios sucesionales de Bosque Seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa. Costa Rica.....	13
Cuadro 3. Índices aplicados en el análisis de las parcelas establecidas en el estudio.....	20
Cuadro 4. Ecuaciones de coeficiente de variación (CV%), error de muestreo ($E(1-\alpha)$ y $E\%(1-\alpha)$) y tamaño de muestra (n) utilizadas para valorar la precisión en la estimación del coeficiente de precipitación de copas del bosque secundario.....	22
Cuadro 5. Índice de Valor de Importancia para las 10 especies con mayor valor de IVI en los tres estadios de sucesión en el Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.....	24
Cuadro 6. Índice de Shannon [H'], Índice de Complejidad de Holdridge [ICH], Índice de Área Vegetal [IAV], Cobertura de Copas (CC) y Biomasa de Mantillo [B.M.] para tres estadios sucesionales de Bosque seco tropical en el Parque Nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica.....	26
Cuadro 7. Porcentajes de intercepción de lluvia segmentada en: flujo de copas, flujo de fuste, flujo de mantillo e intercepción total para tres estadios sucesionales de Bosque seco Tropical en el Parque Nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica.....	33

Índice de Figuras

Figura 1. Distribución de la precipitación media anual y de las relaciones de Bosque seco Tropical en Costa Rica.	3
Figura 2. Diagrama conceptual de la intercepción de precipitación en ecosistemas forestales.	9
Figura 3. Distribución de años húmedos y secos del parque Nacional Santa Rosa por medio del análisis de la precipitación media móvil.	10
Figura 4. Ubicación de las parcelas permanentes de muestreo del proyecto Tropi-Dry dentro del Parque Nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica.	14
Figura 5. Instrumentos empleados para la cuantificación de los diferentes factores que afectan la intercepción de lluvia.	16
Figura 6. Diseño de muestreo para la medición del IAV en tres estadios sucesionales de bosque seco tropical empleando el <i>LAI-meter 2000</i>	18
Figura 7. Diseño de muestreo para la medición de la cobertura de copas con el <i>Densiómetro Esférico Modelo C</i> en los tres estadios de bosque sucesional seleccionados.	19
Figura 8. Representación matricial de los coeficientes de similitud de Jaccard [Cj] para tres estadios de sucesión de de Bosque Seco Tropical, Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.	25
Figura 9. Distribución de la densidad ($n \text{ ha}^{-1}$) por categoría diamétrica para tres estadios de Bosque Seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica.	25
Figura 10. Distribución del flujo de copas en función de la precipitación bruta observada para tres estadios sucesionales de Bosque Seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.	28
Figura 11. Distribución del flujo de fustes en función de la precipitación bruta observada para tres estadios sucesionales de Bosque Seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.	29
Figura 12. Distribución del flujo de mantillo en función de la precipitación bruta observada para tres estadios sucesionales de Bosque Seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.	30

Figura 13. Correlaciones entre las variables estructurales complementarias y el flujo e interceptación total para cada uno de los estadios sucesionales de Bosque Seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.	34
Figura 14. Porcentajes de error en la estimación de la precipitación de copas de tres estadios sucesionales de Bosque seco Tropical en el Parque Nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica.	37
Figura 15. Distribución espacial de la cobertura de copas (%) en tres estadios sucesionales de Bosque seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica.	39
Figura 16. Representación esquemática de las principales correlaciones existentes entre la estructura y la interceptación de lluvia para Bosques secos Tropicales en Costa Rica.	39

Índice de Anexos

Anexo 1: Representación esquemática del área de copas real y promedio de los árboles seleccionados para medir la escorrentía de fustes.	51
Anexo 2. Índice de valor de importancia para las especies del estadio de sucesión temprano en el Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.....	52
Anexo 3. Índice de valor de importancia para las especies del estadio de sucesión intermedio en el Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.....	52
Anexo 4. Índice de valor de importancia para las especies del estadio de sucesión tardío en el Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.	53
Anexo 5. Distribución en los estados sucesionales de las cinco especies con mayor valor de IVI para tres estadios de Bosque Seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica.....	53
Anexo 6: Análisis de varianza para las regresiones lineales del flujo de copas en función de la precipitación bruta observada en tres estadios sucesionales.....	54
Anexo 7: Estadísticos para las regresiones lineales del flujo de copas en función de la precipitación bruta observada en tres estadios sucesionales.	54
Anexo 8: Coeficientes para las regresiones lineales del flujo de copas en función de la precipitación bruta observada en tres estadios sucesionales.	54
Anexo 9: Análisis de varianza para las regresiones lineales del flujo de fustes en función de la precipitación bruta observada en tres estadios sucesionales.....	55
Anexo 10: Coeficientes para las regresiones lineales del flujo de fustes en función de la precipitación bruta observada en tres estadios sucesionales.	55
Anexo 11: Coeficientes para las regresiones lineales del flujo de fustes en función de la precipitación bruta observada en tres estadios sucesionales.	55
Anexo 12. Frecuencia de eventos de lluvia y precipitación acumulada para la estación meteorológica del Parque Nacional Santa Rosa.....	56
Anexo 13: Recopilación bibliográfica de estudios sobre interceptación de precipitación a nivel mundial.	57

Introducción

La clasificación y/o caracterización de los ecosistemas y bio-regiones es indispensable para la planificación del manejo de los recursos disponibles en un área determinada. La descripción de bio-regiones en Costa Rica se ha basado principalmente en dos metodologías: el Sistema de Clasificación de Zonas de Vida de Holdridge [ZVH] (Holdridge, 1967) ampliamente utilizada a nivel nacional y la Bio-Regionalización realizada por Gómez-Pignataro y Herrera (1986) asentada en las asociaciones vegetales de los diferentes ecosistemas.

Holdridge (1967) clasifica estos ecosistemas como Bosque seco Tropical [Bs-T], que junto con dos asociaciones determinadas por el régimen de bio-temperatura y precipitación media anual [principales variables para su clasificación] le brindan un carácter transicional a húmedo y viceversa. Otros autores se refieren a las asociaciones presentes en estas mismas zonas geográficas como bosques deciduos o semideciduos debido a la pérdida estacional de follaje (Holdridge *et al.*, 1971; Gómez-Pignataro y Herrera 1986). Ambos enfoques hacen hincapié en factores edáficos, geomorfológicos y climáticos que determinan la distribución de este tipo de ecosistemas.

La clasificación de Bs-T de Holdridge (1967), combina las asociaciones vegetales de bosques deciduos, semideciduos y sabanas descritas por Gómez-Pignataro y Herrera (1986), con lo cual se logra abarcar un conjunto de ecosistemas bajo un mismo régimen climático.

Costa Rica se caracteriza por poseer una amplia distribución de lluvias en todo el territorio (Figura 1), estas oscilan entre 1400mm y 8500mm anuales. Es importante destacar que la región con menor precipitación es el pacífico noroeste costarricense (Gómez-Pignataro y Herrera, 1986), donde se presenta una estación seca prolongada de hasta 6 meses.

1.1 Bosques secos Topicales [Bs-T]

Los bosques secos tropicales [Bs-T] son ecosistemas caracterizados por presentar bio-temperaturas anuales mayores a 17°C, con un régimen de precipitación que oscila entre los 500mm a los 2000mm anuales y con un periodo seco de 4 a 6 meses con poca a ninguna precipitación (Holdridge, 1967; Kalacska *et al.*, 2004). Este ecosistema es considerado como uno de los más representativos de la costa pacífica centroamericana (Janzen, 1988).

La estacionalidad de lluvias en los Bs-T es una fuerza ecológica dominante debido a los patrones de reproducción y crecimiento de muchas especies vegetales y animales que dependen principalmente de la disponibilidad de humedad durante ciertas épocas del año (Murphy y Lugo, 1986).

En Costa Rica, los Bs-T son mayormente transicionales al bosque húmedo, con algunos sectores puros de bosque seco alrededor de los Parques Nacionales Palo Verde y Santa Rosa (Bolaños y Watson, 1993). Según la descripción del mapa de zonas de vida (Bolaños y Watson, 1993), los bosques secos de Costa Rica en su condición natural inalterada, alcanzan una altura de 20 a 25 metros, la mayoría de sus especies son deciduas durante la estación seca, con fustes mayormente cortos, proporcionalmente gruesos y macizos. Estos bosques típicamente tienen epifitismo limitado (Zotz y Andrade, 2002), poseen dos estratos, son poco densos; muchas de sus especies tienen cortezas ásperas y algunas agujijones o espinas como defensas físicas (Barone y Coley, 2002).

Las presiones económicas y antropogénicas sufridas por los Bs-T, los convirtieron en uno de los ecosistemas más deforestados y menos protegidos de Costa Rica y de la región centroamericana (Janzen, 1988; Quesada y Stoner, 2004; Calvo-Alvarado *et al.*, 2009); sin embargo los cambios en la estructura y dinámica socioeconómica en Costa Rica, han causado un proceso de abandono de tierras dedicadas a la ganadería para ser restaurados naturalmente con bosques secundarios (Kalacska *et al.*, 2004). Este proceso de restauración ha cambiado el paisaje de esta región con un aumento notable de la extensión de bosques de diferentes edades o estados sucesionales.

Debido a la simplicidad del ecosistema Bs-T y a la alta capacidad de rebrote de las especies arbóreas presentes, se considera que la resiliencia de los Bs-T después de un disturbio es mayor a la de los Bosques húmedos Tropicales [Bh-T] (Murphy y Lugo, 1986) facilitando el alcanzar más rápidamente el estado de madurez en bosques secos. Esta simplicidad es mostrada principalmente por la baja diversidad de especies arbóreas (Murphy y Lugo 1986), alcanzando los mayores índices de diversidad después de los 15 años de sucesión (Heinrich y Hurka, 2004).

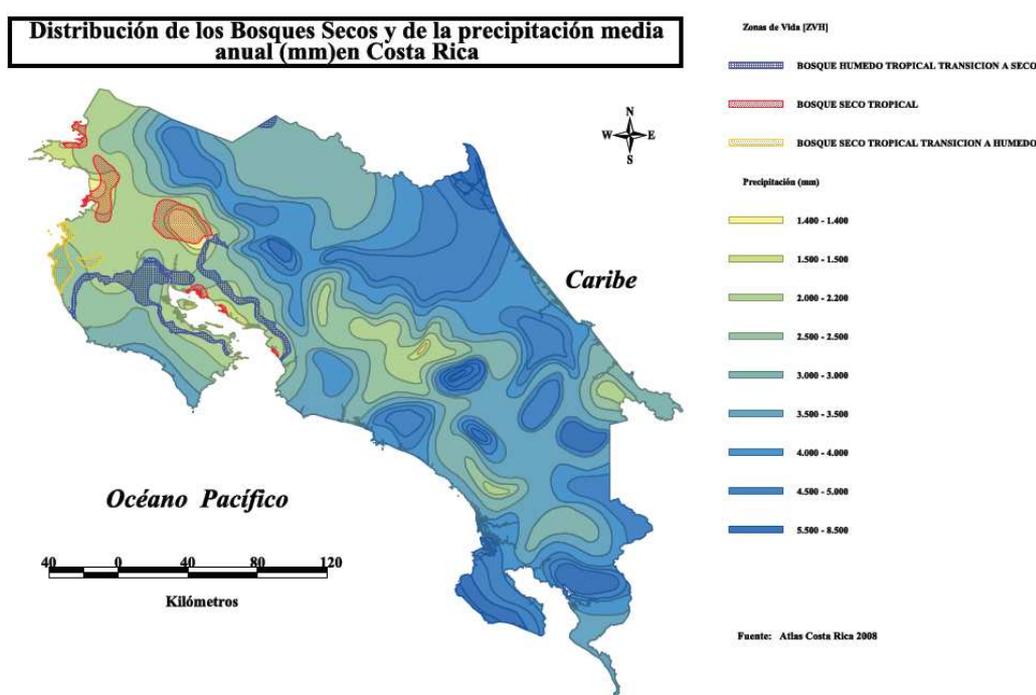


Figura 1. Distribución de la precipitación media anual y de las relaciones de Bosque seco Tropical en Costa Rica.

Por otra parte, la complejidad estructural mostrada por los Bs-T ha sido registrada como menor en relación a los Bh-T; donde parámetros como el Índice de Complejidad de Holdridge [ICH] muestra valores más elevados (Murphy y Lugo, 1986).

La importancia de la precipitación en la ecología y crecimiento de los Bs-T, se ve incrementada por la presión ejercida por el desarrollo humano en las fronteras de estos ecosistemas. Y si se considera la simplicidad de la estructura de los mismos, sería de

amplia importancia determinar el efecto estructural de los bosques secundarios sobre las tasas de intercepción de precipitación del dosel de los Bs-T.

1.2 Sucesión Secundaria de Bs-T en Costa Rica

La sucesión secundaria de Bs-T inicia con el cambio de la cobertura boscosa a otros usos tales como ganadería, cultivos agrícolas o asentamientos humanos; modificaciones provocadas por motivos económicos, sociales, naturales o por combinaciones de los mismos (Sanchez-Azofeifa, 2000; Kleinn *et al.*, 2002; Read y Lawrence, 2003).

Costa Rica experimentó una gran disminución de su masa forestal desde un 67% de cobertura en 1940 (Sader y Joyce, 1988) a un 29% en 1991 (Sanchez-Azofeifa, 2000); siendo los Bs-T los primeros en ser afectados por estos procesos de deforestación (Sader y Joyce, 1988); lo anterior produjo un cambio en la estructura y dinámica socioeconómica del pacífico noroeste de Costa Rica, lo que causo el abandono de tierras ganaderas que se han restaurado de forma natural con bosques secundarios (Arroyo *et al.*, 2005, Kalascska *et al.*, 2004). Estos cambios generan una variación en la riqueza de flora y fauna, así como un cambio estructural que podría influenciar otros aspectos relacionados con la dinámica biofísica de los sitios.

La provincia de Guanacaste (Nor-Oeste de Costa Rica) experimentó una disminución en sus actividades económicas como la caña de azúcar y el café entre los periodos 1950-1963 y 1963-1973. Posteriormente, la caña de azúcar experimentó un aumento de un 27,93%, mientras que la ganadería y el café mostraron una reducción cercana a un 2% (Costa Rica, 1995; Sanchez-Azofeifa, 2000).

La caída en los precios de la carne a finales de la década de 1970, implicó el abandono de muchas tierras ganaderas, unido esto a la creación de los Parques Nacionales Santa Rosa [PNSR] en 1971 (DE-1562-A) y Guanacaste [PNG] en 1991 (DE-20516) incentivó el aumento de bosques secundarios en las áreas de Bs-T.

La creación de ambos parques nacionales aumentó la cobertura boscosa en la región, produciendo un aumento de 4,22 km² de bosques secundarios dentro del PNG entre 1986 y 1997 y una reducción de la deforestación en las zonas de amortiguamiento desde 1960 hasta 1997 (Sanchez-Azofeifa *et al.*, 2003).

La reducción de la deforestación y el aumento de los bosques secundarios implican cambios florísticos y estructurales en los Bs-T, los cuales en su condición inalterada poseen una altura de 20m a 50m, con dos estratos verticales poco densos y especies vegetales con aguijones y cortezas ásperas (Bolaños y Watson, 1993; Bolaños *et al.*, 2005).

Para conducir adecuadamente los estudios en bosques secundarios, es imprescindible definir los estadios de bosque secundario a estudiar. Muchas investigaciones conocen con exactitud la edad de abandono del bosque (González, 2002; Spittler, 2002; Heinrich y Hurka, 2004; Hernández-Salas *et al.*, 2002; Read y Lawrence, 2003); no obstante los cambios florísticos y estructurales dirigidos por la compleja dinámica de los Bs-T (Ewel, 1980; Brown y Lugo, 1990); cuya regeneración de especies es influenciada por factores ambientales específicos (Clark y Clark, 1987) aumentan la heterogeneidad de especies en estructuras de bosque secundario con edades similares.

Las grandes perturbaciones ocasionadas a los Bs-T durante la historia, generó una ausencia en la actualidad de Bs-T prístinos en Costa Rica, razón por la cual la composición de especies de un bosque "prístino" es impredecible (Heinrich y Hurka, 2004). Kalacska (2004) utiliza el NDVI¹ para caracterizar tres estructuras de Bs-T secundario en Costa Rica (Cuadro 1) homogenizando estructuralmente a los bosques secos tropicales en tres fases de sucesión, independientemente de los requerimientos lumínicos de las especies presentes o bien de la edad de sucesión del bosque.

1.3 Hidrología de Ecosistemas Forestales

El principio fundamental de la hidrología se basa en el ciclo hidrológico (Maidment, 1992), el cual se caracteriza por el continuo movimiento del agua, desde los océanos en forma de

¹ Por sus siglas en inglés: Normalized Difference Vegetation Index.

vapor hacia tierra firme; precipitándose como lluvia, nieve, granizo y neblina; evaporándose nuevamente en algunos casos, retenida en el suelo y/o movilizándose bajo la superficie y sobre ella en una red de canales que confluyen hacia un punto en común: “los océanos” (Maidment, 1992; Davis y DeWiest, 1966). Toda esta actividad es mantenida por el sol y dirigida por la gravedad, en un interminable sistema cerrado.

Cuadro 1. Descripción de tres estados sucesionales en el bosque seco tropical del Parque Nacional Santa Rosa (200-300msnm).

Estadio Sucesional	Dosel	Rango de NDVI	Descripción
Temprano	1 estrato, 6m de altura media.	0,43-0,58	Alto porcentaje de árboles deciduos, con muchos arbustos, árboles pequeños con pastos y presencia de suelo desnudo en áreas abiertas.
Intermedio	2 estratos, 10m de altura media.	0,58-0,70	Estrato superior compuesto por especies deciduas de rápido crecimiento. El segundo estrato está compuesto por lianas y especies tolerantes a la sombra.
Tardío	2 estratos, 30m de altura media.	0,70-0,83	Regeneración de especies tolerantes a la sombra. Una pequeña cantidad de luz alcanza el piso forestal. Existen especies siempre verdes con copas traslapadas que forman un dosel continuo.

Fuente: Kalacska *et al.* 2004.

No obstante, esta compleja maquinaria hídrica puede ser subdividida en un interminable e intrincado mapa conceptual de terminología y redes; donde la simplificación en los estudios es indispensable para el entendimiento macro de todos los procesos hidrológicos que acontecen en pequeña escala.

Teniendo en cuenta la importancia de la precipitación en los Bs-T por su estacionalidad (Murphy y Lugo 1986) y la influencia de la vegetación en las tasas de evaporación y transpiración (Cavelier y Vargas 2002); se denota la importancia de la vegetación sobre el movimiento del agua dentro del bosque. Un estudio sobre tasas de intercepción en distintos tipos de vegetación provee información clave para las estimaciones de erosión que utilizan factores de cobertura vegetal como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (Hewelt,

1969; Calvo Alvarado, 1999; Shen y Julien, 1993), enfocándonos principalmente en el efecto hidrológico del cambio de uso del suelo (Calder, 1993).

1.3.1 Importancia de la Intercepción de Precipitación

El movimiento de la precipitación a través de la estructura vertical del bosque afecta las cantidades de agua que llegan efectivamente al suelo mineral. Un porcentaje de este volumen de agua es retenido en las diferentes especies y estructuras vegetales, las cuales poseen una capacidad de almacenamiento específica de agua. Al volumen de agua retenida en estas estructuras se denomina intercepción de precipitación (Dabral y Subra Rao, 1968; Fallas, 1996; Tobón-Marin, 2000).

La intercepción de la precipitación aumenta el tamaño de las gotas de agua reduciendo su velocidad, por lo que el impacto sobre el suelo es mínimo (Casey, 1996; Calvo, 1999), esto resulta en una disminución de la erosión y pérdida de nutrientes del piso forestal. Por otra parte, dada la importancia del agua para los ecosistemas vegetales y teniendo en consideración las características de los Bs-T, altas retenciones de humedad por parte del dosel aumentarían las pérdidas por evapotranspiración.

1.3.2 Intercepción de Precipitación

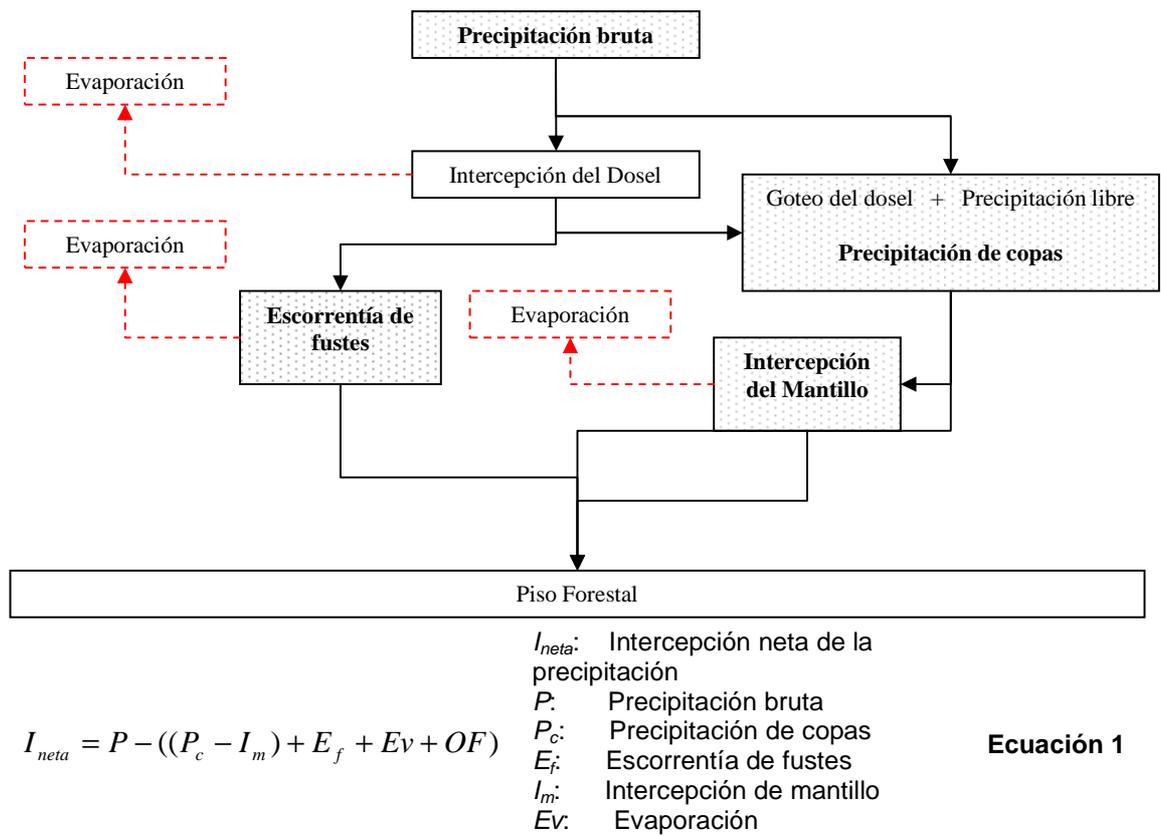
La intercepción de la precipitación incluye procesos que afectan la deposición y almacenamiento de la precipitación en la superficie de las plantas (Fallas 1996), esta intercepción depende de la frecuencia, cantidad y volumen de las precipitaciones (Casey, 1996; Cavelier y Vargas, 2002; Dabral y Subra Rao, 1968). Su importancia radica en que este componente es necesario para cuantificar las pérdidas en el balance hídrico de un lugar (Huber y Oyarzun, 1990) ya que influyen directamente en las tasas de evapotranspiración de los ecosistemas forestales.

Este componente del ciclo hidrológico ha sido subdividido por varios autores en intercepción de copas, escorrentía de fuste, precipitación de copas, intercepción total y pérdidas por

evaporación (Tobón-Marín *et al.*, 2000; Cavelier y Vargas, 2002; Filoso *et al.*, 1999; Staelens *et al.*, 2003) mostrando la importancia de la estructura de los bosques en los estudios de hidrología forestal (Tobón-Marín *et al.*, 2000).

La figura 2, muestra una recopilación de los diferentes factores vegetales y físicos que influyen en la intercepción de ecosistemas forestales. Los aportes considerados como precipitación bruta involucran: lluvia, neblina, granizo, nieve, etc. La precipitación de copas contempla las gotas de agua que se precipitan a través de los espacios libres del dosel, del goteo de las hojas y parte de las ramas; este componente debe de ser contemplado como el aporte del dosel, siendo un elemento estructural del bosque compuesto por ramas, hojas, epífitas, musgos y demás componentes que facilitan la caída del agua al piso del bosque (Fallas, 1996; Lloyd y Marques, 1988; Smith, 1993; Tobón-Marín *et al.*, 2000).

El agua que se escurre por los troncos de los árboles se conoce como escorrentía de fustes y representan un aporte de agua interceptada por las copas y movilizada por gravedad a través del tronco (Fallas, 1996; Smith, 1993). El flujo de mantillo corresponde al agua que llega efectivamente al suelo y que se mueve a través de esta capa de materia orgánica, la cual logra retener parte del agua que llega al piso forestal (Figura 2).



Adaptado de Oliveira *et al* (2008^a) y Oliveira *et al* (2008^b)

Figura 2. Diagrama conceptual de la intercepción de precipitación en ecosistemas forestales.

1.3.3 Síntesis climática del PNSR

Los regímenes de lluvias pueden cambiar año con año, dependiendo de la influencia de los fenómenos climáticos globales (Meza-Ocampo, 2001) lo que implica cambios estacionales en los ecosistemas de Bosque seco Tropical. El PNSR posee datos climáticos desde 1979, registrando satisfactoriamente la variabilidad climática desde ese periodo. Por medio de la metodología de análisis de medias móviles se pueden observar las tendencias climáticas observadas en el PNSR. El PNSR tiene un registro total de 29 años completos de medición [hasta mayo 2009], se observa un periodo seco extenso que abarca más de diez años entre 1984 a 1996, en el cual se observa un aumento de los años húmedos respecto al promedio (Figura 3).

Los últimos diez años de precipitación registrados en el Parque Nacional Santa Rosa, muestran una tendencia que aumenta hacia años húmedos, con una precipitación media anual de 1958,34 distribuidos en 136 días de lluvia. Las frecuencias medias de los eventos en los últimos 10 años, muestran que el 66% de los eventos registrados corresponden a lluvias menores a 10mm de intensidad en 24 horas de medición; acumulando el 12% de la precipitación media anual de ese periodo. Es importante destacar que más de la mitad de la precipitación media anual se registra con eventos menores a 50mm a lo largo de los últimos 10 años de registro. Los eventos mayores a 70mm existen para el sector PNSR, no obstante la frecuencia es menor a un 1% por categoría.

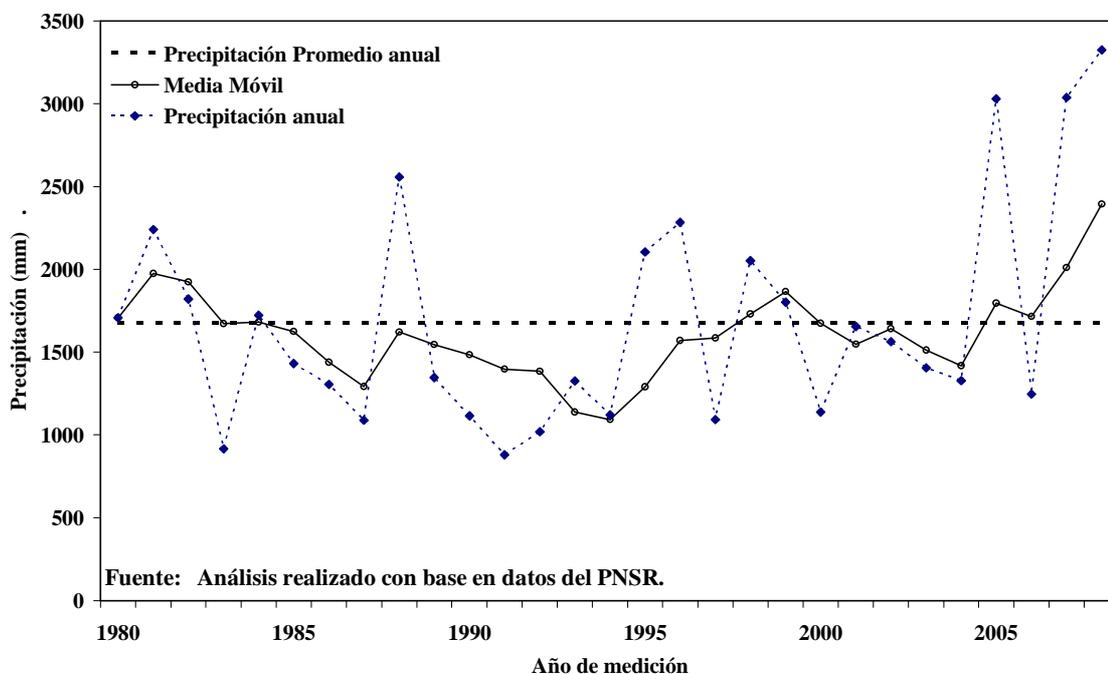


Figura 3. Distribución de años húmedos y secos del parque Nacional Santa Rosa por medio del análisis de la precipitación media móvil.

Objetivos

2.1 Objetivo General

- Estimar la intercepción de la precipitación de tres estadios sucesionales del Bosque Seco Tropical en Costa Rica.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar estructural y florísticamente los estados sucesionales.
- Medir la intercepción total de la precipitación, con base en el flujo de fustes, la intercepción de copas y mantillo para tres estadios sucesionales: temprano, intermedio y tardío.
- Comparar la intercepción entre estadios de sucesión en función de las características estructurales del bosque.
- Desarrollar modelos de regresión lineal que permitan estimar la intercepción de copa y mantillo en función de la lluvia diaria.

Metodología

La hipótesis principal del presente estudio es evaluar si existen diferencias significativas entre la intercepción de precipitación de tres estadios sucesionales de Bosque seco Tropical; y tratar de corroborar si existe una influencia de las características estructurales de los bosques que puedan explicar las posibles diferencias.

Este ensayo se estableció dentro del proyecto “Valoración y planificación recurso hídrico de la cuenca alta del Río Tempisque” conducido por la Escuela de Ingeniería Forestal en conjunto con el “Stroud Water Research Center”².

3.1 Descripción del sitio.

El estudio se realizó en el Parque Nacional Santa Rosa, creado mediante la Ley 3694 del 01 de Julio de 1966, con una extensión de 38.674,0 has terrestres. El parque contiene parte de la zona de vida Bosque seco Tropical (Bs-T) de Costa Rica; con suelos clasificados como Usthorthent según la normativa la taxonomía de suelos del USDA; y una formación geológica con rocas predominantes de tipo Ignimbritas del cuaternario y plioceno según el Mapa Geológico de Costa Rica (Ortiz, 2008).

En este Parque Nacional se establecieron 12 parcelas permanentes de muestreo en cuatro etapas sucesionales de Bs-T: pasto, bosque temprano, bosque intermedio y bosque maduro o tardío (Figura 4). Estas parcelas han sido establecidas por el Proyecto Tropi-Dry³, el cual es conducido por la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y la Universidad de Alberta, Canadá.

² Long-Term Research in Environmental Biology: Streams of the ACG [http://www.stroudcenter.org/research/ltreb/costarica/index.htm]

³ TROPI-DRY: “**Dimensiones Humanas, Ecológicas y Biofísicas de los Bosques Secos Tropicales**”; proyecto desarrollado por una red de investigación respaldada por el **Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) CRN II # 021**, y financiada por el **US National Science Foundation (Grant GEO-0452325)**.

Cada parcela tiene un área de 1.000,0 m² (50 m x 20 m); en cada unidad de muestreo se registraron todos los individuos con un diámetro superior a 5,0 cm empleando cinta diamétrica, se midieron las alturas totales (m) con el uso de vara telescópica, diámetros de copa (m) por medio de la proyección horizontal en cruz de la misma y la posición y forma de copa, según Synnott (1979).

De las parcelas establecidas, se escogieron dos que poseen ubicaciones que permiten la fácil medición de lluvia a cielo abierto. Se seleccionó una parcela de estadio temprano (parcela CR1E2, N 10,86998° - W 85,59640°), con una altura dominante de 7,13m; una densidad de árboles de 720 nha⁻¹, área basal de 6,25 m²ha⁻¹; y una alta dominancia de las especies *Rhedingera trinervis* y *Cochlospermum vitifolium* (290 nha⁻¹ y 200 nha⁻¹ respectivamente). La segunda parcela seleccionada corresponde al estadio maduro (Parcela CR1L1, N 10,85085° - W 85,60775°), present a una dominancia de *Sesbania emerus* y *Exostema mexicanum* (700 nha⁻¹ y 240 nha⁻¹ respectivamente); con un área basal de 30,62 m²ha⁻¹ y una altura dominante de 17,3 m. Para el estadio intermedio, se decidió establecer una nueva parcela dado que las tres parcelas disponibles del proyecto Tropi-Dry presentan serias limitaciones para la medición de lluvia a cielo abierto. La parcela del estadio intermedio (Parcela CR1I4, N 10,85403° - W 85,60845°) tiene una densidad de 1990 nha⁻¹ y un área basal de 23,17 m²ha⁻¹ y es dominada por las especies *Rhedingera trinervis* y *Semialarium mexicanum*.

Cuadro 2. Descripción florística y estructural de tres estadios sucesionales de Bosque Seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa. Costa Rica.

Estadio	Composición Florística		Área Basal (m ² ha ⁻¹)	Densidad (n ha ⁻¹)	Altura Dominante (m)
	Familias	Especies			
Temprano	10	13	6,25	720	7,13
Intermedio	10	17	23,17	1990	12,00
Maduro	28	45	30,62	1860	17,3

3.2 Diseño experimental

En el establecimiento de los ensayos, se utilizaron embudos con diámetros en función de las necesidades de cada variable, y recipientes capaces de almacenar volúmenes de agua

cercanos a un evento de 150mm de intensidad en 24 horas de colecta. Se ubicó un pluviómetro para recaudar la precipitación a cielo abierto por parcela, 40 para la el flujo de copas, 12 para el flujo de mantillo y cuatro árboles para recolectar el flujo de fustes.

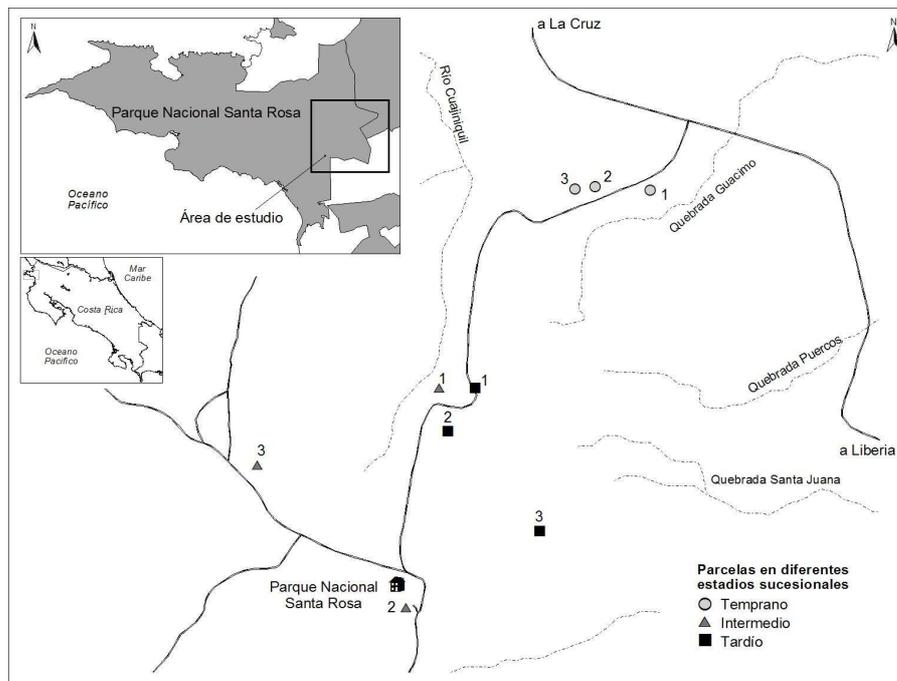


Figura 4. Ubicación de las parcelas permanentes de muestreo del proyecto Tropi-Dry dentro del Parque Nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica.

3.2.1 Precipitación a Cielo Abierto

En cada parcela seleccionada se instaló un pluviómetro a cielo abierto. Estos fueron elaborados con ductos de plástico para conectar el embudo colector con el recipiente de almacenamiento (Figura 5); este sistema permitió realizar las mediciones de forma ágil cerca de las parcelas. En la parcela temprana, el pluviómetro a cielo abierto se ubicó en un área abierta dentro de la parcela; en la intermedia, el pluviómetro se ubicó a 25 m de distancia en un claro con pastos aledaño al bosque y en la parcela Madura, el pluviómetro se colocó en un árbol de *Quercus oleoides* dentro de la parcela, situando el embudo a 2m sobre el dosel del bosque.

3.2.2 Precipitación de copas

En cada parcela se distribuyeron de forma aleatoria 40 pluviómetros de 415,47 cm² (11,5 cm de diámetro); estos colectaron diariamente el agua que fluyó directamente de las copas al piso del bosque (Figura 5). Para mejorar la estimación de esta variable, se procedió a reubicar los pluviómetros cada 5 eventos en nuevas posiciones dentro de la parcela, con la finalidad de disminuir el error aportado por la alta variabilidad en la distribución horizontal de las copas, siguiendo las recomendaciones de Skau (1964) y Tobón-Marin *et al.* (2000).

3.2.3 Escorrentía de Fustes

Se seleccionaron cuatro árboles por parcela para colectar la escorrentía de fustes. Los árboles fueron seleccionados en base a su distribución diamétrica. Se eligieron los árboles cercanos a los percentiles 20, 40, 60 y 80 de la distribución diamétrica de cada parcela. El flujo de agua fue colectado por medio de un ducto plástico adherido al fuste en forma de espiral, y unido al mismo por medio de 3 clavos de aluminio (Figura 5) y utilizando un sellador adhesivo de silicona para evitar la pérdida de agua en las mediciones.

3.2.4 Flujo de Mantillo

El flujo de mantillo se analizó bajo condiciones representativas en cada sitio; considerando la variación que pueda presentar el mantillo (Figura 5). Para esto se realizó un estudio preliminar de biomasa de mantillo en cada parcela.

3.2.4.1. Estudio preliminar de biomasa de mantillo: Se tomaron 20 muestras de mantillo al azar en cada parcela para obtener la biomasa media por metro cuadrado de cada parcela (gm⁻²). De estas muestras se determinó el promedio y la desviación estándar de biomasa de mantillo; seleccionando en cada parcela nueve muestras que representen la variación dentro de las mismas.

3.2.4.2. Ensayo de intercepción de mantillo: Se prepararon estructuras de madera con cuatro aberturas para apoyar 4 embudos de 15,3cm de diámetro en cada una de ellas. En cada embudo se colocó una malla de cedazo plástico de 2mm como plataforma para color la muestra de mantillo. Tres de los embudos se emplearon para medir el flujo del agua que pasa por el mantillo con la siguiente distribución: uno con la media de biomasa, otro con la media de biomasa más una desviación estándar y otra con la media de biomasa menos una desviación estándar, todo con el propósito de caracterizar mejor el impacto de variación del mantillo en la intercepción. El cuarto embudo se empleó como control para medir la precipitación de copa en cada punto de muestreo (Figura 5).



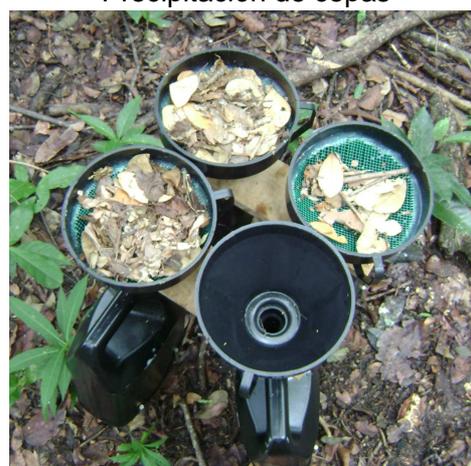
Precipitación a Cielo Abierto



Precipitación de copas



Escorrentía de Fustes



Flujo de Mantillo

Figura 5. Instrumentos empleados para la cuantificación de los diferentes factores que afectan la intercepción de lluvia.

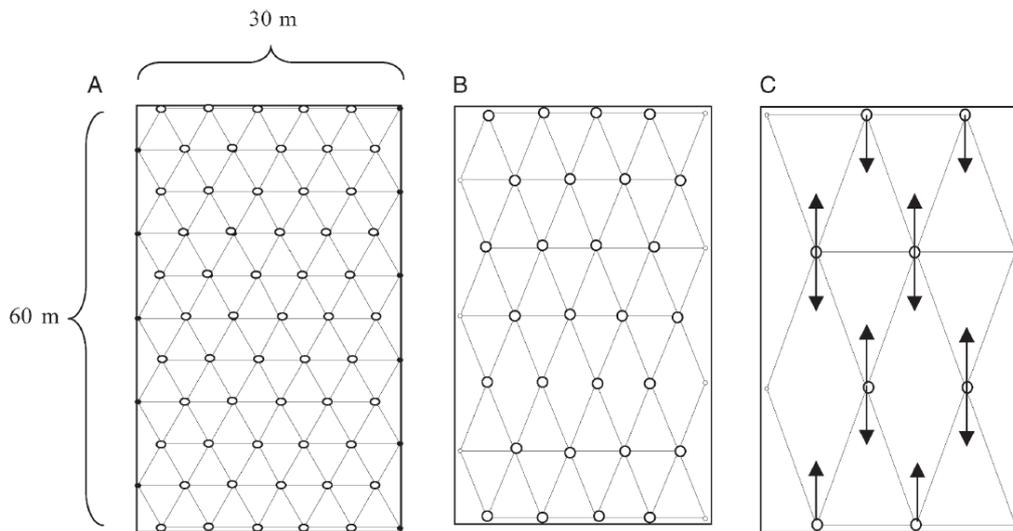
3.2.5 Variables Estructurales Complementarias

Para complementar el análisis estadístico, se midieron y estimaron en cada una de las parcelas algunas variables estructurales tales como: Índice de Área Vegetal (IAV [m^2m^{-2}]), la cobertura de copas (%) y el Índice de Complejidad de Holdridge.

3.2.5.1. Índice de Área Vegetal: El área vegetal de las parcelas varía en los bosques estacionales con el aumento de la precipitación debido al crecimiento de las hojas. Para describir los cambios de esta variable, se procedió a medir los cambios del índice de área vegetal durante el periodo bajo análisis. El Índice de Área Vegetal (IAV) se estimó con un *LAI-meter 2000 (Plant Canopy Analyzer)* y procesado por medio del software *LAI-2000 File Viewer 1.0*. El LAI-meter 2000 fue aplicado en cada parcela según la calibración propuesta por (Kalacksa *et al.*, 2004) en función de la altura dominante del dosel (Figura 6).

3.2.5.2. Cobertura de Copas: La cobertura de copas se midió por medio de un *Densiómetro Esférico Modelo C* (Robert E. Lemmon, Forest Densiometers). Esta variable se evaluó en cada parcela. Se utilizaron los centros de las 10 sub-parcelas para medir el porcentaje de cobertura de copas en las direcciones Norte, Sur, Este y Oeste (Figura 7).

3.2.5.3. Índice de Complejidad de Holdridge: El Índice de Complejidad de Holdridge es un factor utilizado para describir numéricamente la estructura de los bosques tropicales. Este índice integra los valores de área basal, densidad, altura dominante y densidad de especies (Cuadro 1), aportando un índice que describe la complejidad estructural de un ecosistema determinado (Holdridge, 1967).



Fuente: (Kalacska *et al.*, 2004)

Nota: A, estadio temprano; B, estadio intermedio; C, estadio maduro o tardío.

Figura 6. Diseño de muestreo para la medición del IAV en tres estadios sucesionales de bosque seco tropical empleando el *LAI-meter 2000*.

3.3 Colecta de datos

El periodo bajo análisis se ubicó dentro de la estación lluviosa del año 2009 (Agosto-Noviembre). La colecta de datos se realizó diariamente. Para estimar la precipitación de copas se registró el volumen contenido en 24 horas de recolección en cada pluviómetro dentro del bosque. El flujo de fustes fue registrado por medio de medidores automáticos de precipitación (Wired Rain Gauge WS-7048) y convertidos en lámina por medio del área de copa de cada uno de los árboles.

Todos los colectores de agua (cielo abierto, copa, mantillo y flujo caulinar) se midieron empleando una probeta de 250 ml (± 1 ml) y una más pequeña de 15ml (± 1 ml) para los eventos menores a 5mm. Las lecturas se realizaron de 5:00am a 8:00am. En el caso de los colectores de precipitación de copas, estos se reubicaron al azar cada 5 eventos medidos

para mejorar la estimación del error (Skau, 1964; Loyd y Marques, 1988; Tobón-Marín *et al.*, 2000).

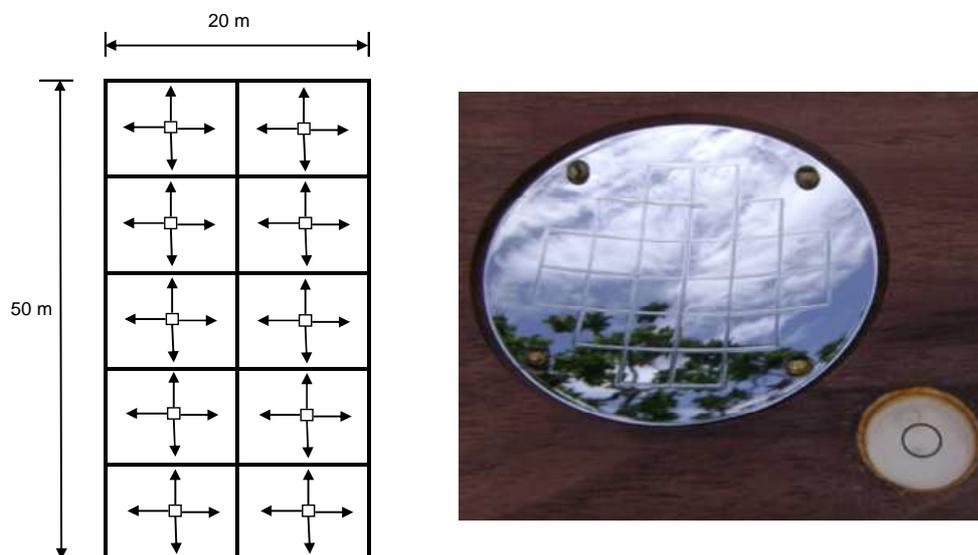


Figura 7. Diseño de muestreo para la medición de la cobertura de copas con el *Densiómetro Esférico Modelo C* en los tres estadios de bosque sucesional seleccionados.

3.4 Análisis de datos

3.4.1 Estructura y Composición Florística

La composición de especies, el Índice de Valor de Importancia [IVI] (Lamprecht, 1990), el Índice de Diversidad de Shannon [H'] (Magurran 2004, Krebs 1999) y el Coeficiente de Similitud de Jaccard [C_j] (Krebs, 1999) fueron utilizados para describir la composición florística de las parcelas. El análisis del IVI se basó en las especies con valores mayores a 10; mientras que el C_j fue aplicado en una matriz para las parcelas. La estructura de los sitios fue descrita por medio de la densidad de árboles (nh^{-1}), altura dominante (m) y el Índice de Complejidad de Holdridge [ICH] (Holdridge, 1967). El cuadro 3 muestra algunos índices preliminares para aplicar a las parcelas bajo estudio, con la finalidad de enriquecer los análisis de datos.

3.4.2 Intercepción de precipitación

Para el análisis de la intercepción de la precipitación, se procedió a dividir los flujos de agua en tres segmentos: flujo de copas [Fc], flujo de fustes [Ff] y flujo de mantillo [Fm] (Ecuación 2). Por medio de esta segmentación se estimaron los porcentajes de flujos e intercepción por cada segmento estructural del bosque para los eventos de lluvia registrados durante el periodo de muestreo. Las tendencias lineales de los flujos respecto a la precipitación bruta fueron analizadas con la finalidad de modelar los flujos; para ello se consideró el procedimiento de regresión lineal propuesto por Tobón-Marín *et al* (2000).

Cuadro 3. Índices aplicados en el análisis de las parcelas establecidas en el estudio.

Índice	Especificaciones
$C_J = \frac{2a}{a+b+c}$	A: Especies presentes en ambas poblaciones. b: Especies en muestra "A" ausentes en muestra "B". C: Especies en muestra "B" ausentes en muestra "A".
$H' = \sum_{i=1}^s (P_i)(\ln P_i)$	H': Índice de Diversidad de Especies. S: Número de Especies Pi: Proporción del total de la muestra relacionado a las especies.
$I_{CH} = \frac{HGDS}{1000}$	H: Altura Dominante (m) G: Área basal (m ² /0.1ha) D: Densidad de individuos (No./0.1ha) S: Densidad de Especies (No./0.1ha)
$IVI_{esp} = \sum (A\%, f\%, D\%)$	$IVI_{max}=300\%$, A: Abundancia, <i>f</i> : frecuencia, <i>D</i> : Dominancia.

El volumen de agua registrado en los pluviómetros a cielo abierto, debajo del bosque y en los contenedores de mantillo, fue transformado a lámina por medio del área del embudo colector, en adelante conocido como flujo laminar. El área de copas⁴ de cada uno de los árboles muestreados para el escurrimiento de fuste se consideró como el área de colecta de lluvia (Rothacher, 1963); para estimar esa área se procedió a obtener un radio medio de copa

⁴ Ver anexo 1.

en base a seis radios medidos desde el tronco hasta el borde de la copa. El promedio de flujo laminar de todos los árboles fue considerado como el flujo de fustes (F_c) de cada la parcela. El aporte del flujo de mantillo (F_m), se evaluó por medio del promedio de intercepción de cada uno de los colectores distribuidos en el piso forestal (3 repeticiones x 3 colectores, $n=9$). La ecuación 2 resume el procedimiento para determinar la intercepción de la lluvia, en ella se observan los cuatro componentes principales arriba mencionados.

$$I_p = P_b - ((P_c - I_m) + F_f)$$

Ecuación 2

I_p = Intercepción de la precipitación
 P_b = Precipitación bruta
 P_c = Precipitación de copas
 F_c = Flujo de fuste
 F_m = Flujo de mantillo

3.4.3 Análisis Estadístico

Los modelos para estimar el flujo de mantillo, el flujo de fustes y el flujo de copas fueron realizados; valorando la precisión de la estimación del coeficiente de precipitación de copas por medio del error de muestreo para cada evento. Para esto se emplearon las fórmulas del coeficiente de variación, error de muestreo y tamaño de muestra (Cuadro 4).

Los porcentajes de intercepción (P_c , F_c y F_m) se compararon entre los estadios sucesionales en estudio, con la finalidad de determinar si existen diferencias significativas en la intercepción de precipitación total. Las relaciones entre estructura e intercepción fueron analizadas por medio de un análisis de correlación entre los porcentajes de intercepción; y el índice de área vegetal, el índice de complejidad de Holdridge y el índice de diversidad de especies de Shannon. Todos los análisis estadísticos fueron realizados con los software: Statistica 6.0 (Statsoft, 2003) y Microsoft® Office Excel 2003.

Los tres componentes en los que fue segmentada la intercepción fueron analizados individualmente antes de realizar la evaluación entre tipos de bosque. Se estimaron los

porcentajes de flujos para cada una de las variables (flujo de copas, flujo de fustes y flujo de mantillo) en función de la precipitación bruta para cada evento registrado.

El análisis estadístico se basó en un Análisis de Covarianza con una $p = 0,05$; donde la precipitación bruta funge como covariable y el estado de sucesión como elemento de análisis. Bajo este diseño se valoraron las diferencias estadísticas mostradas por los porcentajes de flujos de precipitación (copas, fustes, mantillo y total). Cuando se observaron diferencias estadísticas se aplicó un test de Fisher LSD para encontrar los grupos homogéneos.

Cuadro 4. Ecuaciones de coeficiente de variación (CV%), error de muestreo ($E_{(1-\alpha)}$ y $E\%_{(1-\alpha)}$) y tamaño de muestra (n) utilizadas para valorar la precisión en la estimación del coeficiente de precipitación de copas del bosque secundario.

CV %	$E_{(1-\alpha)}$	$E\%_{(1-\alpha)}$	N
$CV\% = \frac{S}{Y} * 100$	$E_{(1-\alpha)} = Sy * t_{\alpha/2, n-1}$	$E\%_{(1-\alpha)} = \frac{E_{(1-\alpha)}}{Y} *$	$n = \frac{t^2 (CV)^2}{E\%^2}$

Nota: E = error de Muestreo; Sy = error estándar, Y = promedio; $1 - \alpha$ = nivel de confianza (5%) en este estudio); t = t de student.

Tomado de Ortiz y Carrera (2002).

Resultados

4.1 Estructura y Composición Florística

La composición florística de los estadios sucesionales seleccionados muestra una amplia variabilidad con respecto a las especies presentes. Tanto el estadio temprano e intermedio acumulan más del 250% del IVI en las primeras 10 especies, mientras que el estadio tardío mantiene menos de un 200% en las primeras 10 especies (Cuadro 5).

R. trinervis domina el estadio temprano e intermedio con valores de IVI similares ($\approx 120\%$), desapareciendo completamente en el estadio tardío; esta dominancia es dada por su alta área basal y densidad. No obstante, *C. vitifolium* muestra una densidad, frecuencia y área basal superiores al 20%, ubicándose como la segunda especie en dominancia del estadio temprano (76,09%), quien pasa a la catorceava posición en el intermedio (5,61%) y desaparece en su totalidad en el tardío. *Semialarium mexicanum* muestra una amplia movilidad entre estadios [tem.: 5^{to}; int.: 2^{do}; tar.: 7^{mo}]⁵ (Cuadro 5).

A excepción de *R. trinervis*, las especies de mayor IVI del estadio intermedio son especies poco dominantes en los otros dos estadios. Se observa claramente el aumento de IVI de *Semialarium mexicanum*, quien muestra una alta frecuencia y densidad, siendo una especie de amplia distribución en este estadio al igual que *Acacia collinssi*. *Gliciridia sepium*, *Dalbergia retusa* y *Genipa americana* presentan una buena distribución sobre la parcela debido a sus valores de frecuencia, mientras que *Bursera simarouba* tiene un área basal de importancia en este estadio⁶ (Cuadro 5).

De las 10 especies dominantes del estadio tardío, la única que esta presente como especie de importancia en los otros estadios es *Semialarium mexicanum*. *Sebastiania emerus* domina el estadio tardío (61,4 %), principalmente por su alta densidad de individuos en el bosque. Una especie importante es *Lysiloma divaricatum*, que si bien presenta pocos

⁵ Complementar con Anexos 2 y 5.

⁶ Complementar con Anexos 3 y 5.

individuos y una baja frecuencia, su gran área basal le permite dominar el espacio sobre la parcela⁷ (Cuadro 5). Las cinco especies de mayor importancia del estadio tardío, no se encuentran reportadas en las otras dos estructuras de bosque sucesional analizadas.

Cuadro 5. Índice de Valor de Importancia para las 10 especies con mayor valor de IVI en los tres estadios de sucesión en el Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.

Temprano		Intermedio		Tardío	
Especie	IVI	Especie	IVI	Especie	IVI
<i>Rhedera trinervis</i>	120,35	<i>Rhedera trinervis</i>	130,31	<i>Sebastiania emerus</i>	61,4
<i>Cochlospermum vitifolium</i>	76,09	<i>Semialarium mexicanum</i>	39,43	<i>Exostema mexicanum</i>	28,07
<i>Byrsonima crassifolia</i>	17,34	<i>Gliricidia sepium</i>	18,92	<i>Lysiloma divaricatum</i>	20,98
<i>Acacia collinssi</i>	17,04	<i>Dalbergia retusa</i>	18,80	<i>Luehea candida</i>	14,05
<i>Semialarium mexicanum</i>	15,32	<i>Genipa americana</i>	13,80	<i>Manilkara sapota</i>	13,65
<i>Crescentia sujete</i>	14,23	<i>Lonchocarpus minimiflorus</i>	11,34	<i>Ardisia pitieri</i>	13,23
<i>Swietenia microphylla</i>	7,44	<i>Machaerium biovulatum</i>	10,98	<i>Semialarium mexicanum</i>	11,65
<i>Cordia guanacastensis</i>	7,13	<i>Bursera simarouba</i>	9,46	<i>Eugenia oerstediana</i>	10,97
<i>Machaerium biovulatum</i>	6,18	<i>Dyospirus salicifolia</i>	7,86	<i>Casearia sylvestris</i>	10,44
<i>Pisonia aculeata</i>	5,23	<i>Tabebuia ochracea</i>	7,63	<i>Astronium graveolens</i>	8,03
<i>Subtotal 10 especies</i>	286,35	<i>Subtotal 10 especies</i>	268,53	<i>Subtotal 10 especies</i>	192,47
Otras especies [3]	13,65	Otras especies [7]	31,47	Otras especies [35]	107,53

Estas diferencias en la distribución de especies entre estadios sucesionales pueden ser observadas por medio de la similitud de especies entre estadios. Utilizando el coeficiente de similitud de Jaccard [Cj]⁸, se logra ver un valor de 0,55 entre el estadio temprano e intermedio; lo que implica que ambos bosques comparten más de la mitad de las especies; mientras que el porcentaje de especies compartidas entre el temprano y tardío es menor a un 10%. La relación observada entre el intermedio y tardío es de 0,28, implicando que las especies presentes en ambas estructuras es mayor a una cuarta parte (Figura 8). Con lo anterior, se logra destacar como al avanzar en la sucesión de bosques la dinámica de especies aumenta, creando las diferencias en su composición florística.

⁷ Complementar con Anexos 4 y 5.

⁸ Cuyo rango oscila entre 0 – 1.

	Temprano	Intermedio	Tardío
Temprano	1,00	--	--
Intermedio	0,55	1,00	--
Tardío	0,08	0,28	1,00

Figura 8. Representación matricial de los coeficientes de similitud de Jaccard [Cj] para tres estadios de sucesión de de Bosque Seco Tropical, Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.

La distribución de la densidad ($n\ ha^{-1}$) en los tres estadios muestra el comportamiento de “J” invertida reportado para Bosques secos Tropicales (González-Jiménez, 2002; Spittler, 2002; Meza *et al.*, 2002). El bosque temprano es el estadio que muestra el menor número de individuos en todas las categorías diamétricas, siendo la categoría 20-25cm la de mayor dimensión. El intermedio muestra el mayor número de individuos para las categorías 5-10cm y 15-20cm, con 20 $n\ ha^{-1}$ en su categoría de mayor dimensión [30-35cm]. El estadio tardío muestra el mayor número de categorías diamétricas y las de mayor dimensión, con la presencia de las especies *Lysiloma divaricatum* y *Quercus oleoides* en 45-50cm y en 55-60cm de diámetro (Figura 9).

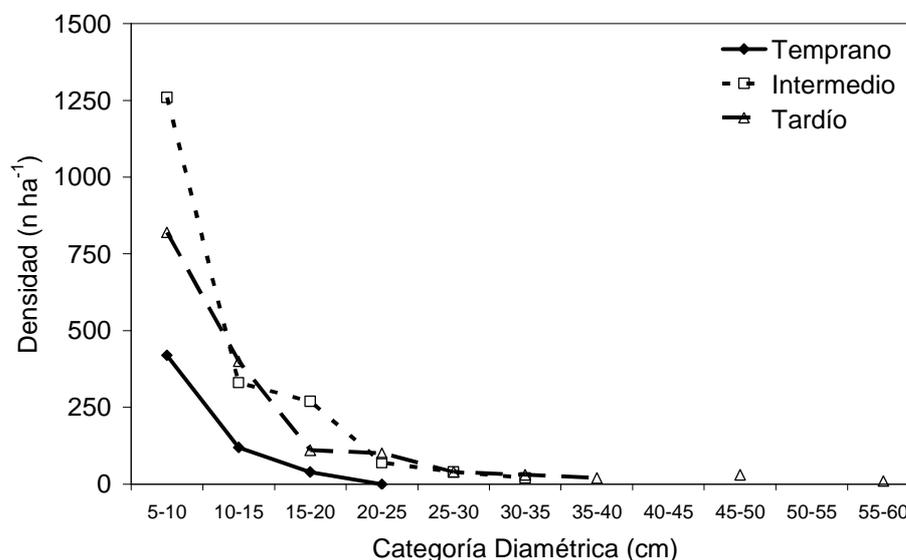


Figura 9. Distribución de la densidad ($n\ ha^{-1}$) por categoría diamétrica para tres estadios de Bosque Seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica.

Algunas diferencias estructurales de los tres bosques seleccionados son resumidas en el cuadro 4. El índice de diversidad de especies de Shannon [H'] muestra al bosque tardío como el más diverso, seguido por el temprano. El bosque intermedio se considera en base a este índice como menos diverso debido a que el número de especies en función de la densidad de individuos es menor que los otros dos estadios (Cuadro 6).

El Índice de Complejidad de Holdridge [ICH] al integrar variables dasométricas y florísticas, muestra al estadio temprano como una estructura de bosque poco desarrollada; el estadio intermedio incrementa su complejidad en más de 70 unidades, mientras que el estadio tardío es un ecosistema muy complejo que supera a ambos estadios en más de 300 unidades. El Índice de Área Vegetal [IAV] es una variable que aporta un valor de la cobertura vegetal que hay sobre el piso forestal. Este índice tiene un comportamiento similar al del ICH, incrementando el valor conforme se pasa de un estadio menos complejo (Temprano) a otros de mayor estructura tales como el intermedio y tardío; mientras que el porcentaje de cobertura de copas [CC] aumenta significativamente con respecto al estadio sucesional, solo el estadio temprano difiere estadísticamente ($p=0,0000$) del estadio intermedio y tardío (Cuadro 6).

Para los estadios muestreados, la cantidad de biomasa de mantillo presente en cada una de las parcelas difiere estadísticamente solo para el estadio temprano ($p = 0,0000$), el cual presenta una biomasa de $180,17\text{gm}^{-2}$, mientras que los otros dos estadios presentan una diferencia menor a 100gm^{-2} (Cuadro 6).

4.2 Intercepción de Precipitación

La colecta de datos se realizó entre el 21 de Agosto del 2009 hasta el 1 de Noviembre del 2009, para un total de 59 días de muestreo dentro de la estación lluviosa del Parque Nacional Santa Rosa. El total de precipitación a cielo abierto registrada varió entre parcelas; la parcela temprana registró 327,22mm; el estadio intermedio 272,06mm y el tardío 471,29mm; conformando un 20,2%, 16,8% y 29,1% respectivamente de la precipitación

media anual reportada por la Estación Meteorológica del Parque Nacional Santa Rosa [1619,54mm]⁹ (Fuente: base de datos digital del Parque Nacional Santa Rosa).

Cuadro 6. Índice de Shannon [H'], Índice de Complejidad de Holdridge [ICH], Índice de Área Vegetal [IAV], Cobertura de Copas (CC) y Biomasa de Mantillo [B.M.] para tres estadios sucesionales de Bosque seco tropical en el Parque Nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica.

Estadio	H'	ICH	IAV (m ² m ⁻²)	CC (%)	B.M. (g m ⁻²)
Temprano	1,86	4,17	1,54 ^c	28.97 ^b	180,17 ^b
Intermedio	1,82	82,99	4,30 ^b	88.69 ^a	494,06 ^a
Tardío	2,81	413,88	6,31 ^a	91.99 ^a	399,09 ^a

Nota: Letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas (p=0,05)

El flujo de copas para todos los estadios sucesionales en función de la precipitación bruta presentan tendencias lineales significativas ($p < 0,0000$)¹⁰; incrementando el flujo de copas conforme se incrementa la precipitación bruta (Figura 10). El análisis estadístico refleja que la intercepción con el “Eje y” no es estadísticamente significativa para todos los estadios, razón por la cual se puede igualar esta a “0”; considerando esto se puede tomar a la pendiente de la regresión lineal como el porcentaje de “**Flujo de Copas**” para cada estadio, supuesto que ha sido confirmado por Tobón-Marin *et al* (2000) e incorporado por otros autores en ensayos realizados en Bosques Tropicales (Carvajal Vanegas, 2005; Jiménez Rodríguez, 2006; Oliveira *et al*, 2008; Moura *et al*, 2009; Oliveira Junior y Dias, 2005; Balieiro *et al.*, 2007; entre otros). Las pendientes de las regresiones lineales de los estadios sucesionales disminuyen conforme se aumenta la estructura de los bosques [temprano > intermedio > tardío].

⁹ Precipitación Media Anual registrada desde mayo de 1980 hasta mayo del 2009.

¹⁰ Ver Anexo 6.

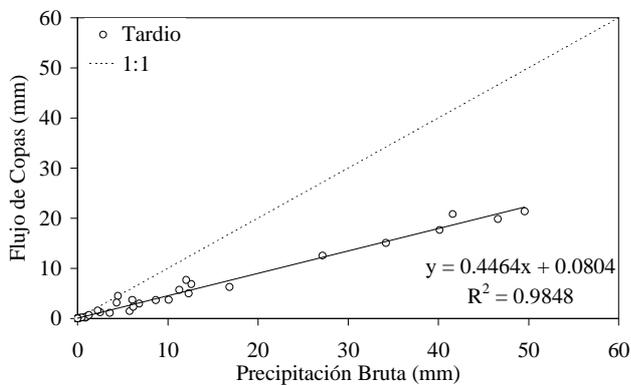
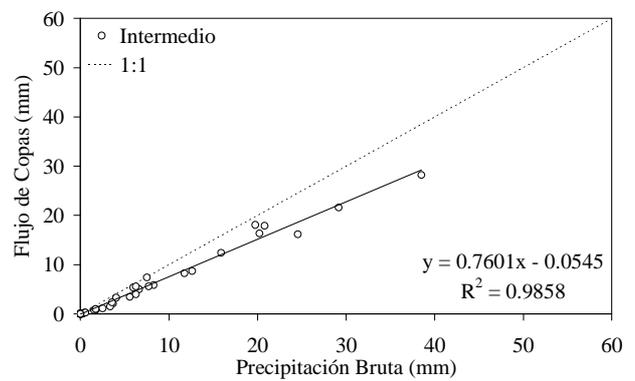
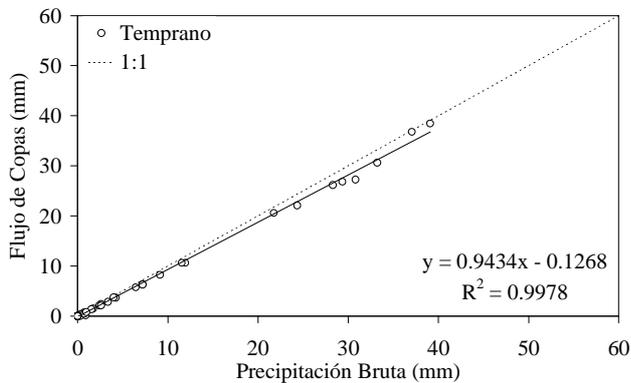


Figura 10. Distribución del flujo de copas en función de la precipitación bruta observada para tres estadios sucesionales de Bosque Seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.

El flujo de fustes muestra el mismo comportamiento de incremento conforme aumenta el tamaño de los eventos de lluvia registrados (Figura 11). Todas las regresiones son de grado tres y estadísticamente significativas ($p < 0,00001$) con respecto a la precipitación bruta como variable independiente. Todos los coeficientes de regresión $R^2_{ajustado}$ son mayores a 0,90 sin embargo, no todos los coeficientes de regresión son estadísticamente significativos¹¹.

El estadio temprano es el que presenta el mayor flujo de fustes; todos los coeficientes de regresión son estadísticamente significativos ($p < 0,05$) a excepción de la intercepción con el “Eje y”. El estadio tardío muestra el menor flujo de fustes, con solamente dos coeficientes de regresión estadísticamente significativos ($p < 0,005$). Por otra parte, el estadio intermedio muestra una amplia variación, en donde solo uno de los coeficientes de regresión es estadísticamente significativo¹².

¹¹ Complementar con Anexos 9, 10 y 11.

¹² Complementar con Anexos 9, 10 y 11.

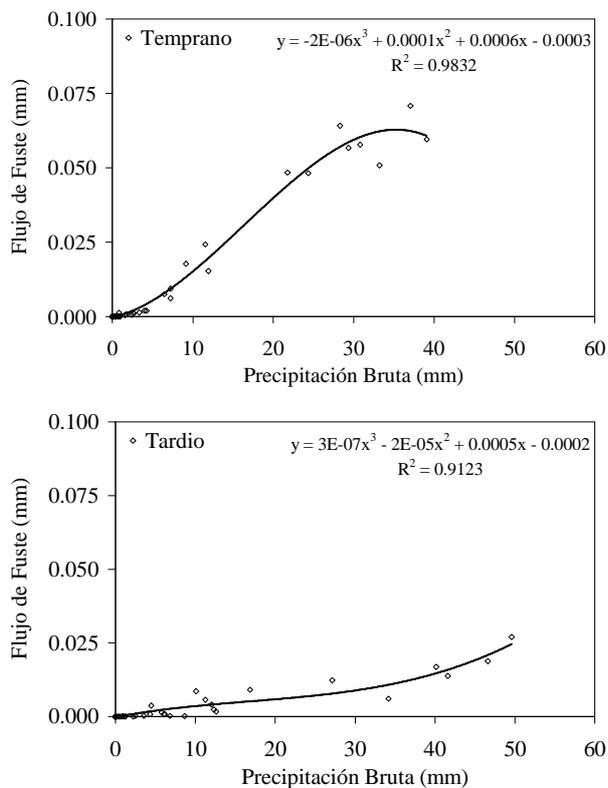


Figura 11. Distribución del flujo de fustes en función de la precipitación bruta observada para tres estadios sucesionales de Bosque Seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.

Los flujos de mantillo tienen tendencias lineales significativas ($p=0,0000$) respecto a la precipitación bruta, con los coeficientes de determinación $R^2_{ajustado}$ superiores a 0,9999. Estas tendencias son dadas por la poca retención de agua realizada por el mantillo. Las intercepciones con el “Eje y” son estadísticamente igual a cero¹³, mientras que las pendientes de las ecuaciones son significativas ($p=0,0000$).

Los porcentajes de intercepción total y de los tres segmentos que lo conforman mostraron diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$). La intercepción total se incrementa con el aumento de la estructura de los estadios sucesionales: el estadio temprano muestra la menor intercepción total (20,96%), seguido por el intermedio (40,99%) y el tardío (55,87%); tendencia que se observa para la precipitación de copas (Cuadro 6), la cual conforma más del 95% de la intercepción total para el estadio intermedio y el tardío mientras que para el estadio temprano conforma el 90% de la intercepción total.

¹³ Complementar con Anexos 12, 13 y 14.

A excepción de la intercepción de mantillo del estadio temprano, los flujos de fustes y la intercepción de mantillo son menores a un 1%. Las diferencias estadísticas del flujo de fustes muestran al estadio intermedio como el ecosistema que moviliza la mayor cantidad de agua (0,14%), seguido por el temprano (0,08%) y el tardío (0,02%), todos difieren entre sí. La intercepción del mantillo solamente difiere estadísticamente ($p < 0,05$) entre el temprano y los otros dos estadios; mostrando el estadio más joven la mayor intercepción de mantillo (2,02%).

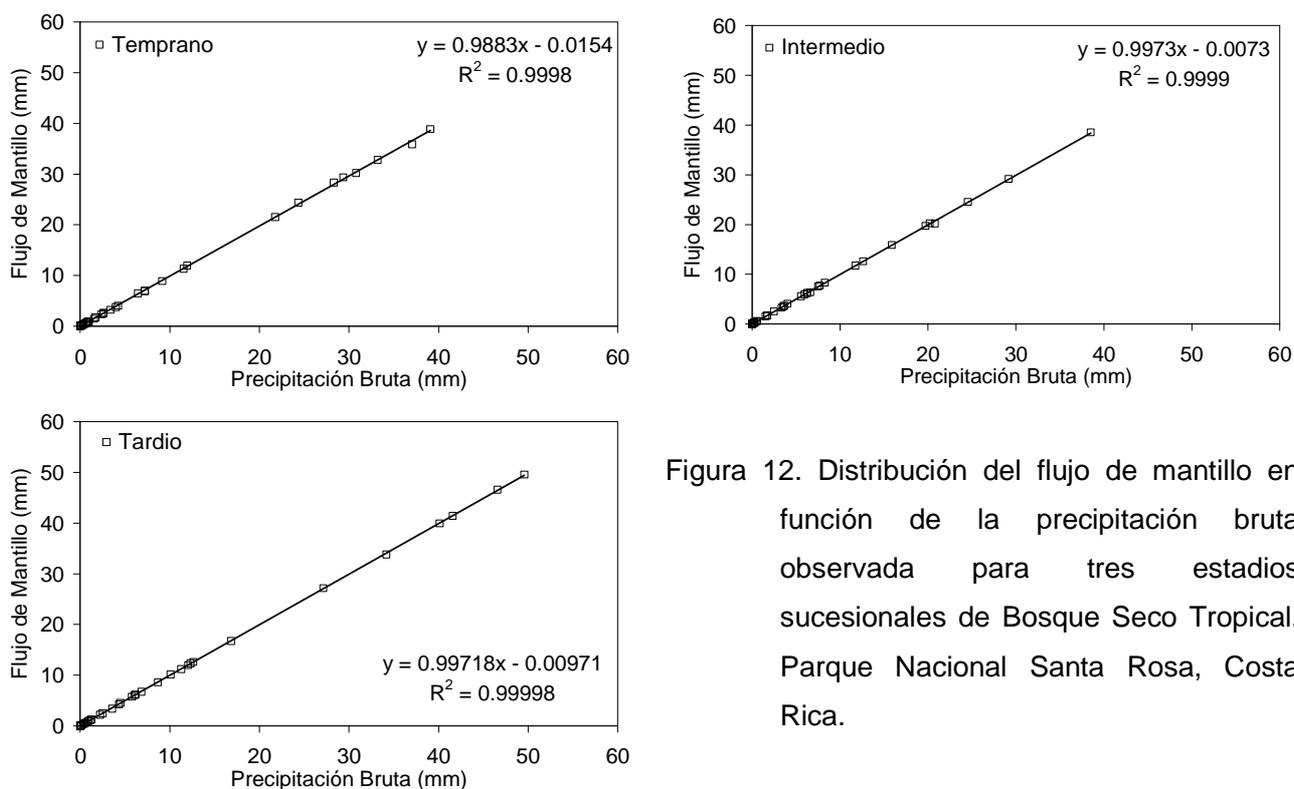


Figura 12. Distribución del flujo de mantillo en función de la precipitación bruta observada para tres estadios sucesionales de Bosque Seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.

Discusión

5.1 Intercepción de precipitación versus Estadios sucesionales

La lluvia es la principal entrada de agua en los bosques secos y húmedos tropicales (Murphy y Lugo, 1986; Bruijnzeel, 1997), la cual en su movimiento hacia el suelo es interceptada por el dosel del bosque (hojas, ramillas y ramas), evaporándose y escapándose del ecosistema (Bruijnzeel, 1997). El cuantificar estas pérdidas por intercepción es indispensable para calcular el balance hídrico de un sitio o región (Huber y Oyarzun, 1990) y para ello es indispensable considerar los principales factores que determinan la intercepción de lluvia en los bosques. El tipo y distribución de lluvias, tipo de bosque, condiciones climáticas y el estado vegetativo del ecosistema (Federov y Rogotskaya, 1971; Huber y Oyarzun, 1990; Calvo-Alvarado, 1999) son variables que ayudan en su determinación.

Las diferencias florísticas y estructurales de los tres estadios de bosque secundario analizados en este estudio (Cuadro 7), muestran un aumento en las variables ICH, IAV y CC con la siguiente tendencia:

$$\textit{Temprano} < \textit{Intermedio} < \textit{Tardío}$$

Por esta razón, se esperaría que los valores de intercepción de precipitación aumenten conforme se avance el estadio sucesional del bosque, hecho que ha sido registrado en bosques de *Pinus strobus* L. en regiones templadas, en donde conforme el bosque crece, la lluvia interceptada por las hojas y ramas aumenta (Helvey, 1967; Ford y Deans, 1978).

Los ANCOVAs realizados para las diferentes secciones en que se segmentó la intercepción de precipitación muestran diferencias significativas ($p=0,0000$). El flujo de copas y la intercepción de lluvia por parte del dosel varían conforme se pasa de un ecosistema menos complejo a uno más complejo. El flujo de copas disminuye cuando el ICH aumenta, lo que es ocasionado por el aumento en el número de especies y por las variaciones en la densidad de los bosques y la estructura horizontal y vertical de los mismos (Cuadro 7).

La estructura de las ramas del dosel conforman una red de canales que capturan y conducen el agua hacia el suelo (Ford y Deans, 1978), sin embargo dentro de una misma estructura de bosque o un mismo tipo de bosque algunos árboles son capaces de mover grandes flujos de agua por sus troncos, mientras que la mayoría moviliza muy poca agua (Lloyd y Marques, 1988).

Esta variabilidad registrada en otras latitudes podría explicar el patrón del flujo de fustes del presente estudio; para esta variable los tres estadios son estadísticamente diferentes ($p=0,0000$) según el orden: *Intermedio* > *Temprano* > *Tardío*. La alta presencia de especies con fustes de corteza lisa tales como *Rhedera trinervis*, *Gliricidia sepium*, *Genipa americana* y *Cochlospermum vitifolium* en los estadios temprano e intermedio incrementan la movilidad de agua hacia el suelo y disminuyen la posible retención de la misma en las cortezas de los árboles, patrón que ha sido registrado en otras especies de corteza lisa en Korea (Kyongha-Kim *et al*, 2005); mientras que la dominancia de especies con cortezas más ásperas tales como *Sebastiania emerus*, *Lysiloma divaricatum*, *Luehea candida* y *Manilkara sapota* en el estadio tardío crean una mayor capacidad de almacenamiento de agua en los fustes, disminuyendo considerablemente el volumen de agua transportado por los troncos.

La intercepción del mantillo tiene una tendencia que difiere tanto del flujo de copas como del flujo de fustes, la intercepción difiere estadísticamente ($p=0,05$) entre el estadio temprano y los otros dos (intermedio y tardío), los cuales no muestran diferencias significativas en las cantidades de biomasa de mantillo que son mayores a las del estadio temprano. Estas diferencias pueden estar relacionadas con las características de la biomasa como tal; la biomasa del estadio temprano esta compuesta principalmente por hojas de pastos, livianas, con un área mayor de contacto y con la presencia de pubescencia que puede incrementar los valores de intercepción a diferencia de la biomasa de los otros estadios, los cuales aportan una biomasa de mantillo caracterizada por poseer una mayor cantidad de hojas de árboles y ramillas. Por otra parte, el mantillo del estadio temprano se encuentra más expuesto al viento y a la radiación solar que los estadios intermedio y tardío, lo que aumenta la capacidad de evaporación y pérdida de humedad por el efecto desecador del viento;

mientras que el mantillo de los otros dos estadios se encuentra más protegido por la presencia de una cobertura casi constante durante el periodo de muestreo.

La intercepción total al considerarse como una combinación de la intercepción de mantillo, del flujo de copas y fustes; logra integrar la mayor cantidad de variables estructurales que influyen en los procesos de intercepción de lluvia.

La intercepción total entre los estadios difiere estadísticamente ($p < 0,01$); y aumenta conforme se mueve de un estadio menos estructurado a otro más complejo (Figura 13). La relación entre la Intercepción Total y el ICH es de incremento logarítmico; mientras que con la CC y el IAV aumenta linealmente. El bosque temprano intercepta $\approx 20\%$ de la precipitación incidente, el estadio intermedio $\approx 40\%$ y el tardío cerca de un 55% . Esta intercepción corresponde a volúmenes de agua que no alcanzan de forma efectiva el piso forestal.

Cuadro 7. Porcentajes de intercepción de lluvia segmentada en: flujo de copas, flujo de fuste, flujo de mantillo e intercepción total para tres estadios sucesionales de Bosque seco Tropical en el Parque Nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica.

Estadio	ICH	IAV ($m^2 m^{-2}$)	CC (%)	Flujos e Intercepción (%)					
				Copas		Fustes		Mantillo	Total
				Flujo	Interc. *	Flujo *	Interc. §	Interc.	Flujo *
Temprano	4,17	1,54 ^c	28.97 ^b	80,96	19,04 ^c	0,080 ^b	2,025 ^a	20,986	79,014 ^a
Intermedio	82,99	4,30 ^b	88.69 ^a	59,36	40,64 ^b	0,146 ^a	0,555 ^b	40,996	59,004 ^b
Tardío	413,88	6,31 ^a	91.99 ^a	44,77	55,23 ^a	0,022 ^c	0,740 ^b	55.874	44,126 ^c

Nota: Letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas para:

0,01 [*] y 0,05 [§].

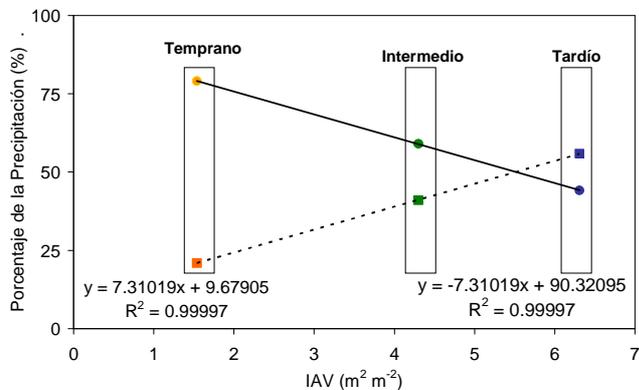
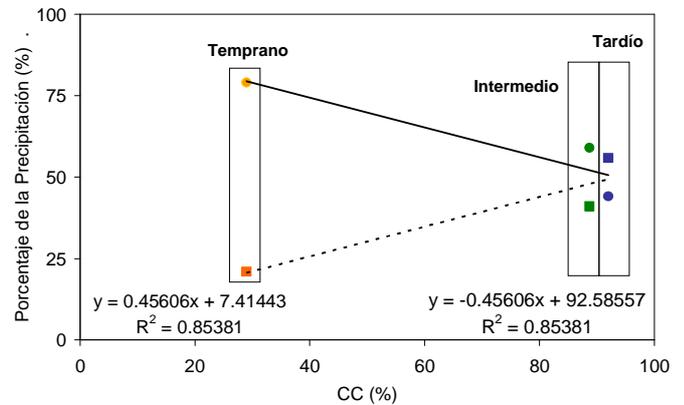
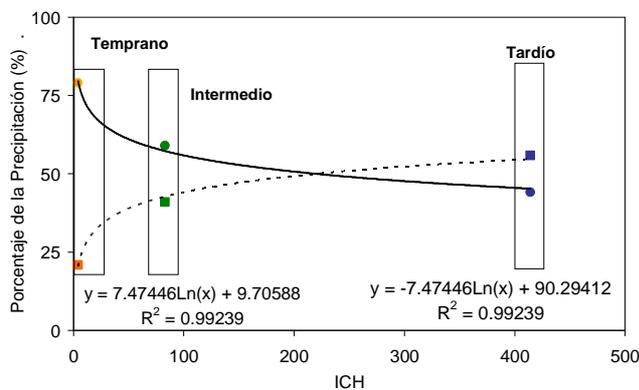


Figura 13. Correlaciones entre las variables estructurales complementarias y el flujo e intercepción total para cada uno de los estadios sucesionales de Bosque Seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.

Nota: --- ■ Intercepción Total, — ● Flujo Total, ■ ● Estadio Temprano, ■ ● Estadio Intermedio y ■ ● Estadio Tardío.

Los reportes de intercepción de lluvia para bosques secos tropicales son escasos en la literatura consultada. En un conjunto de bosques semidecuidos tropicales en Brasil se reporta una intercepción de 18,3% de la precipitación bruta (Oliveira-Junior y Dias, 2005)¹⁴, lo que difiere en gran medida de las estructuras de bosque intermedio y tardío del presente estudio, no obstante el bajo número de especies reportados por Oliveira-Júnior y Dias (9-16 especies) es similar al bosque temprano analizado en el por este ensayo (13 especies). Por otra parte, en una topo-secuencia de Bosque seco Tropical en México se reportan valores de entre 23,4% a 27,9% (Campo-Alves, 2003), estos bosques muestran una intercepción menor que los mostrados en este estudio a excepción del estadio temprano.

La mayoría de los estudios sobre intercepción de precipitación consideran solamente a la precipitación de copas para determinar el efecto del bosque sobre la capacidad de retención

¹⁴ Complementar con el Anexo 12

de agua (Huber y Oyarzun, 1990; Casey, 1996; Cavelier y Vargas, 2002; Tobón-Marin *et al.*, 2000; Campo-Alves, 2003; Skau, 1964; Ruiz-Suescún *et al.*; Ferreira *et al.*, 2005); otros integran el flujo de fustes para afinar las mediciones de Intercepción de precipitación (Carvajal-Vanegas, 2004; Helvey, 1967; Dabral y Subra Rao, 1968; Oliveira-Júnior y Dias, 2005; Oliveira *et al.*, 2008^{ab}; Balieiro *et al.*, 2007; Moura *et al.* 2009) mientras que muy pocos estudios integran de forma muy vaga el efecto de la hojarasca sobre la intercepción efectiva de lluvia que llega al suelo mineral (Helvey, 1967).

5.2 Modelos de Regresión y Estimación del Error

El papel hidrológico que juegan los tipos de cobertura son importantes en la cuantificación de las pérdidas por intercepción (Huber y Oyarzún, 1990); razón por la cual a la hora de estimar la intercepción de precipitación es indispensable observar la variación mostrada por los diferentes factores que la afectan.

La regresión lineal ha sido considerada y utilizada como la ecuación que mejor expresa la relación existente entre precipitación bruta y el flujo de copas y fustes (Huber y Oyarzún, 1990; Tobón-Marin *et al.*, 2000; Oliveira-Junior y Dias, 2005; Oliveira *et al.*, 2008^{ab}; Moura *et al.*, 2009); e integrada a variables estructurales como el índice de densidad del dosel (Skau, 1964), con la finalidad de mejorar la estimación de la precipitación de copas en función de la precipitación bruta.

La capacidad de almacenamiento de la copa es dada por la intercepción negativa con el “eje y” de la línea de tendencia en el eje de la precipitación de copas (Gash y Morton, 1978); dependiendo esta de diversos factores como la forma, dimensiones, orientación y textura de las hojas, ramas y fustes de las especies presentes en el bosque (Federov y Rogotskaya, 1971; Leonard, citado por Jackson 1975; Lloyd y Marques, 1988).

Los estadios temprano e intermedio aún cuando tienen intercepciones con el eje y no significativas, la capacidad de retención de ambos estadios es real y cuantificable (0,1268mm y 0,0545mm respectivamente), mientras que el bosque tardío es el único que aporta agua al ecosistema (0,0804mm).

Temprano	$y = 0,9434x - 0,1268$ $R^2: 0,9978$
Intermedio	$y = 0,7601x - 0,0545$ $R^2: 0,9858$
Tardío	$y = 0,4464x + 0,0804$ $R^2: 0,9848$

La aplicación de análisis estadísticos basados en “distribuciones de datos normales” para los flujos de copas puede acarrear estimaciones de error elevadas (Ford y Deans, 1978), debido a que el goteo de copas es una variable aleatoria que depende de los errores de medición, la precipitación bruta y la variabilidad espacial de la estructura del dosel (Lloyd y Marques, 1988; Huber y Oyarzún, 1990).

Existen dos estrategias para disminuir el error: a) mantener un elevado número de pluviómetros o b) mantener ubicaciones aleatorias de los mismos (Lloyd y Marques, 1988); siendo el segundo de ellos el de mayor utilización a nivel experimental para bosques tropicales (Tobón-Marin *et al.*, 2000; Carvajal-Vanegas, 2004; Moura *et al.*, 2009). Otra metodología implementada para disminuir el error experimental aportado por la distribución espacial de las copas de los árboles es aumentar el área de los pluviómetros en posiciones fijas dentro de las parcelas (Elsenbeer *et al.*, 1994; Ruiz-Suescún *et al.*, 2005).

El porcentaje de error en la estimación del flujo de copas para el presente estudio fue de 13,92%; 17,1% y 16,26% para los estadios temprano, intermedio y tardío respectivamente. El porcentaje de error disminuyó conforme aumenta la precipitación bruta; no obstante para los eventos menores a los 10mm el error aumenta considerablemente para los tres estadios sucesionales (Figura 14).

Aún cuando el coeficiente de variación [CV%] de la CC para el estadio temprano fue mayor a un 100%, el error en la estimación fue menor al 15%; mientras que el CV% para la CC de los estadios intermedio y tardío fue de 7,3% y 5,1% respectivamente, los errores en la estimación fueron superiores al 15%. Con lo anterior se demuestra que la distribución horizontal de las copas tiene una baja influencia en la estimación de la interceptación del dosel.

Para mantener un error promedio de un 15% en la estimación del flujo de copas se requieren de 48, 58 y 57 pluviómetros debajo del estadio temprano, intermedio y tardío respectivamente. En bosques caducifolios de *Quercus rubra* en México se requieren de 9 y 34 pluviómetros para mantener errores de ± 10 y $\pm 5\%$ en eventos mayores a 5mm (Carlyle-Moses *et al.*, 2004); en Bosques muy Húmedos Tropicales en Costa Rica los requerimientos para mantener un error de un 15% son de 52 y 30 pluviómetros para eventos mayores a 0mm y 5mm respectivamente. La información sobre Bosques secos o caducifolios es escasa.

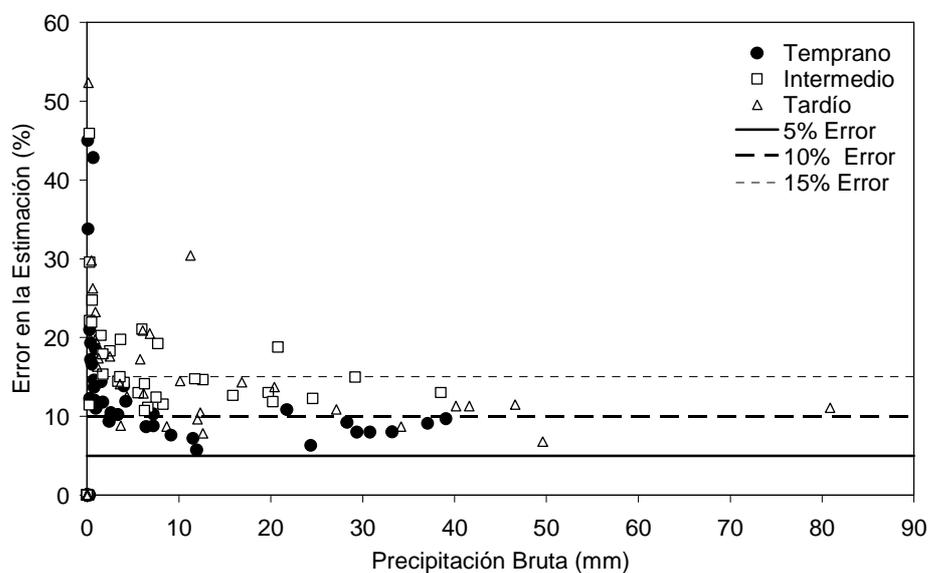


Figura 14. Porcentajes de error en la estimación de la precipitación de copas de tres estadios sucesionales de Bosque seco Tropical en el Parque Nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica.

5.3 Consideraciones Finales

Huber y Oyarzun (1990) se refieren a la importancia de los estudios de interceptación como un prerrequisito esencial para realizar las predicciones cuantitativas de los efectos de la reforestación o deforestación sobre la economía hídrica de un lugar; el cual puede variar la interceptación y la transpiración con los incrementos de masa foliar (Bruijnzeel, 1997); mientras que las actividades de manejo alteran la estructura de algunos bosques tropicales, influyendo sobre los flujos de agua del dosel (Dietz *et al.*, 2006).

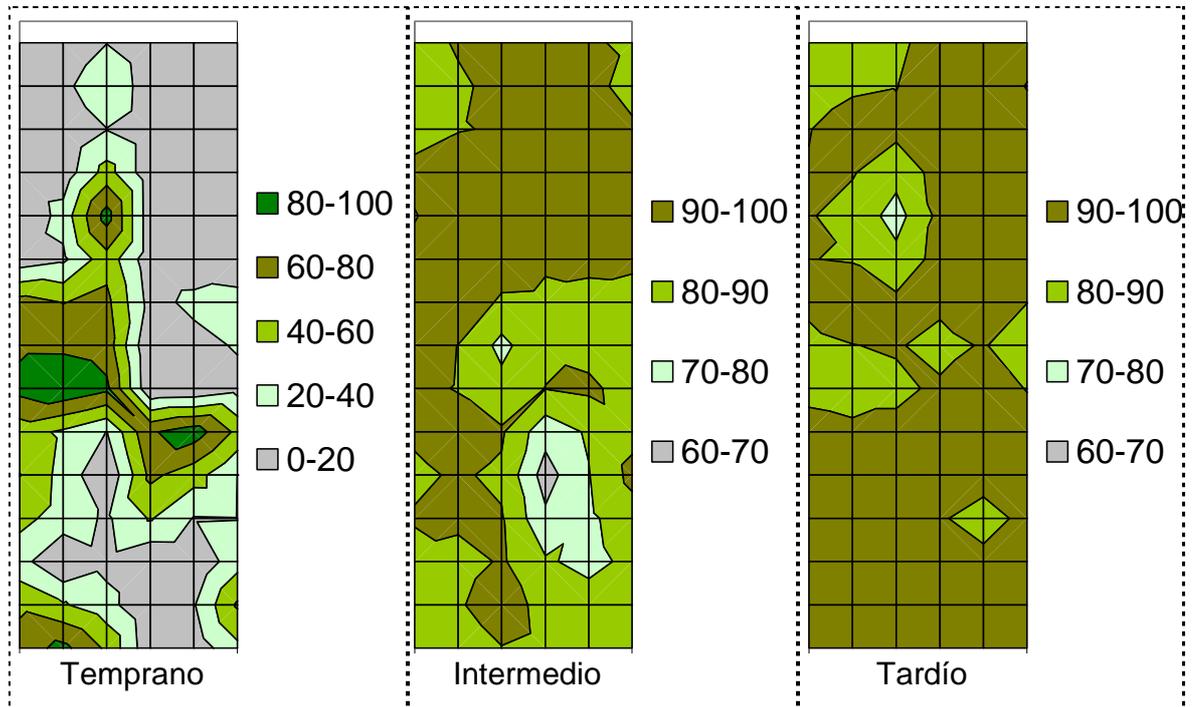
En una cuenca con altos porcentajes de bosques secundarios en crecimiento, las pérdidas por interceptación aumentarán conforme se incrementa la estructura o edad de los bosques secundarios (Helvey, 1967; Ford y Deans, 1978), pero estas pérdidas no son valores fijos para cada bloque, ya que varían estacionalmente por el aumento y disminución del área foliar; y anualmente por la dinámica poblacional de los bosques (Kyongha-Kim *et al*, 2005).

En los Bosques secos Tropicales de Costa Rica, los flujos de fuste son menores a un 1% de la precipitación incidente, incrementando el aporte del agua que es interceptada por el dosel de las diferentes estructuras de bosque secundario.

El mantillo es importante para el control de la escorrentía superficial en ecosistemas homogéneos como los Bosques Montanos y las plantaciones de Pino y Ciprés (Ruiz-Suescún *et al.*, 2005), sin embargo en los bosques secos tropicales logran reducir el efecto del goteo sobre el piso forestal, pero su injerencia sobre la interceptación es muy baja.

Para el monitoreo y evaluación de la interceptación total de lluvia, la precipitación bruta es una variable de mala calidad para estimar la precipitación de copas para eventos pequeños por los altos errores es la estimación de esta variable (Elsenbeer *et al.*, 1994; Carvajal-Vanegas, 2004; Jiménez-Rodríguez, 2005); no obstante, la correspondencia lineal mostrada para bosques semidecíduos (*Oliveira-Júnior et al.*, 2005) facilita la determinación y aproximación de la interceptación total de lluvia con un adecuado número de pluviómetros debajo del dosel.

En algunas estructuras de bosque, es indispensable establecer algunas variables que pueden influir sobre la redistribución de la lluvia, como es el caso de las palmas en los bosques húmedos tropicales, que debido a su morfología y alta densidad se convierten en conductos de grandes volúmenes de agua desde el dosel hasta el suelo (Germer *et al.*, 2006); o bien el tipo de corteza de árbol en ambientes caducifolios que aumentan el flujo fustal de agua cuando son cortezas lisas y no ásperas (Kyongha-Kim *et al*, 2005).



Nota: Cuadrículas de 11,11m² de área.

Figura 15. Distribución espacial de la cobertura de copas (%) en tres estadios sucesionales de Bosque seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica.

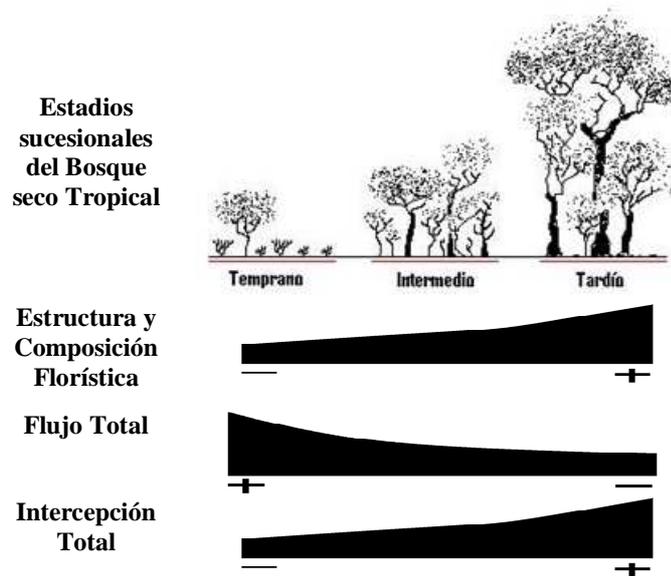


Figura 16. Representación esquemática de las principales correlaciones existentes entre la estructura y la intercepción de lluvia para Bosques secos Tropicales en Costa Rica.

Conclusiones

- La estructura de los bosques secundarios aumenta conforme se avanza en los estadios sucesionales.
- El porcentaje del flujo de fustes para el estadio temprano, intermedio y tardío fue de 0,08%; 0,146% y 0,022% respectivamente.
- El flujo de copas fue de 80,96%; 59,36% y 44,77% para los estadios temprano, intermedio y tardío respectivamente.
- La intercepción de mantillo es de 2,02%; 0,55% y 0,74% para los estadios temprano, intermedio y tardío respectivamente.
- La intercepción total de los estadios es de 20,98%; 40,99% y 55, 87% para el temprano, intermedio y tardío respectivamente.
- La intercepción total de lluvia aumenta conforme se incrementa la estructura y composición florística de los estadios sucesionales por medio del siguiente orden: Temprano < Intermedio < Tardío.
- Las diferencias en la retención de agua de lluvia en cada estadio amerita tratar de forma independiente en los análisis hidrológicos a cada tipo de bosque secundario.
- El flujo de copas y el flujo de mantillo responden a funciones lineales mientras que los flujos de fuste responden a ecuaciones polinomiales.
- El índice de área vegetal (IAV) se correlaciona linealmente con la intercepción total de los estados sucesionales con un coeficiente de determinación muy alto ($R^2 > 0,9999$).
- La intercepción total aumenta conforme se incrementa el IAV disminuyendo proporcionalmente el respectivo flujo de agua por estadio de sucesión.

Recomendaciones

- Aumentar el número de pluviómetros debajo del bosque a 50 para reducir el error en la estimación de la intercepción de precipitación o en su defecto aumentar el tamaño del embudo colector.
- Establecer un ensayo de intercepción por un año completo con la finalidad de monitorear la relación estacional de los Bosques secos Tropicales y la intercepción total de lluvia, con mediciones semanales; y poder brindar información más clara para la toma de decisiones en el manejo de ecosistemas forestales.
- Estimar de forma experimental los valores de capacidad de retención específica de agua para los diferentes tipos de hojas y texturas de corteza, mejorando el modelamiento hidrológico de los Bosques secos Tropicales.
- Establecer una red de pluviómetros dentro del Parque Nacional Santa Rosa para monitorear la precipitación real incidente sobre el área.
- Para modelar la intercepción total de los Bosques secos Tropicales, se debe de integrar al modelamiento hidrológico la estratificación por estructura del bosque.

Bibliografía

- Arroyo, P.; Sanchez-Azofeifa, A.; Rivard, B.; Calvo-Alvarado, J.; Janzen, D. 2005. Dynamics in landscape structure and composition for the Chorotega region, Costa Rica from 1960 to 2000. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 106: 27–39
- Balieiro, F.C.; Franco, A.A.; Ferreira-Fontes, R.L.; Dias, L.E.; Carneiro-Campello, E.F.; Faria, S.M. 2007. Evaluation of the throughfall and stemflow nutrient contents in mixed and pure plantations of *Acacia mangium*, *Pseudosamanea guachapele* and *Eucalyptus grandis*. *R. Árvore, Viçosa-MG*. 31(2): 339-346.
- Barone, J.A.; Coley, P.D. 2002. Herbivorismo y las defensas de las plantas. En: Guariguata, M.R.; Kattan G.H. (Eds). *Ecología y Conservación de bosques neotropicales*. Libro Universitario Regional (LUR). Cartago, Costa Rica. 465-492.
- Bolaños, R.A.; Watson, V. 1993. Mapa Ecológico de Costa Rica. Según el sistema de clasificación de zonas de vida del mundo de L.R. Holdridge. (San José, CR). Instituto Geográfico Nacional. Centro Científico Tropical. Escala 1:200.000. Colores.
- _____; Watson, V.; Tosi, J. 2005. Mapa Ecológico de Costa Rica (Zonas de Vida). Centro Científico Tropical. San José, Costa Rica.
- Brown, S.; Lugo, A.E. 1990. Tropical secondary forests. *Journal of tropical Ecology*. 6: 1-32.
- Bruijnzeel, S. 1997. Hydrology of forest plantations in the tropics. En: Management of soil, nutrients and Water in tropical plantations forests. Nambiar, S; Brown, A. Editores. 125-167.
- Calder, I.R. 1993. Hydrologic effects of land-use change. En: Maidment, D.R. (Ed.) *Handbook of hydrology*. (US). McGraw-Hill. 13.1-13.50.

- Calvo Alvarado, J. 1999. Principios de Hidrología Forestal. Serie de apoyo académico N° 23. Escuela de Ingeniería Forestal. 136 p.
- Calvo Alvarado, J.; McLennan, B.J.; Garvin, T.; Sanchez-Azofeifa, A.G. 2008. Putting conservation policies in context: The social dynamics of forest regrowth in Guanacaste, Costa Rica. *Forest Ecology and Management*. (Aceptado).
- Calvo de Anta, R.; Gómez-Rey, M.X. 2002. Distribución espacial del ciclo del agua en suelos forestales con *Pinus radiata* de Galicia. *Edafología*. 9(1): 49-60.
- Campo Alves, J. 2003. Disponibilidad de nutrientes en una toposecuencia con Bosque Tropical Seco en México. *Agrociencia*. 37: 211-219.
- Carlyle Moses, D.E.; Flores-Laureano, J.S.; Price, A.G. 2004. Throughfall and throughfall spatial variability in Madrean oak forest communities of northeastern Mexico. *Journal of Hydrology*. 297(1-4): 124-135.
- Carvajal Vanegas, D. 2004. Intercepción de Precipitación en dos especies forestales nativas: *Vochysia guatemalensis* y *Vochysia ferruginea* (Vochysiaceae). Informe de practica de especialidad. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica. 45 p.
- Casey, M. 1996. Throughfall in a forestry plantation at the La Selva Biological Station, Costa Rica. M.Sc. Thesis. University of Tennessee. Knoxville, EEUU.
- Cavelier, J; Vargas, G. 2002. Procesos hidrológicos. En: Guariguata, M.R.; Kattan G.H. (Eds). *Ecología y Conservación de bosques neotropicales*. Libro Universitario Regional (LUR). Cartago, Costa Rica. 145-165
- Clark, D.A.; Clark, D.A. 1987. Análisis de la regeneración de árboles del dosel en bosque muy húmedo tropical: aspectos teóricos y prácticos. *Revista de Biología Tropical*. 35 (1): 41-54.

- Costa Rica. 1995. Estadísticas de desarrollo económico. En: Banco Central de Costa Rica. San José, CR.
- Dabral, B.G; Subra Rao, B.K. 1968. Interception studies in chir and teak plantations-new forest. *Indian Forester*. 541-551.
- Davis, S.N.; DeWiest, R.J.M. 1966. *Hydrogeology*. 463 p.
- DE-1562-A. 1972. Decreto Ejecutivo 1562-A. *La Gaceta* (70). 27 Marzo 1971.
- DE-20516. 1991. Decreto Ejecutivo 20516. *La Gaceta* (129). 09 Julio 1991.
- Dietz, J.; Hölscher, D.; Leuschner, C.; Hendrayanto. 2006. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. *Forest Ecology and Management*. 237(1-3): 170-178.
- Elsenbeer, H.; Cassel, D.K.; Zuniga, L. 1994. Throughfall in the terra firme forest of western amazonia. *Journal of Hydrology*. 32(2): 30-44.
- Ewel, J. 1980. Tropical succession. Mainfold routes to maturity. *Biotropica*. 12: 2-7
- Fallas, J. 1996. Cuantificación de la intercepción en un bosque nubosos Monte de los Olivos, Cuenca del Río Chiquito, Guanacaste, Costa Rica. San José, Costa Rica. Centro Científico Tropical; Centro Internacional en Política Económica para el Desarrollo Sostenible; International Institute for Environment and Development. 37 p.
- Federov, S.F.; Rogotskaya, R.Ye. 1971. Rainfall interception by the canopy of a coniferous Forest. *Soviet Hydrology: Selected papers*. (6): 505-512.
- Ferreira, S.J.F.; Luizão, F.J.; Dallarosa, R.L.G. 2005. Precipitação interna e interceptação da chuva em floresta de terra firme submetida à extração selectiva de madeira na Amazônia Central. *R. Árvore, Viçosa-MG*. 35(1): 55-62.

- Filoso, S; et al. 1999. Composition and deposition of throughfall in a flooded forest archipelago. *Biogeochemistry*. 45: 169 – 195.
- Ford, E.D.; Deans, J.D. 1978. The effects of canopy structure on stemflow throughfall and interception loss in a young sitka spruce plantation. *Journal of Applied Ecology*. 15: 905-917.
- Gash, J.H.C; Morton, A.J. 1978. An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford Forest. *Journal of Hydrology*, 38: 49-58.
- Germer, S.; Elsenbeer, H.; Moraes, J.M. 2006. Throughfall and temporal trends of rainfall redistribution in an open tropical rainforest, south-western Amazonia (Rondônia, Brazil). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10: 383-393.
- Gómez Pignataro, L.D.; Herrera, W. 1986. *Vegetación y clima de Costa Rica*. Gómez Pignataro, L.D. (ed.) EUNED. San José, C.R. 327 p.
- González Jiménez, E, 2002, *Composición y dinámica de diferentes estados sucesionales en el bosque seco tropical del Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica*. En: Chavarri, A., Quesada, R., Chaves, E., Fonseca, W., Sanabria, E. *Ecosistemas forestales de bosque seco tropical: investigaciones y resultados en Mesoamérica*, Universidad Nacional, INISEFOR, Heredia, CR. 146-153
- Heinrich, A.; Hurka, H. 2004. Species richness and composition during sylvigenesis in a tropical dry forest in Northwestern Costa Rica. *Tropical Ecology*. 45(1): 43-57
- Helvey, J.D. 1967. Interception by eastern white pine. *Water Resources Research*. 3(3): 723-729
- Hernández Salas, Z, Quesada Monge, R., González Jiménez, E, 2002, *Cronosecuencia del bosque seco secundario tropical en el Parque Nacional Palo Verde, Bagaces, Costa Rica*. En: Chavarri, A., Quesada, R., Chaves, E., Fonseca, W., Sanabria, E. *Ecosistemas*

forestales de bosque seco tropical: investigaciones y resultados en Mesoamérica, Universidad Nacional, INISEFOR, Heredia, CR. 136-146

Hewlett J.D. 1982. Principles of Forest Hydrology. The University of Georgia Press. Georgia. US. 183 p.

Holdridge, L.R. 1967. Life zone ecology. Tropical Science Center, San José, Costa Rica, 149 p.

Holdridge, L., Grenke, W.C., Hatheway, W.H., Liang, T., and Tosi Jr., J. 1971. Forest Environments in Tropical Life Zones: A Pilot Study. Pergamon Press, New York 747 pp.

Hubert, A.W., Oyarzun, C.E. 1990. Variaciones anuales en precipitación, escurrimiento e intercepción en un bosque adulto de *Pinus radiata*. Turrialba. 40(4): 503-508.

Jackson, I.J. 1975. Relationships between rainfall parameters and interception by tropical forest. *Journal of Hydrology*, 24: 215-238.

Janzen, D.H., 1988, Tropical dry forests: The most endangered major tropical ecosystem, In: Wilson, E.O. (Ed.), *Biodiversity*, National Academy Press, Washington D.C., pp, 130-137,

Jiménez Rodríguez, C.D. 2005. Lavado de nutrientes en plantaciones de *Vochysia ferruginea* Mart. Y *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm. y su comparación con un bosque secundario en el neotrópico. Informe de practica de especialidad. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, CR. 51 p.

Kalacska, M.; Sánchez-Azofeifa, A.; Calvo-Alvarado J.; Quesada M.; Janzen, D. 2004. Species composition, similarity and diversity in three successional stages of tropical dry forest. *Forest Ecology and Management* (200): 227–247.

Kleinn, C.; Corrales, L.; Morales, D. 2002. Forest area in Costa Rica: a comparative study of tropical forest cover estimates over time. *Environmental Monitoring and Assessment*. 73: 17-40.

- Kyongha-Kim; Jaehong-Jun; Jaeyun-Yoo; Yongho-Jeong. 2005. Throughfall, Stemflow and Interception Loss of the Natural Old-growth Deciduous and Planted Young Coniferous in Gwangneung and the Rehabilitated Young Mixed Forest in Yangju, Gyeonggido (I) - with a Special Reference on the Results of Measurement -. Journal of Korean Forestry Society. 94(6).
- Krebs, C.J. 1998, Ecological Methodology, Second Edition, University of British Columbia, 620 p.
- Lamprech, H. 1990. Silvicultura en los trópicos. Ed, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Eschborn, Alemania, 355 p.
- Loyd, C.R.; Marques, A.O. 1988. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rain forest. Agricultural and Forest Meteorology. 42: 63-73.
- Magurran, A. E. 2004. Measuring Biological Diversity. Blackwell, Oxford.
- Maidment, D.R. 1993. Hydrology. En: Maidment, D.R. (Ed.) Handbook of hydrology. (US). McGraw-Hill. 1.1-1.14.
- Meza Ocampo, T.A. 2001. Geografía de Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, CR. 124 p.
- Meza, V.; Mora, F.; Fonseca, W.; Chaves, E. 2002. Estadísticas poblacionales de tres parcelas permanentes en el Bosque seco Tropical, Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica. Ecosistemas forestales de bosque seco tropical: investigaciones y resultados en Mesoamérica, Universidad Nacional, INISEFOR, Heredia, CR. 185-197.
- Moura, A.E.S.S.; Correa, M.M.; Silva, E.R.; Ferreira, R.L.C.; Figueiredo, A.C.; Possas, J.M.C. 2009. Interceptação das chuvas em um fragmento de floresta da mata Atlântica na Bacia do Prata, Recife, PE. R. Árvore, Viçosa-MG. 33(3): 461-469.

- Murphy, P.G.; Lugo, A.E. 1986. Ecology of tropical dry forest. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 17: 67-88.
- Oliveira-Júnior, J.C.; Dias, H.C.T. 2005. Precipitação efectiva em fragmento secundário da mata Atlântica. *R. Árvore, Viçosa-MG.* 29(1): 9-15.
- Oliveira, L.L.; Da Costa, R.F.; Da Costa, A.C.L.; Soussa, F.A.S.; Braga, A.P. 2008^a. Modelagem da interceptação na floresta nacional de Caxiuaña, no leste da Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia.* 23(3): 318-326.
- _____ ; Ferreira da Costa, R.; Sousa, F.A.S.; Costa, A.C.L.; Braga, A.P. 2008^b. Precipitação efectiva e interceptação em Caxiuanã, na Amazônia Oriental. *Acta Amazônica.* 38 (4): 723-732.
- Ortiz, E. 2008. Atlas Costa Rica 2008. Laboratorio de sistemas de información geográfica. Cartago, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal.
- Ortiz, E.; Carrera, F. 2002. Estadística básica para inventarios forestales. En: *Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central.* Orozco, L; Brumér, C. Editores. 71-99.
- Quesada, M.; Stoner, K.E. 2004. Threats to the conservation of tropical dry forest in Costa Rica, En: Frankie, G.W.; Mata, A.; Vinson, S.B. (Eds.). *Biodiversity conservation in Costa Rica learning the lessons in a seasonal dry forest,* University of California Press, Berkeley. 266-280.
- Read, L.; Lawrence, D. 2003. Recovery Biomass Following Shifting Cultivation in dry Tropical Forests of the Yucatan. *Ecological Applications.* 13(1): 85-97.
- Rothacher, J. 1963. Net precipitation under a Douglas-Fir forest. *Forest Science.* 9(4):423-429.

- Ruiz-Suescún, O.A.; Acosta-Jaramillo, J.J.; León-Perez, J.D. 2005. Escorrentía superficial en bosques montanos naturales y plantados de Piedras Blancas, Antioquía (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 58(1).
- Sader, S.A.; Joyce, A.T. 1988. Deforestation rates and trends in Costa Rica 1940 to 1983. *Biotropica*. 20: 11-14.
- Sanchez Azofeifa, G.A. 2000. Land Use and Cover Change in Costa Rica. En: *Quantifying Sustainable Development*. 473-501 p.
- _____; Gretchen, C.D.; Alexander S.P.; Christopher, B. 2003. Integrity and isolation of Costa Rica's nacional Parks and biological reserves: examing the dynamics of land-cover change. *Biological Conservation*. 109: 123-135.
- Shen, H.W.; Julien, P.Y. 1993. Erosion and sediment transport. En: Maidment, D.R. (Ed.) *Handbook of hydrology*. (US). McGraw-Hill. 12.1-12.61.
- Skau, C.M. 1964. Interception, throughfall, and stemflow in Utah and Alligator Juniper Cover Types of Northern Arizona. *Forest Science*. 10(3): 283-287.
- Smith, J.A. 1993. Precipitation. En: Maidment, D.R. (Ed.) *Handbook of hydrology*. (US). McGraw-Hill. 3.1-3.47.
- Spittler, P. 2002. Dinámica de los bosques secundarios secos en la Región Chorotega, Costa Rica. En: Chavarri, A., Quesada, R., Chaves, E., Fonseca, W., Sanabria, E. *Ecosistemas forestales de bosque seco tropical: investigaciones y resultados en Mesoamérica*, Universidad Nacional, INISEFOR, Heredia, CR. 163-174
- Staelens, J.; Schrijver, A.D.; Oyarzún, C.; Lust, N. 2003. Comparison of dry deposition and canopy exchange of base cations in temperate hardwood forests in Flanders and Chile. *Gayana Botánica*. 60 (1): 9-16.

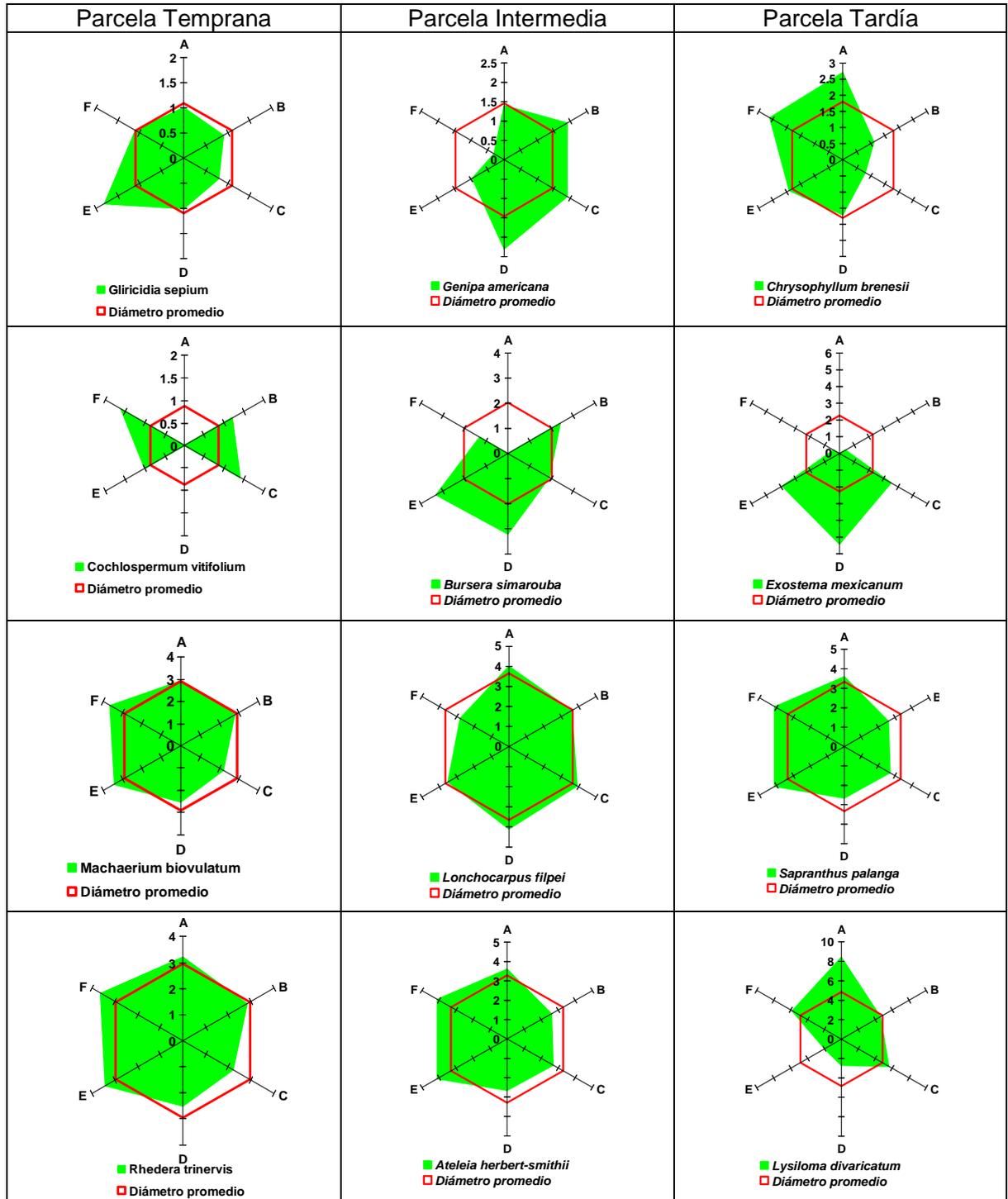
StatSoft, Inc. (2003). STATISTICA (data analysis software system), version 6.
www.statsoft.com.

Synnott, T.J. 1979. Documentos forestales tropicales N° 14. Manual de procedimientos de parcelas permanentes para bosque húmedo tropical. Unidad de Silvicultura Tropical. Instituto Forestal de la Mancomunidad Británica. Universidad de Oxford. Traducido por: Valerio, J. 1991. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 103p.

Tobón Marín, C.; Bouten, W.; and Sevink, J. 2000. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology*. 237: 40-57.

Zotz, G.; Andrade, J.L. 2002. La ecología y la fisiología de las epífitas y las hemiepífitas. En: Guariguata, M.R.; Kattan G.H. (Eds). *Ecología y Conservación de bosques neotropicales*. Libro Universitario Regional (LUR). Cartago, Costa Rica.

Anexos



Anexo 1: Representación esquemática del área de copas real y promedio de los árboles seleccionados para medir la escorrentía de fustes.

Anexo 2. Índice de valor de importancia para las especies del estadio de sucesión temprano en el Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.

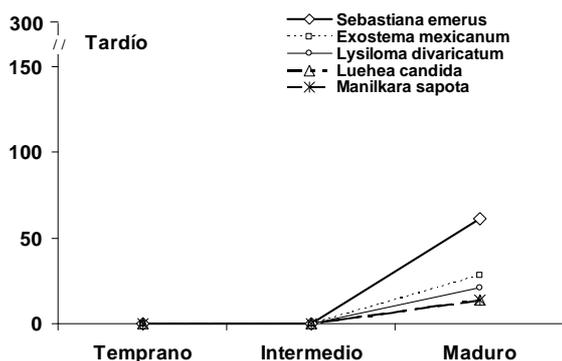
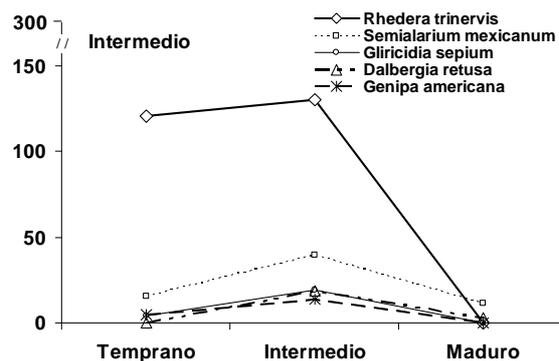
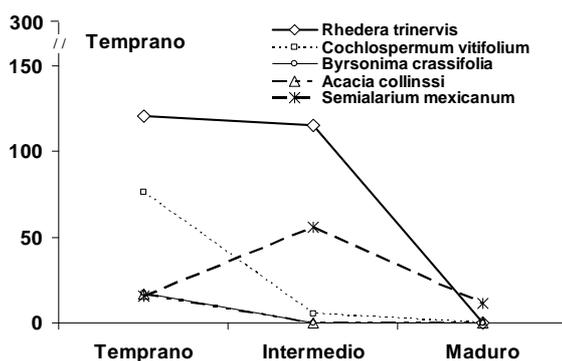
Especie	Área basal (%)	Densidad (%)	Frecuencia (%)	IVI
<i>Rhedera trinervis</i>	53,04	40,28	27,03	120,35
<i>Cochlospermum vitifolium</i>	23,99	27,78	24,32	76,09
<i>Byrsonima crassifolia</i>	6,38	5,56	5,41	17,34
<i>Acacia collinssi</i>	0,67	5,56	10,81	17,04
<i>Semialarium mexicanum</i>	1,65	5,56	8,11	15,32
<i>Crescentia sujete</i>	4,65	4,17	5,41	14,23
<i>Swietenia microphylla</i>	3,35	1,39	2,70	7,44
<i>Cordia guanacastensis</i>	1,65	2,78	2,70	7,13
<i>Machaerium biovulatum</i>	2,09	1,39	2,70	6,18
<i>Pisonia aculeata</i>	1,13	1,39	2,70	5,23
Subtotal 10 especies	98,61	95,83	91,89	286,34
Otras especies [3]	1,39	4,17	8,11	13,66
Total	100	100	100	300

Anexo 3. Índice de valor de importancia para las especies del estadio de sucesión intermedio en el Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.

Especie	Área basal (%)	Densidad (%)	Frecuencia (%)	IVI
<i>Rhedera trinervis</i>	60,81	52,26	17,24	130,31
<i>Semialarium mexicanum</i>	5,82	18,09	15,52	39,43
<i>Gliricidia sepium</i>	5,78	4,52	8,62	18,92
<i>Dalbergia retusa</i>	8,89	3,02	6,90	18,80
<i>Genipa americana</i>	1,16	4,02	8,62	13,80
<i>Lonchocarpus minimiflorus</i>	5,89	2,01	3,45	11,34
<i>Machaerium biovulatum</i>	2,80	3,02	5,17	10,98
<i>Bursera simarouba</i>	1,78	2,51	5,17	9,46
<i>Dyospirus salicifolia</i>	0,68	2,01	5,17	7,86
<i>Tabebuia ochracea</i>	0,95	1,51	5,17	7,63
Subtotal 10 especies	94,53	92,96	81,03	268,53
Otras especies [7]	5,47	7,04	18,97	31,47
Total	100	100	100	300

Anexo 4. Índice de valor de importancia para las especies del estadio de sucesión tardío en el Parque Nacional Santa Rosa, Costa Rica.

Especie	Área basal (%)	Densidad (%)	Frecuencia (%)	IVI
<i>Sebastiania emerus</i>	14.51	36.02	10.87	61.40
<i>Exostema mexicanum</i>	7.55	12.90	7.61	28.07
<i>Lysiloma divaricatum</i>	15.57	2.15	3.26	20.98
<i>Luehea candida</i>	7.55	2.15	4.35	14.05
<i>Manilkara sapota</i>	7.16	2.15	4.35	13.65
<i>Ardisia pitieri</i>	9.98	1.08	2.17	13.23
<i>Semialarium mexicanum</i>	3.54	3.76	4.35	11.65
<i>Eugenia oerstediana</i>	1.24	5.38	4.35	10.97
<i>Casearia sylvestris</i>	0.72	5.38	4.35	10.44
<i>Astronium graveolens</i>	0.99	2.69	4.35	8.03
Subtotal 10 especies	68.81	73.66	50.00	192.46
Otras especies [35]	31.19	26.34	50.00	107.54
Total	100	100	100	300



Anexo 5. Distribución en los estados sucesionales de las cinco especies con mayor valor de IVI para tres estadios de Bosque Seco Tropical. Parque Nacional Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica.

Anexo 6: Análisis de varianza para las regresiones lineales del flujo de copas en función de la precipitación bruta observada en tres estadios sucesionales.

Estadio	Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Temprano	Regresión	1	5739.95	5739.95	25284.40	0.0000
	Residuos	57	12.94	0.23		
	Total	58	5752.89			
Intermedio	Regresión	1	2256.36	2256.36	3969.74	0.0000
	Residuos	57	32.40	0.57		
	Total	58	2288.75			
Tardío	Regresión	1	1739.73	1739.73	3561.81	0.0000
	Residuos	55	26.86	0.49		
	Total	56	1766.60			

Anexo 7: Estadísticos para las regresiones lineales del flujo de copas en función de la precipitación bruta observada en tres estadios sucesionales.

Variable	Temprano	Intermedio	Tardío
Coefficiente de correlación múltiple	0.9989	0.9929	0.9924
Coefficiente de determinación R^2	0.9978	0.9858	0.9848
R^2 ajustado	0.9977	0.9856	0.9845
Error típico	0.4765	0.7539	0.6989
Observaciones	59	59	57

Anexo 8: Coeficientes para las regresiones lineales del flujo de copas en función de la precipitación bruta observada en tres estadios sucesionales.

Estadio	Variable	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Temprano	Intercepción	-0.1268	0.0702	-1.81	0.07623
	Bruta	0.9434	0.0059	159.01	0.00000
Intermedio	Intercepción	-0.0545	0.1128	-0.48	0.63105
	Bruta	0.7601	0.0121	63.01	0.00000
Tardío	Intercepción	0.0804	0.1046	0.77	0.44520
	Bruta	0.4464	0.0075	59.68	0.00000

Anexo 9: Análisis de varianza para las regresiones lineales del flujo de fustes en función de la precipitación bruta observada en tres estadios sucesionales.

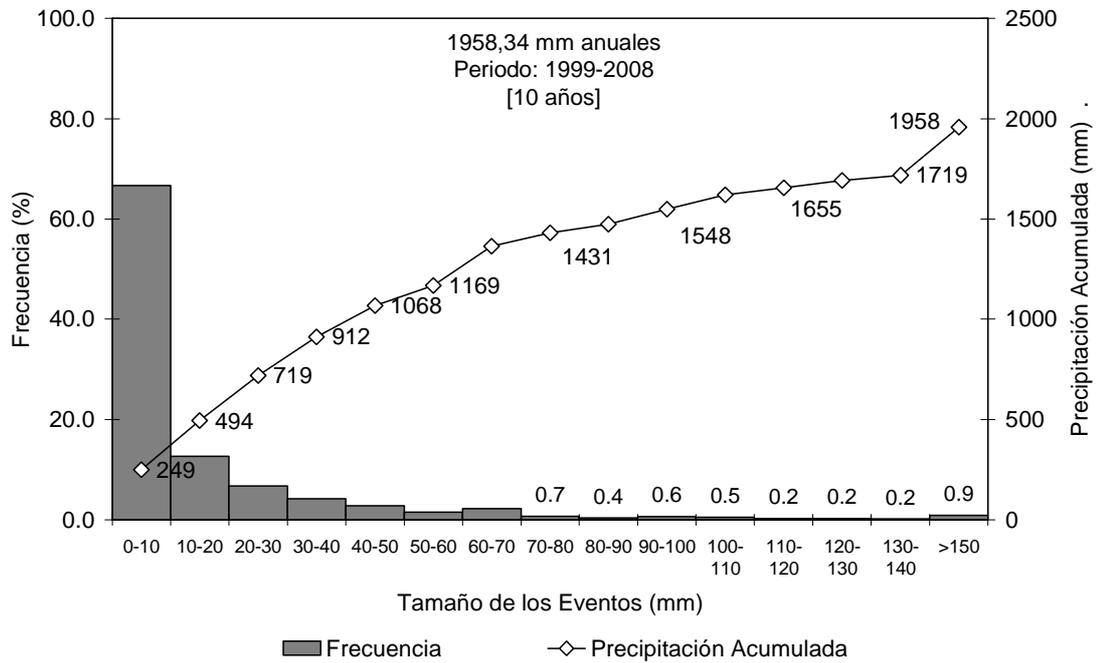
Estadio		Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Temprano	Regresión	3	0.022	0.007	1070.126	1.00281E-48
	Residuos	55	0.000	0.000		
	Total	58	0.023			
Intermedio	Regresión	3	0.011	0.004	96.554	6.65788E-22
	Residuos	55	0.002	0.000		
	Total	58	0.013			
Tardío	Regresión	3	0.002	0.001	183.787	5.49423E-28
	Residuos	53	0.000	0.000		
	Total	56	0.002			

Anexo 10: Coeficientes para las regresiones lineales del flujo de fustes en función de la precipitación bruta observada en tres estadios sucesionales.

Variable	Temprano	Intermedio	Tardío
Coeficiente de correlación múltiple	0.9915	0.9167	0.9551
Coeficiente de determinación R ²	0.9832	0.8404	0.9123
R ² ajustado	0.9822	0.8317	0.9073
Error típico	0.0026	0.0062	0.0017
Observaciones	59	59	57

Anexo 11: Coeficientes para las regresiones lineales del flujo de fustes en función de la precipitación bruta observada en tres estadios sucesionales.

Estadio	Variable	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Temprano	Intercepción	-0.00028	0.00044	-0.62800	0.53260
	Bruta	0.00060	0.00025	2.45037	0.01748
	Bruta ²	0.00012	0.00002	6.46185	0.00000
	Bruta ³	0.00000	0.00000	-6.99284	0.00000
Intermedio	Intercepción	-0.00038	0.00105	-0.36405	0.71721
	Bruta	0.00262	0.00054	4.84473	0.00001
	Bruta ²	-0.00002	0.00004	-0.48650	0.62854
	Bruta ³	0.00000	0.00000	-0.57435	0.56807
Tardío	Intercepción	-0.00021	0.00028	-0.73607	0.46494
	Bruta	0.00051	0.00011	4.58082	0.00003
	Bruta ²	-0.00002	0.00001	-2.41820	0.01907
	Bruta ³	0.00000	0.00000	3.08352	0.00325



Anexo 12. Frecuencia de eventos de lluvia y precipitación acumulada para la estación meteorológica del Parque Nacional Santa Rosa.

Anexo 13: Recopilación bibliográfica de estudios sobre intercepción de precipitación a nivel mundial.

Ecosistema	Datos Ambientales				Datos Estructurales					Pérdidas por Intercepción			Flujos		Referencias	
	Temp.	Precp.	Elev.	País	D ref.	Dens.	Altura	CC	G	Total	Copas	Mant.	Fc	Fc		
	(°C)	(mm)	(msnm)		(cm)	(nha ⁻¹)	(m)	(%)	(m ² m ⁻²)	(m ² ha ⁻¹)	(%)		(%)	(%)		
Bosque de <i>Pinus radiata</i>	12	2000	15	Chile		733	30	72	60.0	15					(Huber y Oyarzun, 1990)	
Plantación de <i>Vochysia ferruginea</i>	25	4429		Costa Rica		483		84.17	26.9		12.35		87.65		(Carvajal, 2004)	
Plantación de <i>Vochysia guatemalensis</i>	25	4429		Costa Rica		616		79.56	36.6		7.88		92.12		(Carvajal, 2004)	
Bosque Húmedo Tropical (Secundario)	25	4429		Costa Rica		1058		93.2	36.45	23.55			76.45		(Jiménez Rodríguez, 2005)	
Plantación de <i>Cordia alliodora</i>	25	4429		Costa Rica							21.04		78.96		(Casey, 1996)	
Plantación de <i>Cedrela odorata</i>	25	4429		Costa Rica							13.6		86.4		(Casey, 1996)	
Plantación de <i>Hyeronima alchorneoides</i>	25	4429		Costa Rica							41.29		58.71		(Casey, 1996)	
Bosques Húmedos Neotropicales				Neotrópico							17.8		82.2		(Cavelier y Vargas, 2002)	
Bosques Inundables Amazónicos				Brasil							18		82		(Tobón, 2000)	
Bosques Inundables Amazónicos				Brasil							13		87		(Tobón, 2000)	
Bosque Seco Tropical	24.9	679	150	México	>3.18	2790			3.3	12.7			23.4	76.6	(Campo-Alves, 2003)	
Bosque Seco Tropical	24.9	679	130	México	>3.18	3221			3.8	17.3			27.9	72.1	(Campo-Alves, 2003)	
Bosque Seco Tropical	24.9	679	70	México	>3.18	2104			5.4	19.8			25.9	74.1	(Campo-Alves, 2003)	
Plantación de <i>Pinus radiata</i> (Sitio Martelo)	12.9	1770	490	España		625	20				26		74	4	(Calvo de Anta y Gómez Rey, 2002)	
Plantación de <i>Pinus radiata</i> (Sitio Goente)	11.8	1573	520	España		625	18				22		78	11	(Calvo de Anta y Gómez Rey, 2002)	
Plantación de <i>Pinus radiata</i> (Sitio Muras)	13.5	1222	530	España		625	15				54		46	2	(Calvo de Anta y Gómez Rey, 2002)	
Bosque Templado de <i>Juniperus osteosperma</i>				Estados Unidos							17.301		82.70		(Skau, 1964)	
Bosque Templado de <i>Pinus strobus</i>				Estados Unidos			6.09			17.45	6	15	2	85	9	(Helvey, 1967)
Bosque Templado de <i>Pinus strobus</i>				Estados Unidos			17.37			27.54	9	15	3	85	6	(Helvey, 1967)
Bosque Templado de <i>Pinus strobus</i>				Estados Unidos			22.55			35.123	14	17	4	83	3	(Helvey, 1967)
Plantación de <i>Tectona grandis</i>				India		1156				22.52	20.8	26.8		73.2	6	(Dabral y Subra Rao, 1968)

Ecosistema	Datos Ambientales				Datos Estructurales						Pérdidas por Intercepción			Flujos		Referencias
	Temp.	Precp.	Elev.	País	D ref.	Dens.	Altura	CC	G	Total	Copas	Mant.	Fc	Fc		
	(°C)	(mm)	(msnm)		(cm)	(nha ⁻¹)	(m)	(%)	(m ² m ⁻²)	(m ² ha ⁻¹)	(%)		(%)	(%)		
Plantación de <i>Pinus roxburghii</i>				India		472				21.07		22.1	25.7	74.3	3.6	(Dabral y Subra Rao, 1968)
Bosque de <i>Quercus humboldtii</i>	14,9	1698	2400	Colombia	> 10	358				17.26			12.64	87.36		(Ruiz-Suescún <i>et al.</i> , 2005)
Plantación de <i>Pinus patula</i>	14,9	1698	2400	Colombia	> 10	439				41.73						(Ruiz-Suescún <i>et al.</i> , 2005)
Plantación de <i>Cupressus lusitanica</i>	14,9	1698	2400	Colombia	> 10	615				36.58						(Ruiz-Suescún <i>et al.</i> , 2005)
Bosque Secundario Semidecduo (9-16 sp)	22	1345		Brasil	> 5					23-35	18.3	20		80	1.7	(Oliveira-Júnior y Teixeira Dias, 2005)
Bosque Tropical Húmedo	26.7	2359	62	Brasil		450-550	40-50				21.5	23.2		76.8	1.7	(Oliveira <i>et al.</i> , 2008)
Plantación de <i>Acacia mangium</i>	15-32	1250		Brasil							14.4	47.8		52.2	33.4	(Balieiro <i>et al.</i> , 2007)
Plantación de <i>Pseudosamanea guachapele</i>	15-32	1250		Brasil							11.9	21.3		78.7	9.4	(Balieiro <i>et al.</i> , 2007)
Plantación de <i>Eucalyptus grandis</i>	15-32	1250		Brasil							15.6	21.5		78.5	5.9	(Balieiro <i>et al.</i> , 2007)
Plantación Mixta	15-32	1250		Brasil							11.8	17.4		82.6	5.6	(Balieiro <i>et al.</i> , 2007)
Bosque Tropical (Atlántico)	25.4	2457		Brasil	> 5		20				12.7	13.1		86.9	0.4	(Moura <i>et al.</i> 2009)
Bosque Denso de Tierra Firme (control 1987)	24.8-26.9			Brasil			15						28	72		(Ferreira <i>et al.</i> , 2005)
Bosque Denso de Tierra Firme (ESM 1987)	24.8-26.9			Brasil			15						10.5	89.5		(Ferreira <i>et al.</i> , 2005)
Bosque Denso de Tierra Firme (control 1993)	24.8-26.9			Brasil			15						18.9	81.1		(Ferreira <i>et al.</i> , 2005)
Bosque Denso de Tierra Firme (ESM 1993)	24.8-26.9			Brasil			15						14.1	85.9		(Ferreira <i>et al.</i> , 2005)
Bosque Lluvioso Montano Bajo (Natural)		2437-3424	800-1140	Indonesia			21.3	6.2	52.5					70	<1	(Dietz <i>et al.</i> , 2006)
Bosque Lluvioso Montano Bajo (Extracción d. menores)		2437-3424	800-1140	Indonesia					5.3					79	<1	(Dietz <i>et al.</i> , 2006)
Bosque Lluvioso Montano Bajo (Extracción d. mayores)		2437-3424	800-1140	Indonesia					5					80	<1	(Dietz <i>et al.</i> , 2006)
Agroforestal de Cacao Bajo Árboles Remanentes		2437-3424	800-1140	Indonesia			17.5		5.3	19.4				81	<1	(Dietz <i>et al.</i> , 2006)
Bosque de <i>Quercus rubra</i>				México										84.2		(Carlyle-Moses <i>et al.</i> , 2004)
Bosque Deciduo Maduro				Corea												(Kyongha-Kim <i>et al.</i> , 2005)
Bosque de <i>Pinus Koraiensis</i>				Corea							37.2			2.4		(Kyongha-Kim <i>et al.</i> , 2005)

Ecosistema	Datos Ambientales				Datos Estructurales						Pérdidas por Intercepción			Flujos		Referencias
	Temp.	Precp.	Elev.	País	D ref.	Dens.	Altura	CC	G	Total	Copas	Mant.	Fc	Fc		
	(°C)	(mm)	(msnm)		(cm)	(nha ⁻¹)	(m)	(%)	(m ² m ⁻²)	(m ² ha ⁻¹)	(%)		(%)	(%)		
Bosque de <i>Abies holophylla</i>				Korea											(Kyongha-Kim <i>et al.</i> , 2005)	
Bosque Mixto Rehabilitado				Corea						22.6				10.7	(Kyongha-Kim <i>et al.</i> , 2005)	
Bosque de Tierra Firme	25.5	3313		Perú									83.1		(Elsenbeer <i>et al.</i> , 1994)	
Bosque lluvioso Tropical	27	2300		Brasil	> 5	813	35		4.6				89		(Germer <i>et al.</i> , 2006)	