



Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
ESCUELA DE POSGRADO

Contribución hidrológica de la precipitación horizontal en un bosque
nublado de la zona del Trifinio, América Central

por

Alejandra Isabel Ramírez Rodríguez

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado
como requisito para optar por el grado de

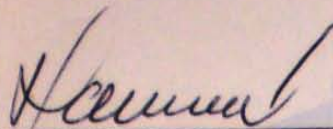
Magister Scientiae en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Turrialba, Costa Rica, 2011

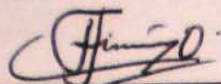
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

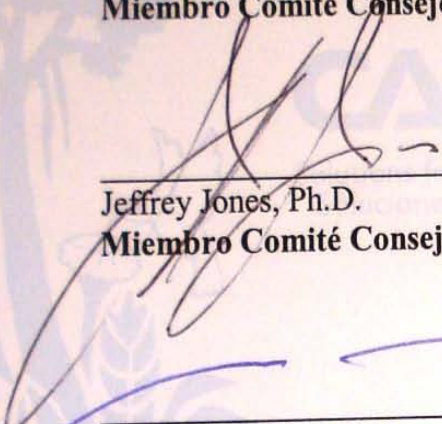
FIRMANTES:



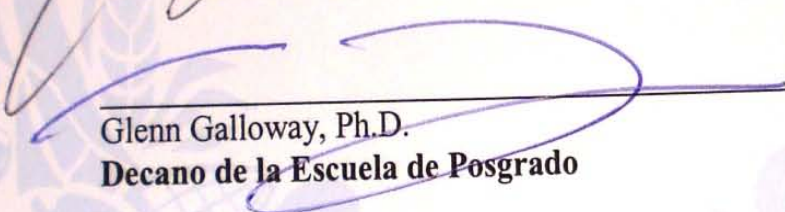
Jorge Faustino, Ph.D.
Consejero Principal




Francisco Jiménez, Dr.Sc.
Miembro Comité Consejero



Jeffrey Jones, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Glenn Galloway, Ph.D.
Decano de la Escuela de Posgrado



Alejandra Isabel Ramírez Rodríguez
Candidata

DEDICATORIA

A mis padres por la dedicación, los sacrificios y el amor que me ha dedicado toda su vida. A mis hermanos por estar siempre conmigo a pesar de la distancia. A mis tios y primos por el cariño de siempre. A mi familia entera.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad cada día de despertar y ser mejor.

A mi familia por el apoyo incondicional que me ha brindado toda mi vida.

A mi comité asesor, por no sólo ser mis profesores de aula, si no amigos y apoyo. Al Dr. Faustino por su siempre acertado consejo, al Dr. Jones por su interés y compañía en este trabajo, al Dr. Jiménez por todo el tiempo que nos dedicó a cada uno de nosotros dentro y fuera del aula. A todos por siempre tratar de sacar lo mejor de uno.

A todo el personal del Proyecto Riego Sostenible para la Producción de Hortalizas para el Mercado Nacional. A Numa, Orlando, Juan José, Héctor y Guadalupe por siempre acompañarme y aconsejarme durante toda la investigación, por los buenos ratos que me hicieron pasar en San Ignacio, por la buena compañía y por compartir conmigo su conocimiento. A todos en la OTN de El Salvador por ayudarme a toda hora en mi estadía en El Salvador. A Claudina, Adenilso y don Ricardo por su esfuerzo, colaboración y dedicación diaria en la toma de datos, por siempre estar dispuestos a colaborar. A todos ustedes muchas gracias por hacer que me sintiera como en casa. Que Diosito los bendiga siempre.

Al Congreso Nacional de Honduras y el Programa Agroambiental Mesoamericano de CATIE por financiar mis estudios durante mis dos años en CATIE.

A mis queridos compañeros de la promoción 2009. Los recuerdo mucho y atesoro en mi corazón todos los momentos que pasamos juntos. Que Diosito los cuide y los llene de muchos éxitos a todos. Los quiero mucho.

CONTENIDO

CONTENIDO	V
RESUMEN	VII
SUMMARY.....	VIII
ÍNDICE DE CUADROS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos del estudio.....	6
1.1.1 <i>Objetivo general</i>	6
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	6
1.2 Preguntas de investigación.....	6
2. MARCO REFERENCIAL.....	7
2.1 Precipitación horizontal	7
2.1.1 <i>Terminología de precipitación horizontal</i>	7
2.1.2 <i>Proceso de formación de neblina o nubes</i>	7
2.1.3 <i>Proceso de intercepción de neblina</i>	8
2.1.4 <i>Factores que afectan la intercepción de precipitación horizontal</i>	9
2.1.5 <i>Análisis del aporte de la precipitación horizontal en las cuencas hidrográficas</i> 10	
2.2 Bosque nublado.....	11
2.2.1 <i>Tipos de vegetación en el bosque nublado</i>	13
2.2.2 <i>Terminología</i>	15
2.2.3 <i>Análisis del aporte de los bosques nublados en la producción de agua y el manejo de cuencas</i>	15
3. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1 Ubicación del área de estudio	18

3.2	Características físicas y socioeconómicas de la zona de estudio	19
3.2.1	<i>Zonas de vida</i>	19
3.2.2	<i>Clima</i>	21
3.2.3	<i>Precipitación</i>	22
3.2.4	<i>Topografía y relieve</i>	23
3.2.5	<i>Geología y suelos</i>	23
3.2.6	<i>Uso actual del suelo y manejo de los recursos naturales</i>	23
3.2.6.1	Recursos hídricos	24
3.2.7	<i>Características socioeconómicas</i>	25
3.3	Metodología aplicada para la medición de precipitación horizontal del dosel	26
3.4	Metodología aplicada para la medición de precipitación horizontal escurrida por el tronco	28
3.5	Metodología de verificación	30
3.6	Cálculo del agua aportada por precipitación horizontal	31
3.6.1	<i>Precipitación vertical</i>	31
3.6.2	<i>Cálculo de porcentaje de agua aportada por precipitación horizontal</i>	32
3.7	Cálculo de balance hídrico climático	32
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
4.1	Metodología, equipo y resultados de medición de la precipitación horizontal en coberturas boscosas.....	34
4.1.1	<i>Métodos de medición de la precipitación horizontal</i>	44
4.2	Aporte de agua por neblina en Los Romero, Milingo y Río Chiquito.....	46
4.3	Aporte de neblina a la relación evapotranspiración – precipitación	59
5.	CONCLUSIONES	63
6.	RECOMENDACIONES.....	64
7.	LITERATURA CITADA	66

RESUMEN

En la mayoría de los bosques las pérdidas por intercepción de la lluvia son un factor importante a la hora de calcular la cantidad de agua que finalmente llega al suelo. Sin embargo, el bosque nublado es una excepción mostrando que aporta agua adicional en el proceso de intercepción por neblina. El aporte de agua adicional en los bosques nublados atribuidos a la neblina anda entre el 64 y 92% del total de la precipitación anual dependiendo del tipo de vegetación. El estudio se llevó a cabo en el cerro El Pital, ubicado en el municipio de Chalatenango, El Salvador durante la época seca comprendida entre los meses de octubre de 2009 y marzo de 2010. El objetivo principal de este estudio fue el de medir el aporte hidrológico del bosque nublado, mediante la precipitación horizontal, al balance hídrico climático de la zona influencia del Proyecto CATIE- FOMILENIO, zona del Trifinio. La zona de estudio es de importancia para El Salvador por poseer el punto más alto del país, mostrando así ecosistemas únicos donde la poca área de bosque de pino se encuentra amenazada por el avance de la frontera agrícola. Para la medición del aporte de precipitación horizontal se instalaron tres juegos de pluviómetros horizontales en diferentes altitudes para medir la cantidad de agua que el dosel atrapa y deja caer al suelo y se colocaron mangueras alrededor del tronco de los árboles para medir el agua que escurre por la corteza. Para el tiempo de estudio el primer sitio que se ubica en Los Romero a 2090 msnm recibió 5 mm, el segundo a 2170 msnm en Milingo recibió 24 mm y en el punto más alto a 2330 msnm en Río Chiquito recibió 62 mm. A diferencia de Los Romero y Milingo, Río Chiquito recibió aporte de neblina durante todos los meses. Dentro del balance hídrico esta cantidad de agua aparece como un aporte bajo en volumen, mostrando déficit de agua durante los meses de diciembre a marzo; sin embargo, a nivel global la interacción entre los bosques y la neblina modifica variables como la radiación solar, la humedad relativa que finalmente se ven reflejados en una reducción en la evapotranspiración, que finalmente se expresa en una reducción en la utilización del agua.

Palabras claves: precipitación horizontal, bosque nublado, bosque de pino, balance hídrico climático

SUMMARY

In most forest interception loss of rainfall is an important factor when calculating the amount of water that eventually reaches the ground. However, the cloud forest tends to be an exception providing extra water in the fog interception process. The contribution of additional water in the cloud forests attributed to the fog goes between 64 and 92% of the total annual precipitation depending on the type of vegetation. The study was carried out at Cerro El Pital, located in the municipality of Chalatenango, El Salvador during the dry season between the months of October 2009 and March 2010. The general objective of this study was to measure the hydrological contribution of the cloud forest by horizontal precipitation in the climatic water balance of the project influence area CATIE-FOMILENIO Trifinio zone. The study area is of importance to El Salvador for having the highest point in the country, showing unique ecosystems where the pine forest area is threatened by the advance of the agricultural frontier. To measure the contribution of horizontal precipitation were installed three sets of horizontal rain gauges at different altitudes to measure the amount of water that the canopy catches and drops to the floor and hose placed around tree trunks to measure the water that runs by the tree cortex. For the study period the first site is located in Los Romero at 2090 masl was 5 mm, the second at 2170 masl in Milingo received 24 mm and the highest site at 2330 masl in Rio Chiquito received 62 mm. Unlike Romero and Milingo, Rio Chiquito received fog contribution during each month. Within the water balance these water volumes appears as a low contribution, presenting water stress during the months of December to March, but globally the interactions between forests and fog adjust variables such as solar radiation and relative humidity are finally reflected in a reduction in evapotranspiration, giving at last saving in water usage.

Key words: horizontal precipitation, cloud forest, pine tree forest, climatic water balance

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Lista de los principales atributos de los BN.....	12
Cuadro 2. Especies vegetales encontradas en la zona de estudio	21
Cuadro 3. Estudios de medición de lluvia efectiva.....	34
Cuadro 4. Estudios de medición de escurrimiento de tronco.....	37
Cuadro 5. Estudios de medición de intercepción.....	39
Cuadro 6. Métodos de medición de precipitación horizontal	45
Cuadro 7. Precipitaciones en milímetros en la época seca en Las Pilas, Chalatenango, El Salvador para el período de 1999 – 2009	47
Cuadro 8. Precipitación incidente mensual del período seco 2009 – 2010	48
Cuadro 9. Aporte diario de neblina en milímetros para la época seca.....	52
Cuadro 10. Aporte mensual de neblina en milímetros para la época seca.....	53
Cuadro 11. Balance hídrico climático, tipo Thornthwaite, sin incluir precipitación horizontal en Milingo, Chalatenango, El Salvador	60
Cuadro 12. Balance hídrico climático, tipo Thornthwaite, incluyendo precipitación horizontal en Milingo, Chalatenango, El Salvador	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de neblina	8
Figura 2. Mapa de ubicación San Ignacio, Chalatenango, El Salvador	19
Figura 3. Microcuencas del Proyecto de Riego Sostenible para la Producción de Hortalizas para el Mercado Nacional.	25
Figura 4. Pluviómetro horizontal o canoa utilizada.	27
Figura 5. Manguera para recolección de escurrimiento del tronco.....	29
Figura 6. Esquema de sistema de recolección de precipitación horizontal, vista frontal	30
Figura 7. Dibujo de plástico con vista frontal.....	31
Figura 8. Precipitación incidente de los meses de octubre a diciembre para el período de 1999 a 2010 en Las Pilas, Chalatenango, El Salvador. Elaboración propia.	46
Figura 9. Días de registro de precipitación horizontal en los meses de octubre y noviembre 2009	49
Figura 10. Días de registro de precipitación horizontal en los meses de diciembre 2009 y enero 2010.....	50
Figura 11. Días de registro de precipitación horizontal en los meses de febrero y marzo 2010	51
Figura 12. Comparación entre el promedio de lluvias para octubre de 1999 – 2009, lluvia octubre 2009 y precipitación horizontal (PH) para octubre 2009.....	54
Figura 13. Comparación entre el promedio de lluvias para noviembre de 1999 – 2009, lluvia noviembre 2009 y precipitación horizontal (PH) para noviembre 2009.....	55
Figura 14. Comparación entre el promedio de lluvias para diciembre de 1999 – 2009, lluvia diciembre 2009 y precipitación horizontal (PH) para diciembre 2009.....	56
Figura 15. Comparación entre el promedio de lluvias para enero de 1999 – 2009, lluvia enero 2010 y precipitación horizontal (PH) para enero 2010.....	57
Figura 16. Comparación entre el promedio de lluvias para febrero de 1999 – 2009, lluvia febrero 2010 y precipitación horizontal (PH) para febrero 2010.....	58
Figura 17. Comparación entre el promedio de lluvias para marzo de 1999 – 2009, lluvia marzo 2010 y precipitación horizontal (PH) para marzo 2010.....	59

LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS

ANDA: Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados

C.A.: Centro América

COSUDE: Agencia Suiza para el Desarrollo y Cooperación

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación

Ha: Hectáreas

m: Metros

mm: Milímetros

msnm: Metros sobre el nivel del mar

SF: Esguimiento del tronco

SFC: Standard Fog Collector

SNET: Servicio Nacional de Estudios Territoriales

TF: Lluvia efectiva

LSFC: Louvered Screen Fog Collector

PAFES: Plan de Acción Forestal de El Salvador

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques cubren el 30% del área total de la tierra. El área total de los bosques en el 2005 era un poco menos de 4 billones de hectáreas, lo que significa un promedio de 0,62 ha per cápita, pero esta se encuentra desigualmente distribuida. Por ejemplo, 64 países que suman una población de 2 mil millones de habitantes tienen menos de 0,1 ha de bosque per cápita. Los 10 países más ricos en bosques reúnen dos tercios del área total de bosques, 7 países o territorios no tienen bosque alguno y otros 57 tienen bosques en menos del 10% del área total de su tierra (FAO 2005b).

En muchas regiones del mundo, los usos abusivos y erróneos y la contaminación amenazan cada vez más la disponibilidad y la calidad del agua y se considera con frecuencia que los bosques influyen fuertemente en ambas. Las cuencas hidrográficas forestales proporcionan una gran parte del agua que se destina a usos domésticos, agrícolas, industriales y ecológicos (Holder et al. 2007). De Groot et al. (2002) mencionan que los bosques brindan varios servicios ecosistémicos dentro de las cuencas en función con el abastecimiento y uso del agua fresca por parte de los hogares, agricultura y la industria. La regulación climática es uno de estos servicios, manteniendo un clima favorable a escala local y global viene a beneficiar la salud humana y la productividad agrícola. Otro servicio que brindan los bosques es la del mantenimiento del drenaje natural, amortiguamiento en las descargas extremas de los ríos, regulación de caudales y la provisión de medio de transporte, todo esto de importancia para zonas agrícolas.

El bosque participa en forma activa de los procesos meteorológicos y en los intercambios de materia y energía dentro de una cuenca. Los principales procesos meteorológicos que son modificados por los bosques son la temperatura, viento, precipitación y evapotranspiración (CATIE 1988). La remoción de los bosques y su reemplazo por casi cualquier otro uso de suelo, resulta en un aumento en el albedo (capacidad de una superficie a reflejar la radiación) (Manson 2004). Los bosques presentan un albedo muy bajo en comparación a otras superficies (suelo de arena seca 35-45%, suelo limoso seco 23% versus un bosque de coníferas 10-15%); en consecuencia, los bosques reflejan sólo una pequeña parte de la radiación y absorben la mayor parte, convirtiéndola en otras formas de energía (Heuvelink et al. 1986).

Tomando en cuenta lo anterior, la mayor parte de la energía absorbida es convertida a evapotranspiración, causando un enfriamiento relativo a las superficies foliares; y por ende resulta en un calentamiento reducido en el aire. En comparación con otras coberturas, los bosques actúan como enfriadores del ambiente, mitigando temperaturas extremas. De la misma manera, por no recibir radiación directa, la temperatura del suelo nunca alcanza valores tan elevados como en campo abierto lo que tiene implicaciones importantes para los procesos microbiológicos y de meteorización. El efecto sobre el viento se debe principalmente a la rugosidad de la cobertura vegetal del bosque que causa turbulencias. Los bosques tienen la capacidad de limpiar el aire de sustancias contaminantes a través de la absorción, filtración y sedimentación (CATIE 1988; Heuvelink, et al. 1986).

La presencia de árboles mejora la calidad del agua (Calder 2005) y generalmente disminuye de manera significativa la tasa de erosión, a pesar del alto potencial erosivo de la lluvia (Stadtmüller 1994). Según Calder (2005), el grado de erosión depende mucho de la especie del árbol; por ejemplo, las gotas que caen de *Tectona grandis* tienen nueve veces más energía cinética para causar erosión que las gotas que caen de *Pinus caribaea*. La erosión de los suelos aumenta las concentraciones de nutrientes en los ríos provocando problemas de eutricación y condiciones anóxicas nocivas para las especies acuáticas. Esta contaminación puede ser reducida con los árboles (Manson 2004); una franja de 30 m de bosque puede remover entre 40 y 78% de los contaminantes comunes en el agua del río (Spruill 2000; Kuusemets et al. 2001, citado por Manson 2004). La destrucción de los bosques y la conversión a plantaciones tienen externalidades ambientales significativas, tales como el aumento de la erosión del suelo, el desbalance en regulación hídrica y la reducción de la calidad del agua, así como impactos sociales negativos sobre las comunidades locales (Lara y Veblen 1993, citado por Oyarzún et al. 2005).

Manson (2004), indica que la tala provoca un aumento en el escurrimiento pluvial, pero también una disminución de la captación de agua y recarga acuífera, provocando que haya menos agua disponible durante la época seca. Hamilton y King (1983) que señalan que la tala del bosque no influye en la precipitación bruta, pero existe una excepción que para efectos de esta investigación interesan; en ciertas zonas montañosas que se encuentran cubiertas por nubes o neblina existen los bosques nublados (BN). Nubosidad, su intercepción y subsecuentemente su distribución son de especial importancia hidrológica, ya que puede

aumentar notablemente la precipitación y la escorrentía (Zadroga 1981). Por ejemplo, en cuatro diferentes bosques de Australia, para un período entre 391-657 días, McJannet et al. (2007) encontraron que entre el 9-29% de las entradas totales se atribuye a la intercepción de neblina de los árboles.

En los trópicos húmedos, los bosques nublados son uno de los ecosistemas más amenazados. Actualmente los mayores riesgos que enfrentan estos ecosistemas es su transformación a usos agrícolas y campos de pastoreo, incendios forestales y degradación o pérdida de biodiversidad. Se calcula que en áreas pequeñas el tiempo de recuperación puede ser relativamente rápido, mientras que en espacios grandes e intensamente utilizados puede tomar más de 150 años, como es el caso de los bosques nublados de Puerto Rico, que se estima que necesitan 200 años para recuperar su estructura (Kappelle y Brown 2001). En Centro América y el Caribe, LaBastille y Pool (1978) consideran que en la década de 1970 los bosques nublados estaban siendo reducidos más rápido que cualquier otro tipo de bosque. De igual manera, Doumenge et al. (1995) y Bruijnzeel (1995) estimaron que cerca del 90% de los bosques nublados del norte de los Andes colombianos se habían perdido, debido mayormente a la conversión a pastizales y campos agrícolas. Cavelier y Goldstein (1989) encontraron que el 48% de las entradas anuales de un bosque en Colombia provienen de precipitación horizontal.

A los riesgos arriba mencionados se les debe agregar las posibles consecuencias del componente de cambio climático y variabilidad climática. Se espera que a nivel mundial la temperatura promedio de la superficie del planeta aumente entre 1,4 y 5,8 °C hasta el 2100 (Cifuentes 2009). Entre los efectos más importantes se encuentra un aumento de la tasa de extinción de algunas especies ya que las cimas de las montañas constituyen el límite físico máximo donde las especies podrían migrar y subsistir y el segundo efecto, quizás el que más importa para este estudio es el desplazamiento de hábitats hacia latitudes y elevaciones más altas. En Mesoamérica, y por consiguiente en la zona de interés de este estudio (Centro América), los cambios en la estacionalidad e intensidad de la precipitación, más que los cambios anuales en temperatura, fomentarían el reemplazo de zonas climáticas (zonas de vida) pluviales y muy húmedas por zonas secas y muy secas. Los bosques montanos y secos son los más vulnerables a este reemplazo. La altura de la capa de nubes durante la estación seca se ha estado elevando a una tasa de 2 m por año, debido en parte a la deforestación. Si este aumento

continúa y la temperatura también aumenta 1 ó 2 °C en los próximos 50 años, los bosques nubosos de altura se verían amenazados (Cifuentes 2009).

En C.A. se calcula que el bosque nublado cubre más de 43598 km² (cerca del 8% del territorio total), de los cuales sólo, el 42% (18485 km²) está dentro de alguna categoría de protección (Kappelle y Brown 2001). En la Sierra de las Minas, Guatemala, se localiza el bosque nublado más grande Centro América con 2400 km² de extensión. En algunas zonas del sureste de Honduras también hay bosques nublados, los más grandes, junto a la frontera con Nicaragua. En Nicaragua los bosques nublados se dan en la zona fronteriza con Honduras y la mayoría fueron talados para cultivar café; todavía hay bosques nublados en algunos cerros de la zona norte, también en el volcán Mombacho, se localiza el único bosque nublado de la costa pacífica de América Central. En Costa Rica hay bosque nublado en la cordillera de Tilarán, más específicamente entre Monteverde (reservas de Santa Elena y Monteverde) y el volcán Arenal; también hay algunos bosques nubosos en la cordillera de Talamanca. En Honduras el bosque nublado La Tigra abastece el 43% de agua a la ciudad de Tegucigalpa (Mejía 2001, citado por Kappelle y Brown 2001), ciudad que cuenta con una población aproximada de 1300000 habitantes.

Particularmente, El Salvador es el país con mayor densidad poblacional a nivel Latinoamericano y con la tasa de deforestación más alta de Centroamérica, con un 4,6% anual (FAO 2002, citado por Blackman 2006). Cuando se habla del sector forestal salvadoreño, nos referimos a un sector que se ha reducido a una mínima expresión (Segura 1997). Para el período 1990-1991, en el país sobrevivía menos del 10% de su bosque natural (8,8%) (Soihet 2000); incluso, el Banco Mundial estimaba que llegaba a tan sólo el 5% del territorio nacional, (unos 1000 km²) (Segura 1997) y ya para el 2005 se estimaba que sobrevivía solamente el 2% de su bosque natural (Banco Mundial 2005). Del área total de bosques, el 2% está asignado a la producción maderable, el 2,3% a la conservación y el 95,7% no tiene asignación alguna o es desconocida (FAO 2005c). Entre las principales causas de deforestación del país están las actividades de desarrollo urbano y del sector industrial y en segundo lugar la agricultura de exportación y ganadería (Soihet 2000), acompañadas por el confuso marco institucional que gobierna estas tierras (Banco Mundial 2005). Según el Programa de Acción Forestal de El Salvador (PAFES 1994, citado por Segura 1997), las principales áreas protegidas de El

Salvador cubren en conjunto 372 km² (menos del 1,8% del territorio), dentro de los cuales El Pital, punto más alto del país (2730 msnm) solamente cubre 5 km² (Soihet 2000).

A lo anterior, se debe agregar que los diferentes escenarios modelados de lo que se puede encontrar en un futuro debido al cambio climático o variabilidad climática coinciden en que los mayores impactos de aumento de temperatura serán El Salvador, junto con el sur de Nicaragua y Panamá. Esto se debe a que la mayor capacidad de adaptación que tiene los ecosistemas y las especies en latitudes más altas se encuentra a partir del norte de Honduras (Cifuentes 2009).

Al momento de la realización de esta investigación, se estaba implementando un proyecto de riego en la zona con el fin de mejorar la productividad agrícola de la región y así mejorar la calidad de vida de las familias de la zona norte de El Salvador. Este proyecto surgió a partir del hecho que esta zona es la principal productora de repollo del país; sin embargo, no cubre la demanda total del país, teniendo así que importar de los vecinos países de Guatemala y Honduras. Los agricultores manifiestan que este déficit de producción se da principalmente a que en la época seca no les es posible cultivar ya que los caudales de los ríos bajan a tal grado que no es posible bombear agua con la tecnología con la que ellos cuentan. Por lo que el proyecto busca contribuir con el uso eficiente del recurso hídrico a través de una mejora en la tecnología a utilizar. Teniendo en mente la limitante hídrica en esta zona, sobretodo en la época seca, parte de la justificación de este estudio es cuantificar el total de la oferta hídrica e identificar sus fuentes para poder tomar decisiones fundamentadas.

Este estudio vendrá a identificar los conocimientos ya generados por trabajos realizados en otras regiones y su aplicabilidad en condiciones geográficas y climáticas similares a El Pital. De igual manera, si existe alguna relación positiva entre la presencia de área boscosa con la cantidad de agua aportada a la cuenca, se debe demostrar con suficientes fundamentos, para así tomar medidas de protección y conservación de estas áreas. En la región centroamericana la mayor parte de los efectos directos e indirectos del cambio climático se centrarán alrededor de la disponibilidad de agua, viéndose especialmente la costa Pacífica que sufrirá una reducción en la precipitación de hasta un 20% hacia el 2020 (Cifuentes 2009). Tanto Wicht (1961), como Stadtmüller (1987a) resaltan el hecho que no considerar el aporte de la

precipitación horizontal en cuencas con BN, introduce valores equivocados en la estimación del balance hídrico de la cuenca.

1.1 Objetivos del estudio

1.1.1 Objetivo general

Medir el aporte hidrológico del bosque nublado, mediante la precipitación horizontal, al balance hídrico climático de la zona influencia del Proyecto CATIE- FOMILENIO, zona del Trifinio.

1.1.2 Objetivos específicos

- Revisar la información existente sobre metodologías de captura de precipitación horizontal en bosques nublados.
- Medir la cantidad de agua que es atrapada por el dosel que finalmente llega al suelo, ya sea por goteo o por escurrimiento de tallos.
- Calcular el aporte por intercepción de precipitación horizontal a la precipitación total del área de estudio y al balance hídrico climático.

1.2 Preguntas de investigación

Para poder lograr alcanzar el objetivo principal de este estudio, es necesario preguntarse:

1. ¿Todas las metodologías utilizadas en otros estudios para estimar o medir la precipitación horizontal son adecuadas para aplicar en la zona de estudio?
2. ¿Cuánta cantidad de agua llega al suelo ya sea por goteo o por escorrentía de tallos proveniente de la precipitación horizontal?
3. ¿Cuál es la magnitud del aporte de agua por precipitación horizontal a la precipitación total del área de estudio y a su balance hídrico climático?

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Precipitación horizontal

El concepto de precipitación horizontal comprende la cantidad de humedad captada directamente de las nubes por obstáculos, como por ejemplo árboles, a través del proceso de condensación y luego es precipitado al suelo (Stadtmüller 1987b). El insumo adicional de agua en combinación con las temperaturas más bajas en las zonas montañosas son el factor ecológico importante que actúa sobre las diferentes formaciones de bosques nublados (Stadtmüller 1987a).

2.1.1 Terminología de precipitación horizontal

La precipitación adicional a las lluvias ha sido denominada de varias maneras. De acuerdo con Stadtmüller (1987), los términos más utilizados son: intercepción horizontal, intercepción negativa, intercepción de humedad de nubes, precipitación de neblina, goteo de la neblina, goteo de condensación, lluvia del bosque, “mist precipitation”, “fog stripping”, “occult precipitation” o lluvia oculta y precipitación horizontal. Para los fines de este estudio se utilizará el último término para referirnos a esta entrada adicional de agua para evitar la confusión con el término de “intercepción” que en algunas ocasiones es utilizado como el agua que es interceptada por el dosel de la vegetación y es retenida para posteriormente ser evaporada y por ende, más una salida que entrada al sistema.

2.1.2 Proceso de formación de neblina o nubes

De acuerdo con Bruijnzeel et al. (2005), la neblina consiste en la condensación a gotas de agua líquida provenientes de vapor de agua o el remanente de una brisa del mar o la evaporación de las gotas de lluvia. La visibilidad horizontal es de menos de 1000 m. El contenido de agua presente en la neblina es en su mayoría en estado gaseoso y no líquido. La formación de neblina ocurre cuando la temperatura ambiental cae por debajo del límite a la que el vapor se condensa, o sea del punto de rocío.

Aparte de la neblina del hielo y urbana, esta se puede clasificar en siete diferentes tipos. Cuatro tipos llevan su nombre de acuerdo a su formación, mientras que los tres restantes debido a su ocurrencia geográfica (Figura 1). El primer tipo es la neblina radiativa (“radiation

fog”), la más común de tierra firme. El proceso dominante de formación de este neblina es el enfriamiento nocturno debido a la emisión de radiación de onda larga, lo cual puede reducir la temperatura por debajo del punto de rocío y formar pequeñas gotas de tamaños entre 1-50 μm . La neblina radiativa en climas templados húmedos ocurre durante la época fría y en climas cálidos ocurren durante la época seca. La aparición de esta neblina es muy corta, se da principalmente al amanecer cuando la temperatura es más baja. La segunda es la neblina marina (“sea fog”), que se forma cuando el aire caliente y húmedo es enfriado bajo el punto de rocío, a medida que se mueve sobre la superficie del mar. La tercera es la neblina de vapor (“steam fog”), la que a diferencia de la anterior, se forma cuando aire frío pasa sobre una superficie de agua caliente, la cual se evapora más rápidamente de lo que el aire frío es capaz de absorber dicha humedad, por lo que el exceso de vapor se condensa y forma gotas de agua líquida. La cuarta de las neblinas por su formación es la advectiva (“advection fog”). Esta difiere de la radiativa porque su ocurrencia se da junto con vientos que promueven su desplazamiento horizontal. Los tres restantes tipos de neblina obtienen su nombre por la ubicación de su ocurrencia. Estos son neblina costera (“coastal fog”), de valle (“valley fog”) y de montaña (“mountain fog”). Esta última ha demostrado tener un fuerte impacto en la hidrología, cantidad de nutrientes y contaminación de bosques montanos, tanto en zonas templadas, como en los llamados bosques nublados del trópico (Bruijnzeel et al. 2005).

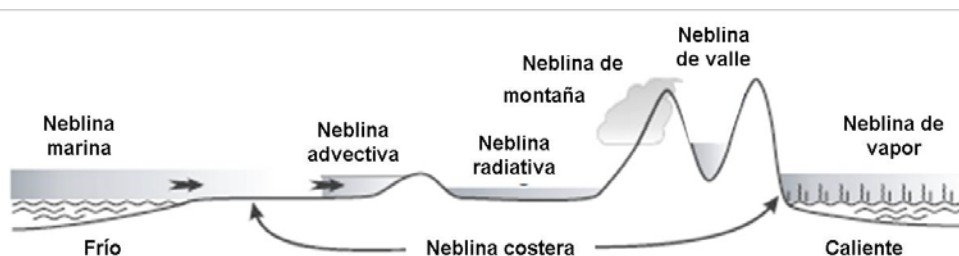


Figura 1. Tipos de neblina

2.1.3 Proceso de interceptación de neblina

La cantidad de niebla que toca y se mueve entre los árboles cargados de musgos y epifitas puede ser tal que el agua de la niebla comienza a gotear desde las hojas y también desde los musgos (Bruijnzeel 2001b). Interceptación es el proceso mediante el cual la lluvia es retenida

por la cobertura vegetal y baja por los tallos o follaje hasta llegar al suelo o bien es evaporada a la atmósfera (Zambrana 1975). El entendimiento de este concepto y su práctica es una de las herramientas necesarias en el manejo de las cuencas hidrográficas y el ciclo hidrológico en los ecosistemas vegetales.

Este proceso comienza con el humedecimiento de la vegetación hasta llenar su capacidad máxima de almacenamiento, que es comparable con la capacidad de campo del suelo, posteriormente el exceso de agua gotea del follaje o escurre por los tallos (Holder 2004).

2.1.4 Factores que afectan la intercepción de precipitación horizontal

La cantidad de agua que es adicionada al sistema depende de muchos factores muy asociados a la vegetación y el clima. Para que exista evaporación debe existir humedad suficiente y energía que proporcione calor necesario para el proceso, por lo tanto la radiación solar y la cantidad, intensidad, duración y distribución de la lluvia son factores indispensables. Por su parte el viento tiene la capacidad de transportar el aire frío o caliente lejos de su origen, que consecuentemente influye en la ocurrencia y el tipo de neblina (Zambrana 1975).

Otro aspecto a mencionar es que los árboles solitarios captan mucha más precipitación horizontal por área que bosques de la misma especie (Ekern 1964 y Vogelmann 1973). Esto se debe significativamente a la exposición que tienen al viento, convirtiéndolos en más eficientes para captar y condensar el agua de las nubes (Kämmer 1974).

Poco se sabe sobre el efecto de forma y tamaño de las hojas sobre la intercepción horizontal; sin embargo, Went (1955) y Vogelmann (1973) (citados por Stadtmüller 1987) opinan que las coníferas son más eficientes que las latifoliadas. Vogelmann (1973) demuestra cómo la neblina al pasar por un grupo aislado de pinos en Las Vigas, México es interceptada por las copas de los árboles y se puede ver cómo gotas de agua caen de las acículas. El suelo debajo de la copa estaba saturado hasta una profundidad de 8 a 10 cm. Fuera de esta copa el suelo estaba completamente seco.

La complejidad de la geometría de la superficie vegetal natural con referencia a la dirección prevaleciente al viento durante un evento de neblina es un factor complejo. La eficiencia en la colección probablemente no es uniforme sobre todo el dosel del bosque y el área colectora es

muy difícil de estimar con relación a la proyección horizontal del área del suelo debajo del dosel. Se conoce que el área barlovento de la vegetación están normalmente húmedas, mientras que las sotavento se mantienen secas durante los períodos de intercepción de neblina (Zadroga 1981).

2.1.5 Análisis del aporte de la precipitación horizontal en las cuencas hidrográficas

Varios autores, entre ellos Hibbert (1967), Hewlett (1961), Bruijnzeel (2001a, 2004) y Chagoya (2009), presentan estudios con resultado que demuestran un aumento de la producción de agua que se puede obtener por la remoción de la cobertura forestal, de lo cual se puede suponer que este incremento se debe a la reducción del agua que es interceptada y retenida por la vegetación (Swank s.f.).

Por la combinación de los ingresos adicionales de la intercepción de la precipitación horizontal y el bajo uso de agua, la producción de agua de un evento de lluvia en los bosques nublados tiende a ser mayor volumen que aquellos bosques de montaña que no tienen la influencia de la neblina (Stadtmüller 1987). Inclusive, un caso de 180% de precipitación neta (agua que cae al suelo por precipitación vertical y horizontal) ha sido registrada para un bosque aislado en la cima de una montaña en Honduras (Bruijnzeel 2001b). Los BN de montaña usan entre 250-500 mm menos de agua por año que otro bosque de montaña. La reducción del caudal de los ríos en épocas secas de convertir área boscosa a uso agrícola es de 50-75 mm/mes (Bruijnzeel 2001a). La precipitación horizontal puede mantener estable el caudal base hasta en época de escasez de agua (Stadtmüller 1987).

Cualquier cantidad de agua que las neblinas depositen sobre la vegetación, puede considerarse como una ganancia, ya que la energía que es usada para la evaporación desde la superficie de las hojas durante los períodos libres de nubosidad, podría haber sido utilizada en transpiración de igual cantidad de agua del suelo (McCulloch et al. 1965, citado por Cáceres 1981). De igual manera, Beasdale (1957, citado por Cáceres 1981) propuso que la precipitación horizontal compensa las pérdidas por evaporación e intercepción normal, por lo que es apropiado incluirla en el balance hidrológico de las cuencas.

Uno de los estudios realizados en C.A. fue el que llevó a cabo Zadroga (1981) en el que comparó varias cuencas que desembocan tanto en el Pacífico como en el Atlántico. Él encontró que en el Atlántico la escorrentía total anual fue de 102% de la precipitación anual estimada, en contraste con el Pacífico que sólo fue el 34,5%. También en el Atlántico se encontró que la escorrentía sobrepasó a la precipitación durante 7 meses del año, tanto de época seca como lluviosa y en el Pacífico excedió 4 meses, durante la época seca.

2.2 Bosque nublado

Según Stadtmüller (1987), los BN son todos aquellos bosques que frecuentemente están cubiertos por nubes o neblinas. Los principales atributos de los BN son sus características climáticas, vegetación, productividad, absorción de nutrientes, suelo y hojarasca y el balance hídrico positivo (Cuadro 1). Constituyen ecosistemas forestales con una flora y una estructura características. Normalmente ocurren en una franja altitudinal donde el ambiente se caracteriza por una cobertura de nubes persistente o estacional, la cual reduce la radiación solar y el déficit de vapor, llegando a suprimir los procesos de evapotranspiración (Hamilton, et al. 1995, citados por Kappelle y Brown 2001). Los suelos en general son húmedos, con un alto grado de materia orgánica humificada. En estudios realizados en El Salvador y Venezuela se han reportado capas de materia orgánica de más de 1 m hasta 4 m de espesor (Stadtmüller 1987). Los valores de biodiversidad de árboles, hierbas, arbustos y epífitas son altos si se compara con la selva tropical lluviosa. Los valores de endemismos son también muy altos (Hamilton, Juvik y Scatena, 1995 citado por Kappelle y Brown 2001).

Cuadro 1. Lista de los principales atributos de los BN

Características climáticas
<i>Presencia frecuente de nubes</i>
<i>Usualmente una alta humedad relativa</i>
<i>Baja radiación</i>
Vegetación característica
<i>Abundancia de epifitas</i>
<i>Árboles achaparrados</i>
<i>Hojas pequeñas, gruesas y duras</i>
<i>Alto endemismo</i>
Baja productividad
<i>Baja productividad primaria</i>
<i>Bajo índice de área foliar</i>
Absorción de nutrientes lenta
<i>Bajo flujo de savia</i>
<i>Baja transpiración</i>
<i>Bajas tasas de fotosíntesis (pero su capacidad no es reducida)</i>
Suelo y hojarasca diferente
<i>Alto contenido de materia orgánica en el suelo</i>
<i>Alta concentración de polifenoles en la hojarasca</i>
<i>Suelo húmedo</i>
Balance hídrico positivo
<i>Ingreso de humedad adicional por las nubes</i>
<i>Alto flujo de agua en incidentes de precipitación</i>
<i>Baja evapotranspiración y evaporación</i>

Fuente: Foster (2001).

A nivel mundial, los BN por encima de 1000 msnm cubren 48 millones de hectáreas, de las cuales, el 50% se encuentra en América Latina, presentando una buena porción en Mesoamérica México, Guatemala, Nicaragua y Honduras (Kapos et al. 2000, citado por Kappelle y Brown 2001). Zadroga (1981) manifiesta que los BN se están convirtiendo en uno de los ecosistemas forestales que desaparecen en forma más rápida por la colonización del hombre. Stadtmüller (1987) establece que las tres principales amenazas son la explotación forestal sin planificación ni manejo, el avance de la frontera agrícola que convierte e bosque en suelos de uso agropecuario y a la apertura de caminos para la construcción carreteras nuevas que atraviesan áreas boscosas.

Los BN ocurren en un rango muy amplio de precipitaciones (500- 10000 mm anuales) dentro de una amplia variación en los niveles altitudinales donde ocurren. En lugares con grandes cordilleras los BN oscilan entre 2000 a 3500 msnm y en lugares excepcionales de humedad, cercanas a la costa marina y ubicación ecuatorial tan bajo como 500 msnm (Hamilton, Juvik y Scatena, 1995 citado por Kappelle y Brown 2001).

La baja saturación atmosférica hace que el bombeo de agua del suelo a la atmósfera sea muy bajo, propiciando así condiciones pantanosas aún en lugares permeables y de pendiente pronunciada (Frangi 1983, citado por Stadtmüller 1987). Adicional a esto, las bajas temperaturas conjugadas con la altura sobre el nivel del mar, reducen la actividad biológica en el suelo y la meteorización. Se ha encontrado que los suelos de los BN son muy ácidos (pH 3,0 – 3,5) debido a que hay un lavado continuo hacia abajo (Reynders 1964, citado por Stadtmüller 1987).

2.2.1 Tipos de vegetación en el bosque nublado

Los bosques nublados presentan árboles de menor tamaño, generalmente con troncos y ramas retorcidos o tortuosos, hojas más pequeñas y coriáceas. También, estos bosques se caracterizan por presentar una proporción alta de epífitas (briófitas, líquenes y helechos) y una correspondiente reducción de las lianas leñosas (Hamilton, Juvik y Scatena, 1995 citado por Kappelle y Brown 2001). Varios autores han indicado que la distribución de los helechos o ciateacéas coincide con la distribución de los BN. Si no fuera por la presencia de esta vegetación interceptante (árboles, arbustos, epífitas, musgos y líquenes), la humedad

permanecería en la atmósfera, transformándose así a un recurso hídrico sin provecho (Kappelle y Brown 2001).

La alta presencia de epífitas se debe no a la humedad relativa que existe en un BN, sino a la presencia de precipitación horizontal. Dado que las epífitas son plantas capaces de utilizar el agua de la precipitación horizontal directamente y que estas muchas veces se encuentran en los árboles más altos, la copa de los árboles predominantes recibe mayor cantidad de precipitación horizontal (Stadmüller 1987). La cantidad, diversidad, cobertura y biomasa de esta epífitas, briófitas y líquenes aumentan a medida se aumenta en altitud (Gentry y Dodson 1987, citado por Kappelle y Brown 2001). Por ejemplo, en la reserva Monteverde en Costa Rica se han encontrado alrededor de 250 especies de epífitas vasculares en sólo 4 ha y hay más biomasa de epífitas que de hojas de hierbas y arbustos del interior del bosque (Nadkarni 1984, citado por Kappelle y Brown 2001) y al menos 27 familias de angiospermas poseen representantes epifíticos (Ingram 2000, citado por Kappelle y Brown 2001). En otro estudio llevado a cabo en Venezuela, registró que entre el 40-50% de las especies vasculares eran epífitas, incluso sobre un solo individuo de *Podocarpus* se contaron más de 60 especies de epífitas, de las cuales la mayoría eran orquídeas, bromelias, líquenes y briofitas.

En algunos BN los musgos cubren aún la superficie del suelo (Ellenberg 1975, Ashton y Brünig 1975, Grubb 1977 citado por Stadtmüller 1987). Los BN tropicales representan condiciones óptima de plantas poikilohídricas (Walter 1973, Leigh 1975 citado por Stadtmüller 1987). Las plantas poikilohídricas fueron las primeras en conquistar la Tierra ya que cuentan con la capacidad de sobrevivir a períodos alternativos de sequedad y humedad (Arriaga et al. 1999).

De acuerdo con Hamilton (2001, citado por Kappelle y Brown 2001), a medida que se realizan más investigaciones sobre BN se pone en evidencia la importancia de la diversidad biológica que se encuentra en estos bosques; sus índices son de los más altos, incluso comparándolos con la selva tropical lluviosa.

De acuerdo con Stadtmüller (1987), otro fenómeno encontrado en los BN es el endemismo, debido al efecto biogeográfico de “isla”. Por ejemplo, en Venezuela en la década de los ´80 se comenzaron estudios en el Cerro de la Neblina en donde se encontraron especies de plantas que no son encontradas en ningún otro lugar del mundo. En la región centroamericana, en el

BN Montecristo de El Salvador, este representa el único hábitat remanente para varios mamíferos que han sido exterminados en el resto de la región, o bien en la cordillera de Talamanca en Costa Rica, Kappelle (2001) encontró que entre el 30-40% de la flora es endémica de esta formación. Otro aspecto a rescatar de los BN es que a pesar de representar un porcentaje muy bajo en superficie (1% en México y 2% en Argentina), resguardan el 12% de la flora mexicana y cerca del 50% de la avifauna argentina (Luna et al. y Brown et al. 2001, citado por Kappelle y Brown 2001). Muchas veces este endemismo es la razón por la cual se logra asegurar la protección del bosque en el futuro.

2.2.2 Terminología

Los BN reciben muchas denominaciones a lo largo del mundo. En México se conoce como “bosque mesófilo de montaña”, “selva nubosa” en Guatemala, “bosque nublado” en Honduras, “nebliselva” en Nicaragua, “bosque nuboso” en Costa Rica, “bosque o selva andina” en Colombia, “selva nublada” en Venezuela, “selva tucumano boliviana” en Bolivia, hasta “yunga” en Argentina (Kappelle y Brown 2001). En El Salvador se usa a menudo el término de “bosque nebuloso” (Serrano, 1977 citado por Stadtmüller 1987). Para este estudio se utilizará el término de bosque nublado.

2.2.3 Análisis del aporte de los bosques nublados en la producción de agua y el manejo de cuencas

Al estar ubicados en la cabecera de corrientes y ríos, los bosques de montaña juegan un papel crucial en la protección de las cuencas hidrográficas. Los bosques son los estabilizadores que guardan la calidad del agua y mantienen el régimen de flujo natural de los ríos y arroyos que emanan de las cabeceras montañosas, así mismo, la erosión del suelo es minimizada por la cobertura boscosa (Bruijnzeel 2001b). Muchos estudios han demostrado que la eliminación de la cobertura forestal aumenta temporalmente los caudales de los ríos, principalmente debido a la baja en la pérdida por evapotranspiración; sin embargo, se muestra una baja drástica en los niveles de los ríos en época seca (FAO 1977; USFS 1976, citado por Zadroga 1981). Si se eliminan los BN, se pierde la masa de superficie foliar capaz de interceptar la humedad ambiental y la abundante vegetación que crece sobre las ramas y los troncos de los árboles (Roach 2001). Por lo que bajo este escenario, se considera una pérdida de precipitación horizontal, ya que esta neblina no logra condensarse al no entrar en contacto con la vegetación

y finalmente, no llega al suelo (Zadroga 1981). Además, la conversión de bosque para fines de pastoreo provoca el deterioro de la capacidad de infiltración del suelo, lo que a su vez afecta el sistema de caudal de estratos inferiores (Kappelle y Brown 2001).

La precipitación total que llega al interior del bosque se ve significativamente incrementada por el aporte adicional de neblina interceptada por la vegetación que queda disponible (Hamilton, Juvik y Scatena, 1995 citado por Kappelle y Brown 2001) comparada con los bosques que quedan debajo del promedio de la línea base de neblina (Bruijnzeel 2001b). Donde haya presencia de neblina o nubes bajas en áreas cubiertas de bosque, la humedad es interceptada por la superficie de la planta y la precipitación ocurre en forma de goteo o escurrimiento de los tallos, aún cuando no ocurran lluvias en áreas adyacentes (Zadroga 1981).

A lo largo de los años, se ha venido trabajando bajo dos hipótesis principales, siendo la primera que los bosques nublados en zonas de fuertes lluvias orográficas, por su estructura definida de pisos, su riqueza en epífitas y su gruesa capa de turba u hojarasca funcionan como mecanismo de esponja, con capacidad muy alta de retener agua y controlar su escorrentía, siendo capaces de mitigar el impacto de las lluvias torrenciales. La segunda hipótesis establece que para zonas secas o durante estaciones secas la precipitación horizontal captada por bosques nublados significa un aumento considerable en la precipitación y en los caudales de los ríos (Stadtmüller 1987). Bajo cualquiera de estas dos hipótesis, el hecho de talar los bosques es negativo para la precipitación total y el aporte a los caudales. La captación adicional de agua oscila entre 15-20% de las lluvias ordinarias en zonas húmedas (2 000-3 000 mm/año) y hasta el 50-60% en cumbres de cordilleras y zonas de menos precipitaciones (Bruijnzeel et al. 2000, citado por FAO 2005a). En ambientes de niebla o nubes bajas en estaciones o tierras secas, se han registrado adiciones del 200% y más (FAO 2005a).

Ataroff (2000), con el ánimo de entender de mejor manera la dinámica del agua en los bosques inició un proyecto de investigación desde 1996 para lograr evaluar el impacto hidrológico de sustituir el bosque por pastos en La Mucuy, Venezuela. Los resultados fueron que el 9% (309 mm) de entrada de agua es proveniente de precipitación horizontal, lo equivalente a un mes de entrada de agua adicional, pérdidas de agua por escorrentía fueron de sólo 1,4%, dejando el 42% para la infiltración y recarga acuífera. Consecuentemente, se espera que a largo plazo el agua superficial y subsuperficial que es el que alimenta el caudal base de los ríos, será mayor

en bosque que en pastizales. Otro estudio realizado en el Cerro Uyuca, Honduras, se encontró que la cantidad de lluvia fue de 1468,5 mm, pero obtuvo como resultado que el promedio de las mediciones en los tres sitios de toma de datos fue de 1922,1 mm (31% más) (Stadtmüller y Agudelo, 1990).

Finalmente, Zadroga (1981) resume en tres componentes principales la importancia de evaluar el efecto del BN sobre la hidrología de la cuenca:

- Incremento de la precipitación neta debido al aporte de la precipitación horizontal
- Disminución de la tasa de evapotranspiración
- Regulación del régimen hídrico, especialmente durante los períodos más secos gracias al efecto esponja

En la misma línea de pensamiento, Ataroff (2000) señala que la conversión de bosques de montaña a pastizales o cualquier cultivo agrícola es la causa de importantes impactos a ríos y quebradas. En general, como es de esperarse el caudal de ríos es mayor durante e inmediatamente después de un evento de fuerte precipitación cuando una buena parte de la cuenca se encuentra deforestada. Una vez el evento ha terminado, el caudal se reduce a una tasa muy alta y eventualmente puede llegar a cesar de correr agua después de una cierta cantidad de tiempo cuando no hay lluvias. Este efecto puede ser más intenso a medida que el área deforestada aumenta. Durante los períodos secos en zonas húmedas y en lugares con poca lluvia, pero con nubes bajas frecuentes, llega a ser particularmente importante la captación de la humedad de la neblina empujada por el viento, por parte de la vegetación, hasta el punto de ser una fuente confiable en épocas secas (Bruijnzeel 2001b).

En el futuro, al aporte adicional de agua de la condensación en zonas montañosas jugará un rol importante en lo que respecta a la vegetación de la zona. Por esta razón, se espera un cambio de enfoque en función del rol que juega la vegetación como almacenamiento de agua condensada, así como su interacción con la evaporación y transpiración (Jong 2005).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del área de estudio

El presente estudio se realizó entre las coordenadas geográficas $89^{\circ}06'22''$ y $89^{\circ}07'30''$ longitud Oeste y $14^{\circ}22'11''$ y $14^{\circ}23'07''$ latitud Norte. Los 3 sitios escogidos para la toma de datos se ubicaron en la zona media del cerro El Pital, entre los 2000 y 2300 msnm. Ubicándose en la región fronteriza del oriente de El Salvador, el sureste de Guatemala y el occidente de Honduras. Puntualmente, el estudio se encuentra en el municipio de San Ignacio, Chalatenango, departamento que se ubica en la parte norte del territorio salvadoreño, fronterizo con Honduras y separado de este por el río Sumpul.

El primer sitio de toma de datos se ubica en -89.1026 y 14.38447 en el barrio Los Romero, caserío El Centro a 2090 msnm, el segundo sitio se encuentra en -89.10726 y 13.36885 en el barrio Milingo, caserío Las Pilas a 2170 msnm y el último sitio se encuentra en -89.12555 y 14.37262 en el barrio Río Chiquito, caserío El Pital, siendo este el de mayor altitud a 2330 msnm (Figura 2).

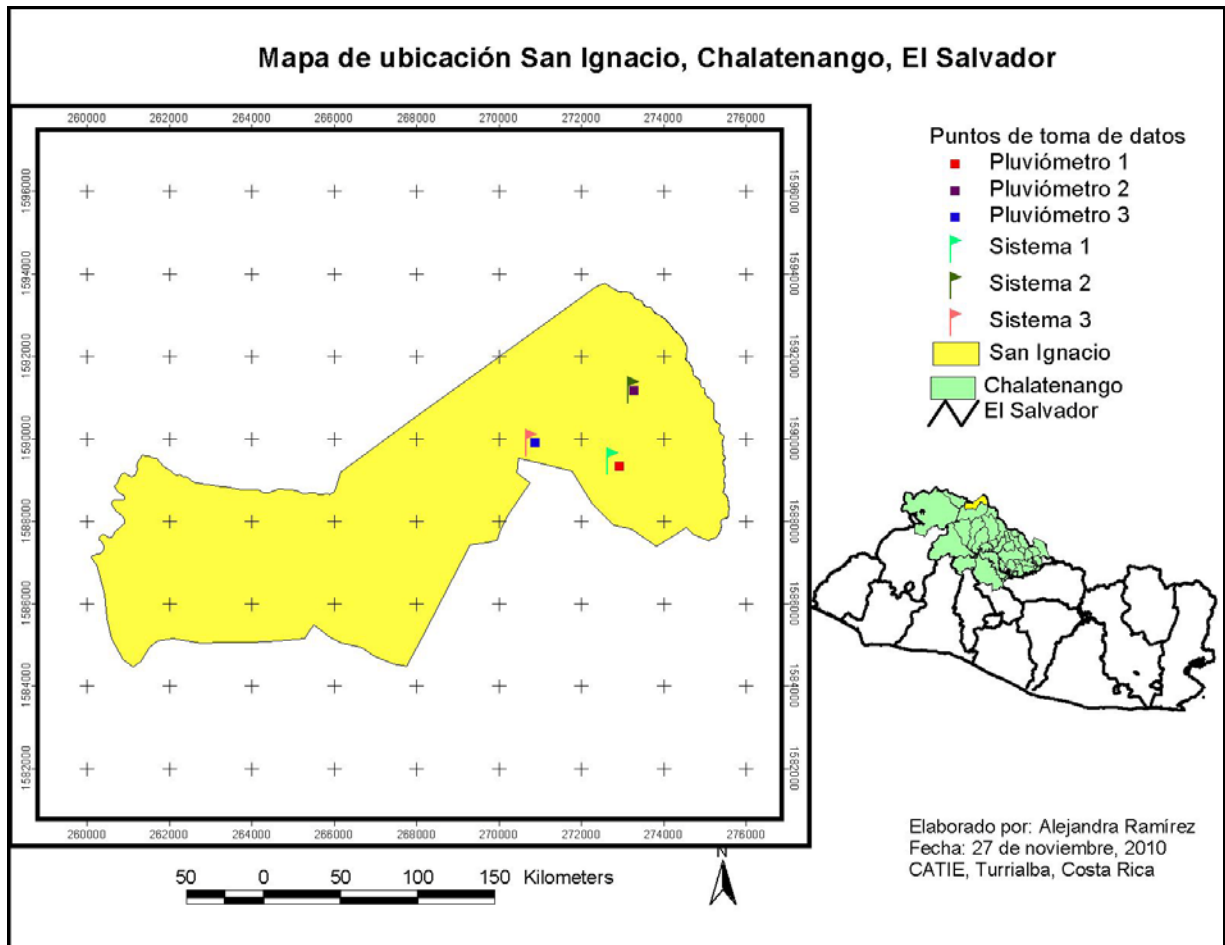


Figura 2. Mapa de ubicación San Ignacio, Chalatenango, El Salvador

3.2 Características físicas y socioeconómicas de la zona de estudio

3.2.1 Zonas de vida

La vegetación es un elemento fundamental en la protección del suelo y factor importante del comportamiento hidrológico de un área, por lo que es de interés conocer las comunidades vegetales que ocupan el área de estudio y cuál es la vegetación potencial que le corresponde al área. Según el sistema de zonas de vida de Holdridge (1978), los bosques nublados como asociación atmosférica muy húmeda predominan en las zonas de vida desde bosque húmedo a bosque pluvial de los pisos Premontano a Montano Bajo.

En la zona de estudio se encuentran cuatro zonas de vida, bosque húmedo subtropical (bh-S), bosque muy húmedo subtropical transición a húmedo (bmh-S), bosque muy húmedo montano

subtropical (Bmh-MS) y bosque muy húmedo montano bajo subtropical (bmh-MBS), por efectos del estudio se describirán los últimos dos.

La zona de vida Bmh-MS tiene una importancia excepcional por ser única en el país y amerita un tratamiento cuidadoso propio de un área de protección. Su temperatura anual oscila entre 6 y 12 °C, lo que limita la evapotranspiración anual a la cuarta parte (máximo la mitad) de sus precipitaciones, que oscilan entre 1000 y 2000 mm promedio anual, lo que provoca que el ambiente se mantenga húmedo la mayor parte del año. La vegetación es de pinares, bosque nublado y la mayor concentración de gimnospermas de la región. Entre las especies existentes se encuentran *Pinus ayacahite*, *Abies religiosa* y *Taxus globosa*; también orquídeas, bromeliáceas, líquenes y musgos. El bosque es de apariencia alto, con una alta densidad de árboles a menudo deformados por los fuertes vientos a que están sometidos. Lo sobresaliente a nivel nacional, es que constituye una de las últimas áreas con cantidad relativamente alta de cobertura forestal del país (COSUDE 2003).

La zona de vida bmh-MBS está presente en terrenos con altitudes que van desde 1300 a 2400 msnm. Se caracteriza por tener una alta humedad relativa que conserva todo el año, por la presencia de nubosidad abundante. El promedio de precipitación oscila entre los 2000 y los 3500 mm de lluvia al año. Sus características favorecen la presencia de un diverso conjunto de comunidades vegetales como los robledales, encinares, pinares y bosque de pino roble y bosques nublados de cordillera. En esta zona es donde se localiza la mayor masa forestal del área, con bosques de pino y ciprés, especialmente en las cabeceras de las microcuencas. Sin embargo, la cobertura vegetal ha sido sustituida en grandes extensiones por cultivos de subsistencia, pastos y cafetales. Su ubicación en el rango de altura donde las nubes chocan con la superficie del suelo produce mucha agua que aumenta progresivamente con más altura de la vegetación. Se encuentran asociaciones de encinares y pinares, así como una conocida como bosque nublado, cuya característica más importante es la presencia de una gran cantidad de epífitas y musgos. Se encuentra la especie nativa de El Salvador, *Cupressus lusitanica* (ciprés), que aún queda un pequeño rodal en la cercanía del cerro El Pital.

En los sitios de toma de datos se encontraron las especies antes mencionadas características de estas zonas de vida. El primer sitio, Los Romero, presenta una densidad de 1080 árboles/ha; entre las especies de árboles encontradas se encuentran el *Micomía orguentea*, *Pinus oocarpa*

y *Abies guatemalensis*, siendo esta última de la mayor presencia en el sitio. El segundo sitio de toma de datos que se ubica en Milingo presenta una densidad de 580 árboles/ha; entre las especies encontradas se encuentran el *Pinus oocarpa* y *Pinus caribea*, siendo esta última de la mayor presencia en el sitio. El último sitio de toma de datos se ubica en Río Chiquito presenta una densidad de 2080 árboles/ha; presentando una mayor diversidad de especies en comparación a los demás sitios, entre las especies encontradas se encuentran el *Abies guatemalensis*, *Pinus oocarpa*, *Pinus patula* y *Quercus sapotefolia liebm*, siendo la primera la de mayor presencia en el sitio. Esta mayor diversidad se le atribuye a la mayor altitud, topografía accidentada y también a la dificultad de acceso al sitio, permitiendo así una mayor regeneración de las especies nativas. Las especies encontradas se presentan a continuación en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Especies vegetales encontradas en la zona de estudio

<i>Especies</i>	<i>Nombre común</i>	<i>Los Romero</i>	<i>Milingo</i>	<i>Río Chiquito</i>
<i>Micomía orguentea</i>	Cirín	3		1
<i>Abies guatemalensis</i>	Pinabete	29		64
<i>Persea schiedeana</i> Nees	Chucte de montaña	1		
	Palo de vara	2		
	Roble	1		4
	Trompillo	7		
<i>Pinus oocarpa</i>	Ocote	4	2	5
	Hoja aserrada	1		
	Cero	1		
<i>Pinus caribea</i>	Pino rojo		20	
<i>Pinus patula</i>	Pino colorado			2
<i>Cupressus lusitanica</i>	Ciprés			10
	Cereto			2
<i>Clethra vicentina</i>	Asarajillo			2
	Duraznillo			
<i>Quercus sapotefolia liebm</i>	Encino			5
	Mecate			1
<i>Eugenia pachyclamys</i>	Guacuco			1

3.2.2 *Clima*

El Salvador, por su ubicación geográfica, se ve influenciado principalmente por los vientos del noreste y ocasionalmente por nortes rafagosos, que traen aire fresco originado en regiones

polares de Norteamérica. Según la altura en msnm, se distinguen tres zonas térmicas (de 0 a 800 m, 800 a 1200 m y de 1200 a 2700 m). La tercera zona presenta temperaturas que van de los 20 a 16 °C en planicies altas y valles, de 21 a 19 °C en faldas de montañas y de 16 a 10 °C en valles y hondonadas sobre 1800 m (SNET 2009). La zona de estudio cae dentro de esta zona y llega a alcanzar temperaturas entre los 10 y 16 °C (Martínez 2006), por lo que posee un clima templado. Las temperaturas de la estación meteorológica de Las Pilas de SNET oscilan entre una máxima promedio de 22,7 °C y una mínima de 14,6 °C, resultando una media de 16,8 °C, con base en registros de 1999 – 2008 (SNET 2009).

A pesar de no contar con información específicamente para la zona de estudio, se pueden mencionar las características del viento que presenta la zona norte salvadoreña en general para los meses de estudio. Los vientos predominantes en el mes de octubre tienen una dirección de norte a noroeste, provenientes del Pacífico, con inicios de vientos del norte moderados de 10 a 30 km/h. Para el mes de noviembre, los vientos provenientes del sur disminuyen en gran medida para dar paso a los Nortes que vienen asociados a los frentes fríos (Zarate 2005) con una velocidad que puede llegar a alcanzar los 100 km/h. Para los meses de diciembre a febrero los vientos del Pacífico disminuyen casi por completo y son los nortes los que azotan la zona (SNET 2006). Enero es el mes con más frentes fríos, seguido de diciembre y son estos dos meses, en los que reúne el 57% total de frentes fríos provenientes del Caribe para el período seco en El Salvador (Zárate 2005). Para el mes de marzo, los Nortes comienzan a disiparse para dar paso a los vientos provenientes del Pacífico, que a su vez da paso al tiempo de transición de época seca a época lluviosa

3.2.3 Precipitación

De acuerdo con la estación meteorológica de SNET Las Pilas, la precipitación media anual es de 1618 mm. La época seca comprende desde mediados de octubre a marzo y la época lluviosa los meses de abril a septiembre. Por ser una zona montañosa y contar con el punto más alto del país, esta zona cae dentro del rango inferior de pérdidas de agua por evapotranspiración. La evapotranspiración para esta zona es de menos de 1250 mm/año.

3.2.4 Topografía y relieve

El relieve es un elemento importante para el análisis de los procesos de estabilidad de los suelos, ya que determina en gran medida el comportamiento del agua y la formación y evolución de suelos en un territorio.

La zona de estudio de relieves jóvenes, se encuentra a una altitud entre 995- 2730 msnm. En esta zona la topografía es muy quebrada, con pendientes mayores al 50%, con valles con morfología en “V” bien pronunciada, lo que combinado con las características geológicas propias da lugar a una zona inestable, en proceso reestabilización y altamente sensibles a procesos erosivos, por lo cual existen derrumbes de terreno (COSUDE 2003).

3.2.5 Geología y suelos

Son suelos propicios para las plantaciones de tipo permanentes (frutales y bosque) y áreas de interés natural, que junto con las fuertes pendientes aumenta notablemente las condiciones de vulnerabilidad por las prácticas de cultivo inadecuadas. En general son suelos pedregosos jóvenes, se desarrollan sobre rocas del terciario superior, concretamente sobre lava y tobas volcánicas básicas e intermedias en las partes altas y sobre lavas ácidas en las partes medias y bajas (COSUDE 2003).

3.2.6 Uso actual del suelo y manejo de los recursos naturales

Por su ubicación geográfica y altitud, la topografía quebrada con pendientes muy elevadas y la presencia de suelos poco desarrollados es poco apta para el desarrollo de cultivos intensivos. Estas características determinan que la vocación del suelo en la zona sea eminentemente forestal y para la plantación de cultivos permanentes (frutales, bosques y praderas) o de vegetación permanente de protección (reservas naturales de bosque). En las áreas de cultivos predomina el cultivo de repollo, seguido de papa, maíz, frijol, tomates, chile y café. En más de la mitad de la extensión ocupada para cultivos no se aplican técnicas de conservación de suelos y persisten prácticas de manejo deteriorantes de los suelos y mal manejo del agua (COSUDE 2003).

3.2.6.1 Recursos hídricos

El agua de precipitación llega al suelo en un porcentaje muy elevado por escorrentía superficial y tan sólo una pequeña parte de esta llega a infiltrar. Según la ANDA (Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados) el rango de infiltración del agua en el subsuelo es de entre 0 y 10%. Por tanto, considerando las zonas de recarga y el tipo de acuíferos rocosos existentes a través de las fracturas, el agua fluye hacia niveles inferiores siguiendo caminos preferenciales de acuerdo con la conexión entre fracturas (1995, citado por COSUDE 2003). La existencia de estos caminos preferenciales de circulación hídrica subterránea provoca que los acuíferos sean de repuesta rápida, es decir que estos se saturan rápidamente descargando sus aguas posiblemente al poco tiempo de que esta haya infiltrado. Se ha podido observar que en los períodos de alta intensidad de lluvia, aumenta el número de manantiales y el caudal de los mismos (COSUDE 2003).

Existen alrededor de 29 manantiales permanentes en el municipio de San Ignacio. La zona de estudio corresponde a la cuenca del Río Lempa, la cual se divide en las subcuencas De Tiano, Grande de Chalatenango, La Quebradota, Marchala, Metayate, Nunuapa, Sapuapa, Sinuapa y Sumpul, siendo esta última la de interés para este estudio (Figura 3). Es de estos manantiales que el Proyecto de Riego Sostenible para la Producción de Hortalizas para el Mercado Nacional se abastece para los proveer de agua para riego a alrededor de 200 familias de pequeños productores.

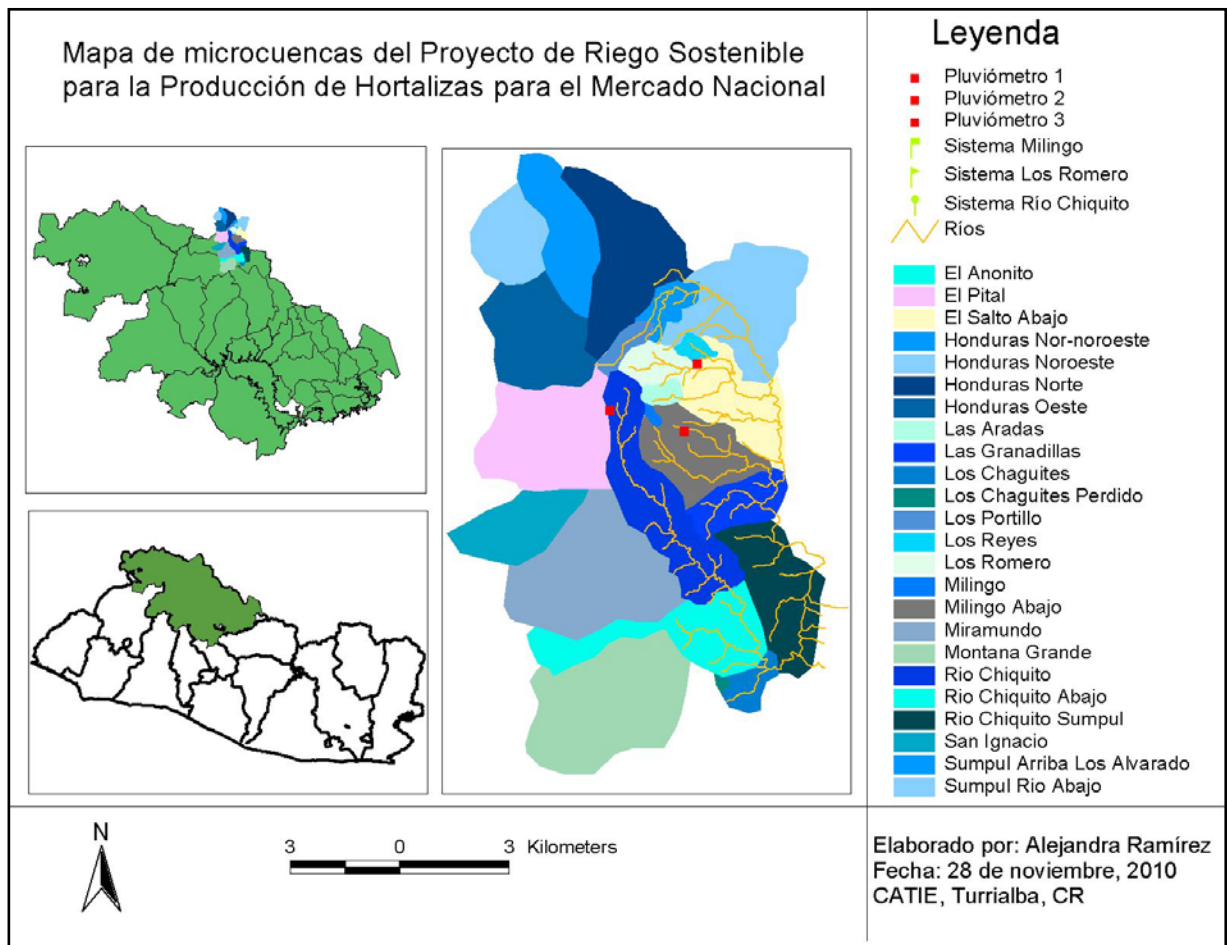


Figura 3. Microcuencas del Proyecto de Riego Sostenible para la Producción de Hortalizas para el Mercado Nacional.

3.2.7 Características socioeconómicas

El municipio de San Ignacio cuenta con una población de 10178 habitantes, de los cuales, 1643 (16%) viven en la zona urbana y 8535 (84%) en la zona rural (COSUDE 2003). Este territorio, por sus características geográficas y su ubicación fronteriza, fue uno de los más afectados con el conflicto armado que sufrió el país en la década de los 80. Esto provocó el desplazamiento de muchas personas de los cantones hacia la ciudad buscando refugio. Esto trajo repercusiones sociales y ambientales. Se incrementó la pobreza y por ende, hubo una disminución notable en el nivel de calidad de vida de la población, traduciéndose en el agotamiento acelerado de los recursos naturales.

La producción de hortalizas en los municipios de San Ignacio y su vecino La Palma, es la más importante de la región Trifinio salvadoreña. Se estima que hay unos 2500 productores hortícolas, los cuales siembran principalmente 400 mz/ciclo de repollo, 490 mz/ ciclo de papa, 120 mz/ciclo de tomate, 65 mz/ciclo de chile dulce, en dos o tres ciclos por año. Además de la agricultura otra fuente de ingresos de los pobladores, debido a las características climáticas y topográficas de la zona, es el turismo de montaña.

3.3 Metodología aplicada para la medición de precipitación horizontal del dosel

Se realizó una primera visita a la zona de estudio en donde se hizo un reconocimiento rápido para escoger posibles sitios de recolección de datos, los cuales posteriormente se analizaron y escogieron los más adecuados. En este estudio el método utilizado fue el primero de los presentados por Juvik y Ekern (1978) por presentar valores reales de precipitación neta, la cual a nivel ecológico e hidrológico es relevante para la zona de estudio. Se colocaron tres canoas bajo cada árbol para capturar el agua que cae del dosel. Se determinó que el área de cada pluviómetro horizontal era de 2032 cm², dato que fue producto de multiplicar el ancho (10,16 cm) por el largo de la canoa (200 cm), dando como resultado centímetros cuadrados. Cada canoa se cubrió con una malla de ½” para evitar que objetos, en especial hojas de árboles, caigan dentro de la canoa, interrumpiendo así el flujo del agua (Figura 3). Así mismo, al final de cada canoa se conectó una manguera que se conecta con las otras mangueras para drenar su agua a un sólo recipiente.



Figura 4. Pluviómetro horizontal o canoa utilizada.

El agua recibida en el recipiente se midió diariamente en un cilindro graduado durante el período seco de esta zona (entre los meses de octubre a marzo) en horas de la mañana, aproximadamente a la hora de la salida del sol, para evitar la evaporación del agua provocada por el aumento en la temperatura del ambiente. Se midió durante este tiempo por dos principales razones; la primera razón, es que anteriores investigaciones han concluido que el mayor error de medición encontrado en estos estudios es durante la época lluviosa, dado que es muy difícil separar la cantidad de agua que fue aportada por la lluvia de la que es aportada por la precipitación horizontal. En segundo lugar, la mayor preocupación por el suministro del agua es en la época seca, por lo que es indispensable conocer la cantidad y las fuentes de agua durante esta época. Sin embargo, aún cuando se llama época seca, durante este período en algún momento llueve, por lo que se decidió colocar un pluviómetro en un sitio despejado y cercano al bosque donde se instaló el sistema de recolección de agua para así poder sacar por

diferencia el agua que ese día fue aportada por lluvia y la que fue aportada por precipitación horizontal.

Tomando los datos de los pluviómetros ubicados en las partes cercanas a los sitios con canoas que no presentan bosque, este método permite calcular el aporte real de la precipitación horizontal a la precipitación total. Los limitantes que presenta este método es que puede llegar a ser costoso, tomando en cuenta los pluviómetros y demás instrumentos a instalar y la dificultad de encontrar un lugar que sea representativo de toda el área a estudiar (Stadmüller 1987).

3.4 Metodología aplicada para la medición de precipitación horizontal escurrida por el tronco

Para medir el agua que escurre por el tronco del árbol, se colocó en forma espiral alrededor del tronco una manguera plástica (1" de diámetro) que fue cortada por mitad para que el agua pudiera ingresar (Figura 4). Antes de colocar la manguera se limpió el tronco lo más que se pudo de cualquier material que no permita fluir el agua. Una vez colocada la manguera se aseguró que no existieran espacios entre la manguera y el tronco con silicón. Esta manguera estaba conectada con un recipiente aparte del de las canoas. En varios estudios, Manokaran 1979; Keizer 2002; Bryant et al. 2005, entre otros, se ha utilizado el anillo alrededor del tronco como metodología de recolección de agua de escurrimiento de tronco mencionando la dificultad de que existe en la medición de árboles con corteza muy rugosa, como es el caso del pino. Es por eso que se prestó especial atención en la instalación de sellar cualquier agujero que quedara entre la manguera y las grietas que se forman en la corteza de los pinos. Estos agujeros sellados por silicón eran recubiertos periódicamente con este mismo material debido a que ocurría un desgaste y desprendimiento por la humedad que recibía el árbol. El agua recibida en el recipiente final era medida diariamente al igual que el de las canoas.



Figura 5. Manguera para recolección de escurrimiento del tronco

El sistema de recolección de agua (canaos y mangueras) se colocó en tres sitios que fueron escogidos con tres restricciones principales. La primera era que fuera un bosque que evidencia presencia de neblina, por ejemplo, epífitas y musgo en los troncos de los árboles; la segunda, es que estuviera cerca de alguna casa para efectos de seguridad del sistema y facilidad de toma de datos; y tercero, que estuvieran a diferentes altitudes para así poder definir los límites del estudio y contar con diferentes condiciones. A continuación se presentan dos esquemas que muestran el sistema en su conjunto (Figura 5 y 6).

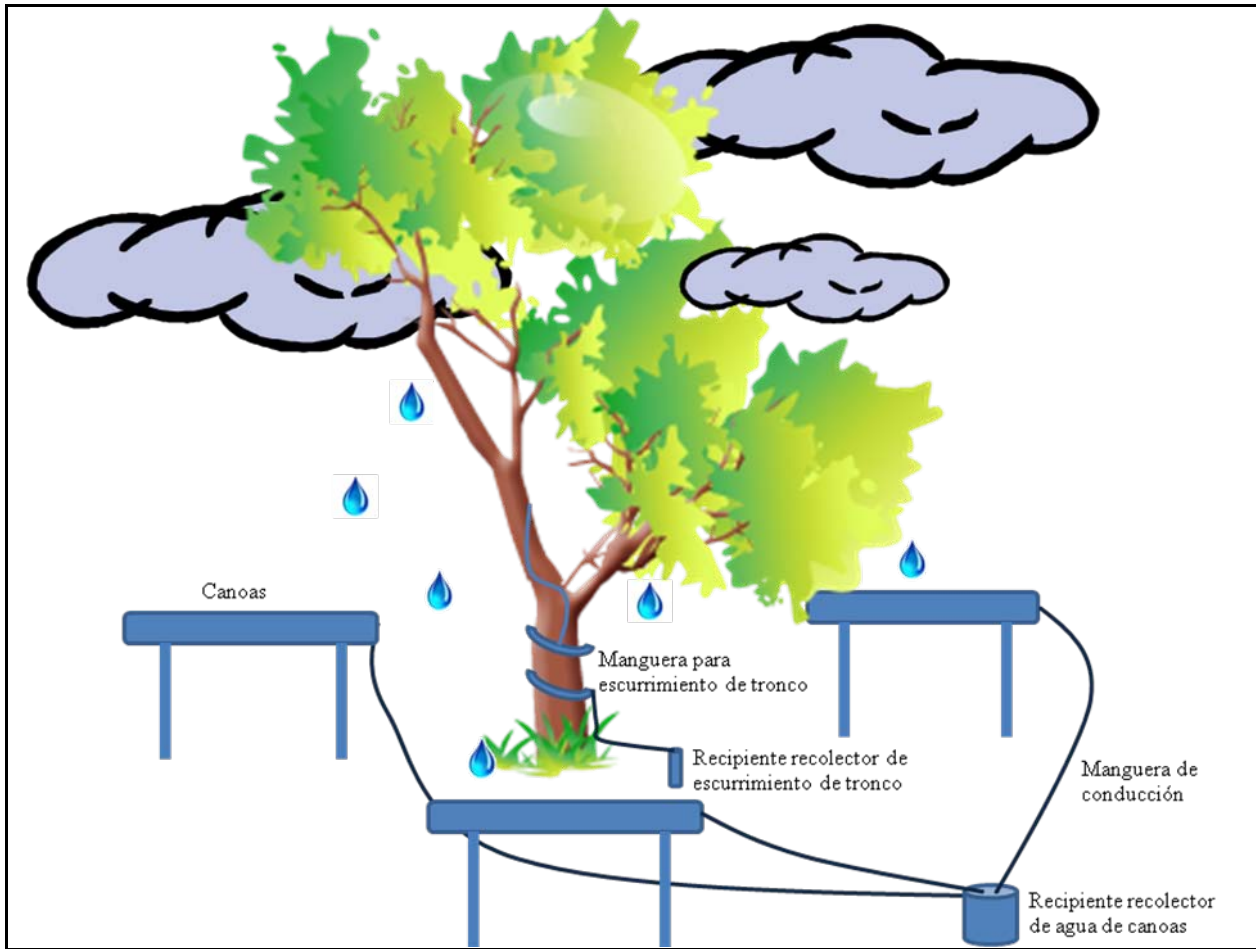


Figura 6. Esquema de sistema de recolección de precipitación horizontal, vista frontal

3.5 Metodología de verificación

Como se ha venido exponiendo desde el inicio de este documento, no existe una única metodología de medición de precipitación horizontal, dependiendo del método empleado así será el tipo y magnitud del error. En este caso con el ánimo de verificar si los sistemas son representativos de lo que sucede en el bosque a esa altitud, se escogieron parcelas de 3×3 m, las cuales se cubrieron horizontalmente por completo de plástico por sobre el suelo (Figura 7). Este plástico se colocó en cuatro lugares alrededor del sistema de canoas por 10 días en cada lugar. De esta manera se recolectó toda el agua que cayera en esa área y se compararon con los datos generados en el sistema principal para confirmar su precisión en la recolección de datos.

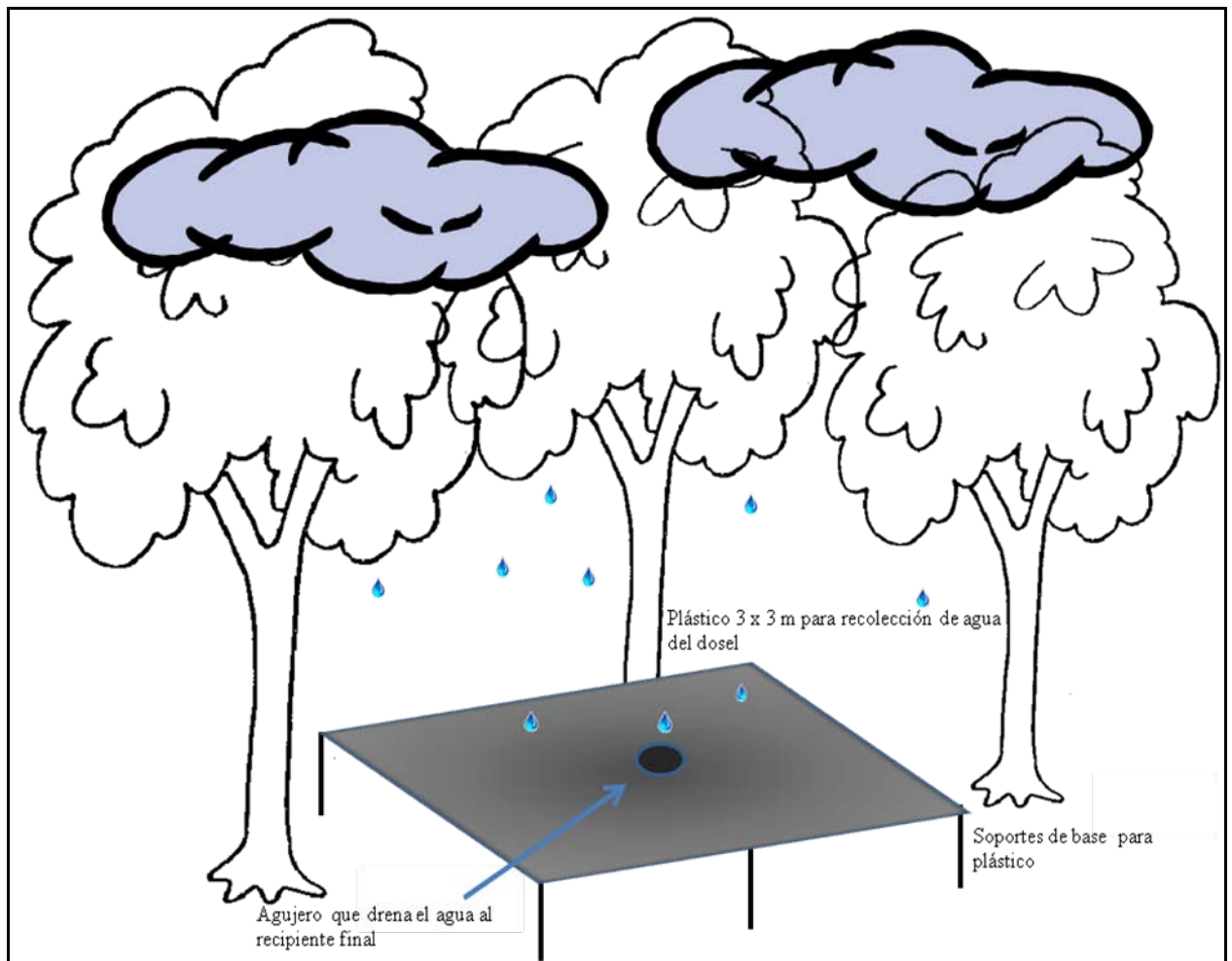


Figura 7. Dibujo de plástico con vista frontal

3.6 Cálculo del agua aportada por precipitación horizontal

3.6.1 Precipitación vertical

En cada sitio de toma de datos se colocó un pluviómetro en una zona despejada más próxima al lugar donde se instaló el sistema de canoas. Los pluviómetros utilizados fueron de lectura directa, donde diariamente el encargado tomaba nota de lo registrado en el pluviómetro; no se contó con pluviómetros registradores para este estudio. Con los datos de estos pluviómetros se sacó un promedio mensual para cada sitio y se respaldó con los datos de la estación meteorológica en Las Pilas para efectos de corroboración. Esta estación pertenece al Proyecto

de Riego Sostenible para la Producción de Hortalizas para el Mercado Nacional que está siendo ejecutado por CATIE con financiamiento de Fondos del Milenio.

3.6.2 Cálculo de porcentaje de agua aportada por precipitación horizontal

Con el propósito de disminuir al máximo el error en el cálculo del porcentaje de agua aportada por precipitación horizontal con respecto a la precipitación total, se tomaron en cuenta únicamente los días en los que no hubo lluvia. Tomando en cuenta solamente los días en que el pluviómetro ubicado fuera del bosque no registró precipitación alguna, se procedió a hacer una suma de los registros de las canoas y mangueras en esos días y se sacaron los datos por cada mes para el área cubierta (6096 cm²). El volumen del agua recolectada en los recipientes era medido en las unidades de mililitros con una probeta, por lo que se obtenía mL/cm². Tomando en cuenta que un milímetro (mm) de altura de agua equivale a un litro por metro cuadrado (L/m²), se obtuvo finalmente la cantidad de agua en milímetros.

3.7 Cálculo de balance hídrico climático

Con el ánimo de ver el verdadero aporte de la neblina sobre la dinámica del agua en esta zona, se calculó el balance hídrico climático para uno de los sitios estudiados, pero se escogió Milingo porque de los tres sitios, es el que se encuentra más cerca de la estación meteorológica de SNET. Esta estación cuenta con información diaria de temperatura y precipitación de los últimos diez años. El balance hídrico calculado fue el de Thornthwaite, que toma en cuenta registros de precipitación de los meses medidos, temperatura media y ubicación del sitio. El balance hídrico se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$BH = \text{Entradas} - \text{Salidas}$$

donde la única entrada será la precipitación (P) y las salidas serán la evapotranspiración (EVT) y la intercepción (I), quedando así la fórmula:

$$\text{Exceso/ déficit} = P - \text{EVT} - I$$

De esta manera se podrá calcular cuánta agua queda disponible del total que entra en forma de precipitación, después de cubrir los gastos que tiene el bosque por evapotranspiración y las pérdidas por intercepción. La evapotranspiración se define como la cantidad total de agua que

se transfiere en forma de vapor a la atmósfera de los procesos de evaporación y transpiración (Villón 2002). La evaporación es la pérdida de agua que queda atrapada en las hojas, ramas y tronco y desde la superficie del suelo (UNAM s.f.), mientras que la transpiración es el resultado del proceso físico biológico por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, a través del metabolismo de las plantas y que finalmente pasa a la atmósfera (Segeber et al. 2006). La evaporación depende del poder evaporante de la atmósfera, que a su vez depende de la radiación solar, humedad (a menor humedad mayor evaporación), presión atmosférica y altitud (a menor presión y/o mayor altitud mayor evaporación) y del viento (más viento más evaporación). Mientras que la transpiración está en función del mismo poder evaporante de la atmósfera, grado de humedad del suelo, tipo de planta y las variaciones estacionales (Sánchez, sf).

Para el cálculo de la precipitación se utilizaron los registros del pluviómetro ubicado en una zona despejada en Milingo. La evapotranspiración se obtuvo con el método de Thornthwaite el cual necesita ser alimentado por la temperatura media mensual, datos que utilizamos de la estación meteorológica de SNET, ubicada en Las Pilas, a 2,5 km de distancia a una elevación muy parecida a la de Milingo (1960 msnm) y el factor de corrección para los 15 grados de latitud Norte, a la cual pertenece la zona de estudio. Este dato de EVT se calculó para cada mes de la época seca; se hizo primero utilizando solamente el promedio de precipitación, EVT e interceptación y luego se calculó la EVT incluyendo el aporte adicional de la neblina.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Metodología, equipo y resultados de medición de la precipitación horizontal en coberturas boscosas

En áreas con cubierta vegetal, el agua precipitada puede ser interceptada o caer al suelo. De la porción interceptada el agua queda retenida en las grietas de la corteza o en la superficie de las hojas. El agua que llega al suelo, llega en dos formas, la mayor es por “throughfall” o lluvia efectiva (TF) y una minoría por escurrimiento del tronco (SF). Estudios sobre la distribución de lluvia efectiva y escurrimiento del tronco han sido llevados a cabo en bosques naturales, plantaciones forestales, árboles individuales (solitarios), en cultivos agrícolas y pastos. Los resultados de las áreas forestadas han sido complicados con grados de variabilidad de éxito. A continuación se presentan el cuadro 3,4 y 5 a manera de ejemplos de diferentes metodologías y resultados obtenidos en estos estudios antes mencionados.

Cuadro 3. Estudios de medición de lluvia efectiva

Lugar	Vegetación	Método	% de ppt	Año de toma de datos	Investigador
Kade, Ghana	Bosque húmedo tropical	Pluviómetro	85	1958	Nye
Malasia	Bosque lluvioso tropical	Plastic aquaria	78	1973	Manokaran, N.
Manaus, Brasil	Reserva forestal	Pluviómetro	91	1983	Lloyd
Turrialba, Costa Rica	Sistema agroforestal Café – Poró	Pluviómetro plástico	84	1985	Jiménez
Villamills, Costa Rica	Sistema agroforestal Café – Laurel	Pluviómetro plástico	92	1995	Turcios
	Bosque primario	Pluviómetro lineal	66		
Colombia	Café con sombra	Pluviómetro de vidrio	45,1*	1999	Jaramillo y Cháves
México	<i>Acacia berlandieri</i> (huajillo)	Pluviómetros horizontales	82	1999	Cantú; González
	<i>Acacia rigidula</i> (chaparro prieto)	Pluviómetros horizontales	85		
	<i>Diospyros texana</i>	Pluviómetros	78		

	(chapote)	horizontales			
Georgia, USA	Humedal	Colectores de TF y pluviómetros	82	2001	Bryant, Bhat y Jacobs
	Bosque de pino		77		
	Plantación de pino		80		
	Hardwood		82		
	Bosque mixto		81		
Hawaii, USA	Bosque	Pluviómetros horizontales	64	2009	

*milímetros

Nye (1961) trabajó en un bosque secundario húmedo tropical midiendo TF. Para esto utilizó pluviómetros de cobre dentro del bosque y en claros de bosque los cuales se leían semanalmente para luego leerlos diariamente. Nye no mencionó en el documento complicaciones con la metodología utilizada.

El área de estudio en Malasia fue de 650 ha de bosque primario entre 75 y 120 msnm, que caen dentro de las 2°58,4' y 2°59,6' N y 102°16,9 y 102°19,8 E. La parcela experimental fue de 10 m x 10 m donde se colocaron recipientes plásticos para la recolección de agua. Una de las observaciones hechas en este estudio fue el hecho que en lluvias de bajo intensidad y corta duración no ocurrió TF. Entre los factores que Manokaran no evaluó, pero menciona que afectan TF, están la humedad de la copa que va desde completamente seca hasta completamente saturada; la temperatura, humedad y velocidad del viento que podrían afectar la tasa de evaporación durante y después de la lluvia; y el tiempo que transcurre entre dos lluvias consecutivas. En Malasia TF ocurrió 141 de 166 días de lluvia y el porcentaje de TF por evento de lluvia anduvo entre el 0 y 99%, mientras que el promedio mensual fue entre 65 y 95%, dejando un anual de 78% (Manokaran 1979).

Lloyd (1988), para el período de septiembre 1983 a agosto 1985, montó un experimento donde se buscaba medir la variabilidad espacial de TF y SF. El sitio experimental estuvo en 2°57'S y 59°57'W en la Reserva Forestal Ducke en Manaus, Amazonía, Brasil. Este estudio no tomó en cuenta el tamaño de los eventos de lluvia. El cálculo de TF se hizo mediante la resta del agua registrada en los pluviómetros ubicados en torres de 45 y 25 m de alto menos el agua recogida en pluviómetros manuales. El resultado final fue que el 91% de la lluvia incidente llega al suelo.

Para el período entre julio 1985 y enero 1986, Jiménez (1986) llevó a cabo una investigación para determinar cuantitativamente los componentes del balance hídrico. Como parte de esta investigación evaluó el agua que ingresa y cae al suelo en dos sistemas agroforestales, café-poró y café-laurel. El estudio se llevó a cabo entre las coordenadas geográficas 9°53' N y 82°38' O a una elevación de 602 msnm. En esta investigación el agua incidente se midió con dos pluviómetros plásticos ubicados en parcelas adyacentes a las parcelas de interés libres de obstáculos; para el TF, de igual manera se utilizaron pluviómetros plásticos ubicados a 40 cm del suelo para evitar el efecto de salpique de las gotas e interferencia del viento. Los resultados fueron de 84% del agua llega al suelo en el sistema café-poró y 92,5% en el sistema café-laurel. Estos datos se obtuvieron por la diferencia de agua encontrada en los pluviómetros dentro del sistema agroforestal y los pluviómetros ubicados en zonas libres de árboles.

Siguiendo en Costa Rica; Turcios (1995), en el área experimental Villa Mills Siberia, ubicada en la cordillera de Talamanca, entre 2600 y 2800 msnm, colocó pluviógrafos lineales, al azar, dentro del bosque y un pluviógrafo con banda semanal, pluviómetro horizontal y un recipiente con la misma cantidad de recepción que el pluviógrafo en una zona libre de obstáculos, para medir el porcentaje de agua que entra al ecosistema como TF. El pluviómetro lineal fue construido de láminas de zinc y con ese mismo material se adhirieron plantillas al tronco con clavos y tapa goteras para que el agua que escurre por el tronco drene a un recipiente final. Los bosques tenían las características de ser: a) bosque primario, sin intervención, con 0% de extracción de área basal; b) un bosque primario con 20% de extracción y c) uno con 30% de extracción. De estos los bosques con 20% y 30% de intervención presentaron en promedio cantidades iguales de agua que llegan al suelo, 75,8% y 74,6% de la precipitación incidente.

Jaramillo y Cháves (1999) utilizaron tres parcelas localizadas en Colombia, a 05°00' N, 75°36' O y 1425 msnm. Una parcela estaba conformada por un bosque húmedo multiestrato con intervención humana dentro de una reserva natural, una parcela de café bajo sombra de guamo (*Inga sp*) y una tercera parcela de café a libre exposición solar. Se midió la lluvia que ingresa al ecosistema con un pluviógrafo tipo Hellman y TF con pluviómetros de vidrio. La conclusión final de este estudio fue que la cantidad de lluvia efectiva se explica por el tipo de cobertura e intensidad de lluvia. A menos follaje, son mayores los valores de TF; en este caso el café sin sombra presentó 69,1 mm, seguido del bosque con 61 mm y con el menor valor está el café con sombra 45,1 mm. Las tres coberturas se comportaron de manera similar hasta

precipitaciones de 50 mm, a partir de este valor se visualizaba la influencia de la cobertura sobre la lluvia efectiva.

Con la finalidad de investigar el comportamiento de la intercepción de la lluvia en matorrales, se llevaron a cabo mediciones de la precipitación incidente y TF directa en tres especies de arbustos representativos y de importancia silvopastoril del matorral submontano de México, *Acacia berlandieri* (huajillo), *Acacia rigidula* (chaparro prieto) y *Diospyros texana* (chapote). El estudio se llevó a cabo en el Área Experimental de Matorral de la Universidad Autónoma de Nuevo León localizada en 24°47' N y 99°32' O, a una altitud de 350 msnm. Una parcela fue seleccionada de cada especie y fueron instaladas canaletas con una forma de U fijas a una altura de 1m y en una parcela adyacente sin vegetación se instalaron pluviómetros. Las canaletas estaban cubiertas con una malla para evitar obstrucción de hojarasca e insectos. Como se pueden ver los porcentajes en el Cuadro 3, se obtuvieron porcentajes de intercepción similares a los encontrados en bosques, desechando así la suposición de que el matorral intercepta menos lluvia que el bosque (Cantú y González 2005).

En Fort Benning, Georgia con un recolector de TF (no descrito) bajo el bosque y pluviómetros fuera de él, se midió la pérdida por intercepción en cinco diferentes especies de árboles. Los porcentajes de agua que sí logra atravesar el dosel son muy parecidos entre especies, a diferencia del pino que es 5% menor (Cuadro 3).

La importancia del proceso de TF, no sólo es recargar de humedad el suelo del bosque, sino que provee un canal entre el dosel y el suelo que permite la transferencia de grandes cantidades de nutrientes del dosel al suelo (Manokaran 1979).

Cuadro 4. Estudios de medición de escurrimiento de tronco

Lugar	Vegetación	Método	% de ppt	Año de toma de datos	Investigador
Kade, Ghana	Bosque húmedo tropical	No menciona	< 1	1958	Nye (en Clarke 1986)
Nueva Zelanda	Bosque <i>Pinus radiata</i>		3	1963	Fahey
Malasia	Bosque tropical lluvioso	Collar pegado al tronco	0.64	1973	Manokaran, N.
Manaus,	Reserva forestal	Collar pegado	1,8	1983	Lloyd

Brasil		al tronco			
Georgia, USA	Humedal	No descrita	0.65	2001	Bryant, Bhat y Jacobs
	Bosque de pino		0.54		
	Plantación de pino		1.96		
	“Hardwood”		0.54		
	Bosque mixto		0.54		
Portugal	Bosque de eucalipto	Collar estándar de SF	4	2002	Keizer, Coninck, van Dijck, Coelho y Wamerdam
	Bosque de pino	Collar estándar de SF	7		

En Malasia se colocaron collares de poliestireno alrededor del tronco de los árboles que irían conectadas finalmente a un bidón para su recolección. El SF ocurrió en 133 de 166 días. Por eventos de lluvia individual, el porcentaje de SF varió entre 0 y 2,65%, mientras que mensualmente, el porcentaje fue de 0,32 a 0,92%, finalmente 0,64% anual. Una observación que se hizo en este estudio fue que en eventos de lluvia de baja intensidad y corta duración SF no ocurría. Manokaran (1979) expone que algunos de los factores que pueden afectar el SF incluyen el período de tiempo entre dos lluvias consecutivas, condiciones atmosféricas que precedieron la lluvia, temperatura, humedad y condiciones de viento durante la lluvia, humedad de la copa y ramas y la textura de la corteza.

Nye (1961) midió, por un año, la precipitación bruta, TF y SF; sin embargo, luego de medir 2 meses SF y contabilizar menos de 1% decidió discontinuar esta medición. En el mismo estudio, Clarke menciona que Hopkins (1960) realizó un estudio similar al de Nye en la Reserva Forestal de Mpanga, Uganda en el que no midió SF. La razón principal de esta decisión fue que el nivel de lianas en los árboles canalizaban el agua desde las ramas, lo que no iba permitir medir con un grado de error bajo.

En 1984, como parte de un estudio en que se trataba de analizar la variabilidad espacial de la lluvia que cae dentro del bosque amazónico, Lloyd (1988) midió el SF de árboles con un diámetro entre 0,12 a 1,64 m y una altura de 5 m hasta 40 m. El material utilizado fue un material adhesivo flexible utilizado en construcción que se colocaron en forma de collar alrededor de los troncos de los árboles. Una parte de estos collares estaban conectados a pluviómetros que estaban a su vez conectados a lectores electrónicos; y otra parte eran recogidos en recipientes de 20 L, ambos instrumentos eran leídos semanalmente. Las

dificultades encontradas fueron fallas en los lectores de los pluviómetros, fugas o bloqueos de los recipientes. 1,8% de la lluvia incidente es la que cae al suelo a través del escurrimiento del agua en los troncos de los árboles.

En Portugal, un parcela de *Eucalyptus globulus* Labill. de 6 años y otra de *Pinus pinaster* de 10 años se seleccionaron para medir qué tan bien se adaptan algunos modelos antes desarrollados en estas especies. Para medir SF, se colocaron collares de SF estándar, los cuales iban conectados a pluviómetros automatizados y para medir la intercepción se midió también el TF con pluviómetros automatizados. Datos que fueron contrastados con los registros de pluviómetros ubicados en claros de bosque.

Valores menores del 1% se encuentran en varios estudios, es por ello que algunos investigadores omiten tomar medidas de esto. Por ejemplo Stad Müller y Agudelo (1990), Jiménez (1986) y Cantú et al. (2005). Mientras que otros autores, como por ejemplo Turcios (1995) midieron SF, pero obtuvo cantidades despreciables. Esto puede explicarse a que en el bosque que estudió, se encuentran árboles con cortezas muy rugosas y porosas, que según Molchavov (1971) especies con corteza gruesa y rugosa tienden a presentar menor escurrimiento por el tronco. Fahey (1964) midió la cantidad de agua que llegaba al suelo dentro de una plantación de 30 años de *Pinus radiata* de la ciudad de Dunedin; no midió SF, sin embargo tomó arbitrariamente un 3% como SF basado en la literatura.

Cuadro 5. Estudios de medición de intercepción

Lugar	Vegetación	Método	% de ppt	Año de toma de datos	Investigador
África del Este	Plantación de ciprés (<i>C. macrocarpa</i>)	Pluviómetro	25	1946	Pereira
	Bosque de bambú (<i>arundinaris alpina</i>)		21		
Nueva Zelanda	Bosque <i>Pinus radiata</i>	Pluviómetro	49	1963	Fahey
Malasia	Bosque lluvioso tropical	Pluviómetro	22	1973	Manokaran, N.
Londres, Inglaterra	<i>Pinus nigra</i>	No especificado	35	1975	Rutter; Morton; Robins
	<i>Pseudotsuga</i>		39		

	<i>menziesii</i>				
	<i>Picea abies</i>		48		
	<i>Carpinus betulus</i>		36		
	<i>Quercus robur</i>		18		
Java, Indonesia	Bosque lluvioso tropical	Láminas de plástico	21	1980	Calder et.al.
Reino Unido	Plantación de manzanas	Pluviómetro	15	1980	Calheiros y Butler
Reino Unido	Plantación de trigo	Pluviómetros horizontales	40	1981	Butler y Huband
Manaus, Brasil	Reserva forestal	Pluviómetro	9	1983	Lloyd
Turrialba, Costa Rica	Sistema agroforestal Café – Poró	Pluviómetro plástico	16	1985	Jiménez
	Sistema agroforestal Café – Laurel	Pluviómetro plástico	8	1985	
México	<i>Acacia berlandieri</i> (huajillo)	Pluviómetros horizontales	18	1999	Cantú y González
	<i>Acacia rigidula</i> (chaparro prieto)	Pluviómetros horizontales	15		
	<i>Diospyros texana</i> (chapote)	Pluviómetros horizontales	22		
Portugal	Bosque de eucalipto	Pluviómetro totalizador	9	2002	Keizer, Coninck, van Dijck, Coelho y Wamerdam
	Bosque de pino	Pluviómetro totalizador	17		
Villamills, Costa Rica	Bosque primario	Pluviómetro lineal y horizontal	34	1995	Turcios
Georgia, USA	Humedal	Colectores de TF y pluviómetros	17.7	2001	Bryant, Bhat y Jacobs
	Bosque de pino		22.3		
	Plantación de pino		17.6		
	Hardwood		17.4		
	Bosque mixto		18.6		

Pereira (1952 en Clarke 1986) continuó con el trabajo del investigador Wimbush, en el que se estaba midiendo la intercepción en una plantación de 20 años de ciprés Montleroy y un bosque natural de bambú. Su trabajo tiene datos de 6 años (1946 – 1951), incluyendo un año extremadamente seco (1949). Los porcentajes de intercepción para el ciprés anduvieron entre

17,2 y 32%, mientras que para el bambú fueron de 13,4 a 27,2%. Aún cuando esta investigación tiene una buena cantidad de datos en cuanto a tiempo de estudio e intensidad de muestreo, se deben tomar con mucho cuidado los datos para el bambú, ya que los datos para SF fueron obtenidos con mucha dificultad, restándole confiabilidad a los resultados.

En Nueva Zelanda (Fahey 1964) se obtuvieron valores de 49% de intercepción en una plantación de *Pinus radiata*, utilizando pluviómetros como instrumentos. Este dato es mucho mayor que el 10,3% encontrado por Huber y Oyarzún en un bosque adulto de la misma especie. La diferencia se debe a que en el estudio de Fahey, las lluvias eran menos intensas, produciendo así más intercepción.

La intercepción en Malasia se obtuvo restando la cantidad de TF y SF de la lluvia incidente. La intercepción fue entre 5 y 34% mensual y anual fue de 22%. En el caso de intercepción, se encontró que está negativamente correlacionado con la intensidad de la lluvia, a diferencia del TF y SF. Este 22% de intercepción es bajo con respecto a un 36% obtenido por Low (1972, en Manokaran 1979) en bosques de zonas bajas en Malasia. Las posibles razones de esta diferencia de porcentajes radican en el hecho que Low hizo el estudio de 5 meses versus un año de Manokaran y estos 5 meses pudieron haber coincidido con la época más lluviosa del sitio.

El estudio de Calder et al. (1986) tuvo lugar en una región de bosque lluvioso de tierras bajas en la reserva natural Janlappa, en 106°17'E y 06°35'S a 80 msnm. El clima de este sitio está fuertemente influenciado por los monzones del este y oeste y por los movimientos de la zona de convergencia intertropical. El método para medir intercepción fue a través de láminas de plástico que se colocaron bajo el bosque y en zonas sin bosque. Estas láminas estaban conectadas a un pluviómetro automatizado. Desde el inicio de este estudio, se anticipaba que las dificultades a encontrar serían distintas a las de las zonas templadas; las dificultades fueron las frecuentes tormentas eléctricas y rayos que caían que dañaban los circuitos de la estación automatizada, así como picaduras de insectos a los cables eléctricos.

Continuando con la franja tropical, en el Campo Experimental La Montaña, Turrialba, Costa Rica, Jiménez (1986) realizó mediciones de intercepción de lluvia en dos sistemas agroforestales con el fin de poder utilizar estos datos para calcular el balance hídrico de estos sistemas. Los sistemas agroforestales fueron de café-poró y café-laurel. Mediciones de SF no

se realizaron por ser bastante costosas, además de que la literatura indica que la fracción que escurre por el tallo es muy pequeña. En el sistema café-poró el porcentaje de intercepción fue de 16,5%, mientras que en el sistema café-laurel la intercepción fue de 7,5%. El autor menciona que esta diferencia se debe a que el segundo sistema presenta una menor densidad y cantidad de biomasa aérea. Este mismo hecho ocurrió en el estudio de Turcios (1995) en Villa Mills, Costa Rica. Se midió la intercepción en un bosque primario sin intervención con 0% de extracción de área basal, un bosque primario con 20% de extracción y uno con 30% de extracción. El bosque que contaba con 0% de intervención tuvo en promedio 34,4%, el bosque con 20% de intervención 24,2% y el bosque con 30% obtuvo 25,2%.

Lloyd (1988) se midió y modeló la pérdida por intercepción de lluvia. El sitio experimental estuvo en 2°57'S y 59°57'W en la Reserva Forestal Ducke en Manaus, Amazonía, Brasil. El dosel del bosque estaba compuesto por especies de árboles de 35 m de altura, con algunos árboles que llegaban a los 40 m. El porcentaje de agua interceptado medido fue de 9% de la precipitación bruta. A la par de estas mediciones, se corrió el modelo de intercepción analítico de Gash, que es una simplificación de modelo Rutter, el cual permite calcular la pérdida por intercepción de lluvia a partir del patrón de lluvia, tasa promedio de precipitación y evaporación y el conocimiento de la estructura del dosel del bosque. Esta modelación dio un 12,5% de pérdidas, el error en esta modelación fue dado por el hecho de que los pluviómetros estaban calibrados para dar una lectura por hora, por lo que no se pudo calcular el tiempo de inicio ni finalización de cada evento de lluvia.

Cambiando de especies forestales, en un cultivo de manzanas en el Reino Unido, por tres meses, se midieron la lluvia efectiva y SF bajo las copas de los árboles de manzana que dieron como resultado en 15% de intercepción de la lluvia. Esta plantación se encuentra en la Estación de Investigación Long Ashton de la Universidad de Bristol, Reino Unido. Se utilizaron dos tipos de pluviómetros dentro de la plantación, uno del modelo Snowdon hecho de plástico y el segundo un pluviógrafo. El porcentaje de agua que pasa como TF estuvo dentro del rango de 0 a 96% y agua de SF estuvo entre 0 a 2%, dando como resultado 15% de agua interceptada.

La mayoría de los estudios de intercepción se han hecho en bosques, dejando poca información sobre este proceso en pastos y cereales. Clark (1940 citado por Butler y Huband

1985) utilizó pluviómetros horizontales a nivel del suelo entre las filas de trigo para medir el agua que escurre por el tallo de la planta y pluviómetros horizontales, también, más elevados para medir el agua que escurre de las hojas de las plantas. Clark concluyó que el agua que escurre por el tallo no es grande. Butler y Huband utilizaron dos métodos para medir la intercepción de la planta del trigo, uno de ellos fue el mismo método de Clark. El otro método fue el de colocar cajas sin fondo alrededor de algunas plantas, luego sellar el suelo que cae dentro de esa caja con látex natural; así el agua que cae dentro de la caja no se infiltrará y escurrirá a la parte más baja del cuadro, el cual tendrá un orificio que se conectó con un recipiente recolector. Estos datos se contrastaron con los datos recogidos en un pluviómetro ubicado en una zona sin vegetación del tipo Snowdon. Con los datos de dos años se concluyó que solamente el 60% de la lluvia incidente llega al suelo. Este 40% de pérdida por intercepción se debe en gran medida a la forma y tamaño de las hojas que permite una alta evaporación del agua, también la cera del tallo no permite que las gotas de agua escurran fácilmente al suelo (Butler; Huband 1985).

Rutter (1975) analiza el proceso de intercepción en cinco diferentes especies forestales, pino salgareño, abeto de Douglas, píceas de Noruega, carpe blanco y roble común. Los primeros dos estaban adyacentes al bosque Bramshill, Hampshire y los siguientes estaban en Bagley Wood, Oxford. El objetivo de este análisis no fue aplicar una metodología, más bien corregir un modelo antes deducido por Rutter et al. en 1971. No se describe la metodología utilizada, sólo menciona que la diferencia al anterior modelo fue que este reconoció las capacidades de almacenamiento y tasas de evaporación de la copa del árbol separado del tronco donde sucede el SF, lo que Rutter et al. anteriormente no lo tenían dividido.

Tomando la información de los cuadros anteriores, se puede ver el rango en que andan los porcentajes de las tres variables. La lluvia efectiva anda entre 66 y 98%, el escurrimiento del tronco de 0 a 7%, teniendo la mayoría de los estudios porcentajes menores a 1%; finalmente la intercepción está entre 8 y 49%. Los estudios coinciden con que la intensidad de la lluvia, el período entre eventos de lluvia, características de la corteza y hojas de los árboles están entre los factores que más influyen en estas variables. En cuanto a la metodología a emplear, depende mucho del presupuesto disponible, pero también del mantenimiento que se le puede dar. Independientemente de los instrumentos a utilizar se debe dar mantenimiento constante por insectos que puedan dañar el equipo, hojas o ramas de los árboles que puedan caer dentro

del equipo y que obstruyan el paso del agua, así como reafirmar la base del equipo en que esté sujeto en zonas con fuertes vientos.

De acuerdo con lo estudiado en la bibliografía existente en materia de estudios similares al actual y con restricciones de recurso humano y financiero, se decidió que la metodología que mejor se adaptaba a la zona eran las canoas bajo el dosel y el anillo alrededor del tronco. Las canoas de PVC y el anillo de manguera plástica con silicón para sellar orificios que queden entre la manguera y la corteza.

Para comprobar la eficiencia y eficacia del sistema de canoas, se colocaron plásticos de 3x3 m casi a nivel del suelo en cuatro diferentes posiciones en cada sitio por 40 días y así comparar los datos registrados con ambos sistemas. Desafortunadamente se encontró el viento como el mayor problema a enfrentar. Los datos no coincidieron en lo absoluto, en los plásticos se recibió una muy menor cantidad de agua con respecto a las canoas. No hubo problemas de ruptura; sin embargo, el hecho de que durante la época que se tomaron los datos hubo vientos fuertes el agua que era recibida rebotaba de la superficie del plástico, o bien era secada rápidamente por el mismo. En los primeros días se intentó reforzar el apoyo de los plásticos para reducir esta pérdida. Se midió la eficiencia de estos plásticos y el rango estuvo entre 44 y 76%.

4.1.1 Métodos de medición de la precipitación horizontal

A pesar de que la medición de agua ha sido muy estudiada, no se ha llegado a un acuerdo sobre el método a utilizar; mucho de esto se debe a que los estudios son difíciles de comparar entre diferentes ubicaciones y diferencias en la metodología empleada (colectores de neblina versus precipitación neta o mediciones directas con “eddy covariance” o covarianza de turbulencia (Bruijnzeel 2005) (cuadro 6). Esto depende de los objetivos del estudio, de la ubicación del estudio, así como de los recursos disponibles. Juvik y Ekern (1978) reúnen los diferentes métodos usados en dos métodos básicamente:

- a.) Recolectar la precipitación total debajo del dosel por medio de canoas o una gran cantidad de pluviómetros y comparar estos datos con los datos de pluviómetros ubicados sobre el dosel o en un área cercana sin bosque.

- b.) Recolectar el agua de la neblina por medio de instrumentos artificiales, llamados comúnmente como atrapanieblas.

Cuadro 6. Métodos de medición de precipitación horizontal

Sitio de estudio	Investigador	Año	Duración de toma de datos	Instrumentos utilizados	% ppt horizontal
Sierra Madre Oriental, México	Vogelmann	1969- 1970	55 semanas comenzando el 6 de enero 1969	Latas de aceite de un litro con y sin malla	Desde 0 hasta 102,9
Balalaica, Turrialba, Costa Rica	Cáceres	1980- 1981	Julio 1980 al 17 de enero 1981	Arpa de alambre con base giratoria	15,31
Chile Guatemala Hawaii Otros sitios	Bruijnzeel	2005	41 meses 12 meses 12 meses Desde 19 días hasta 48 meses	Colectores de neblina estándar Precipitación neta (pluviómetros) Precipitación neta Cilindros con mechas de alambre Arpas de mechas de teflón dentro de un cuadro o en cilindro Cilindro romanilla metálica Colectores de neblina estándar	>100 19
La Mucuy, Mérida, Venezuela	Pacheco, E. Ataroff, M.	2001-2002	Abril 2001- febrero 2002	Standard Fog Collector (SFC) Louvered Screen Fog Collector (LSFC)	11,
Montañas Luquillo, Puerto Rico	Holwerda, et al.	2005?	44 días	Water budget Eddy covariance	17,36 – 17,7

SFC son colectores de malla tipo Raschel sin techo desarrollados por Schemenauer y Cereceda (1994) y el LSFC es un cilindro romanilla metálica con techo de Juvik y Nullet (1995).

Vogelmann et al. utilizaron el método de balance hídrico en donde midieron el agua que cae de las hojas de los árboles y el agua que escurre por el tronco. Para ellos utilizaron pluviómetros totalizadores con un orificio 100 cm² a 30 cm del suelo y algunos pluviómetros de balanza para el agua que cae del dosel. Para el agua que escurre por el tronco se colocó una manguera de silicón se colocó alrededor del tronco en forma de espiral y los espacios que quedaron entre la manguera y el tronco se sellaron con silicón líquido. El método de covarianza por turbulencia se utilizó para corregir los errores que se pueden dar por efecto del

tamaño de la gota y la turbulencia del viento, la gota grande cae a la vegetación, pero la pequeña se mantiene suspendida.

4.2 Aporte de agua por neblina en Los Romero, Milingo y Río Chiquito

Los datos registrados en los tres sitios resultaron muy variados entre ellos; sin embargo, se puede apreciar las similitudes en cuanto a días de presencia o ausencia de neblina, así como de lluvia. El período de toma de datos fue de 167 días (16 de octubre al 31 de marzo), tiempo que se considera época seca en El Salvador (Zarate 2005; SNET). A pesar de ser considerada época seca, esta última alargó el período de lluvia, presentando precipitaciones fuertes y mayores hasta diciembre, en comparación de años anteriores (Figura 8).

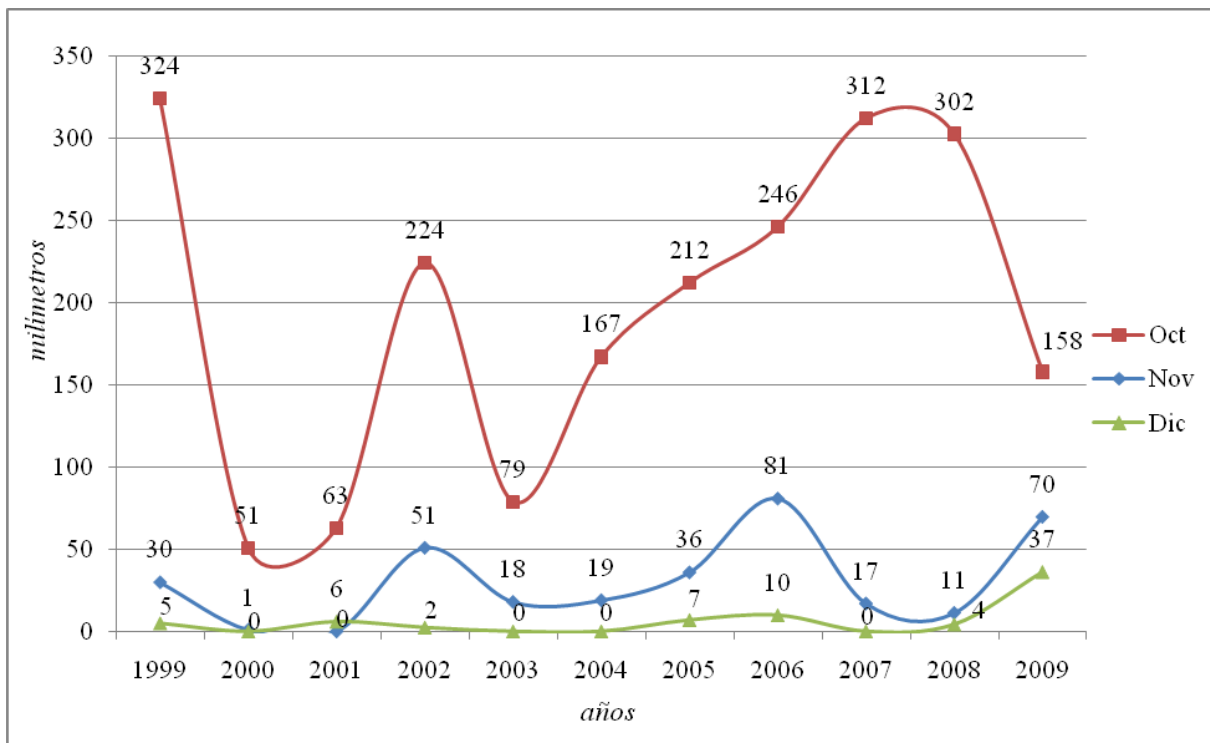


Figura 8. Precipitación incidente de los meses de octubre a diciembre para el período de 1999 a 2010 en Las Pilas, Chalatenango, El Salvador. Elaboración propia.

Aun cuando la época lluviosa anterior se alargó, la misma no recibió mayores precipitaciones en total comparada con años anteriores. Los meses de noviembre y diciembre sí recibieron cantidades considerablemente mayores de lluvia al de los años anteriores, pero octubre recibió la mitad de agua que había recibido los dos últimos años, la época seca pasada cae dentro del promedio visto en los últimos diez años (Cuadro 7). El comportamiento de la lluvia en los meses de la época seca son muy variados de un año a otro y esto se puede ver con el coeficiente de variación obtenido para cada mes. El coeficiente de variación de estos meses estuvo entre 51% y 165%, siendo estos valores muy altos, reflejando así la dispersión de la lluvia en los últimos 10 años con respecto al promedio. El mes con menos variación en la época seca es octubre con 51,26% y el mes con un mayor coeficiente de variación es diciembre con 165,47%.

Cuadro 7. Precipitaciones en milímetros en la época seca en Las Pilas, Chalatenango, El Salvador para el período de 1999 – 2009

Año/Mes	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Total
1999	324	30	5	5	0	19	383
2000	51	1	0	0	2	5	59
2001	63	0	6	1	0	4	74
2002	224	51	2	0	0	1	278
2003	79	18	0	0	3	14	114
2004	167	19	0	10	4	0	200
2005	212	36	7	0	0	68	323
2006	246	81	10	11	2	0	350
2007	312	17	0	2	2	7	340
2008	302	11	4	11	2	46	376
2009	158	70	37	3	1	0	268
Promedio	194	30	6	4	1	15	251
CV (%)	51,26	88,45	165,47	118,04	94,08	149,12	

Adaptado de SNET

Durante la época seca se producen 16,3 frentes fríos en promedio, los cuales generalmente están acompañados de fuertes vientos y lluvias. Los frentes fríos se producen cuando una masa de aire fría reemplaza a otra masa más caliente y dado que la primera es más densa, empuja la caliente para apartarla y obligarla a ascender. Este aire con humedad forma nubes y lluvia los que originan la típica imagen de un frente frío (Zárate 2005).

Las precipitaciones registradas en los tres sitios para este estudio fueron en menor cantidad para el sitio de Milingo (290 mm), seguido de Los Romero (294 mm) y Río Chiquito (346 mm). Durante tres de los cinco meses que hubo registros de precipitación (febrero no presentó precipitaciones en ninguno de los sitios), se mostró el patrón de cantidad de agua recibida en los pluviómetros ubicados en las casas, Milingo < Los Romero < Río Chiquito. Durante todos los meses Río Chiquito recibió más precipitación que Milingo y Los Romero, a excepción del mes de marzo donde Los Romero fue el único sitio que recibió lluvia para ese mes. Presentándose 23 días de lluvia en promedio durante todo el tiempo de toma de datos (24 de lluvia Milingo, 27 de lluvia Los Romero, 17 días de lluvia en Río Chiquito). Los datos mensuales de los tres pluviómetros más el de la estación meteorológica del Proyecto pueden observarse en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Precipitación incidente mensual del período seco 2009 – 2010

	Los Romero	Milingo	Río Chiquito	Estación
Octubre*	163,2	128,0	150,0	158,0
Noviembre	94,46	156,0	166,0	70,0
Diciembre	29,12	2,8	20,0	37,0
Enero	5,56	2,8	10,0	3,0
Febrero	0,0	0,0	0,0	1,0
Marzo	1,39	0,0	0,0	0,0
Total	294	290	346	269

**Los datos corresponden a los días de 16 al 31 de octubre.*

Los tres pluviómetros ubicados en las zonas sin bosque muestran únicamente los registros de la segunda mitad del mes de octubre, por lo que no se pueden comparar contra los datos de los años anteriores; sin embargo, los datos de la estación meteorológica sí son para el mes completo y este muestra una reducción a la mitad con respecto a los años anteriores. A partir del mes de noviembre esta situación se invierte, los meses restantes de la época seca recibieron cantidades mayores de precipitación a las que se habían recibido en años anteriores. Para el mes de noviembre el porcentaje de agua recibido superior al de años anteriores es más dramático, en 2007 recibió 17 mm y en 2008 recibió sólo 11 mm, ya para este año 2009 se registraron valores entre 94 y 166 mm en los pluviómetros de las casas, datos que son

respaldados por el registro de la estación del Proyecto. De igual manera se comporta diciembre, con la diferencia que Milingo recibió una menor cantidad al del resto de los pluviómetros.

De los días con lluvia, el día que se registró una mayor cantidad de agua en Los Romero fue de 50 mm en octubre (28/10/2009), en Milingo de 62 mm en Noviembre (8/11/2009) y fue de 70 mm en Río Chiquito en Noviembre (8/11/2009). Datos de intensidad no se cuentan en este estudio por falta de equipo para medirla.

Con relación a los datos de aporte de neblina, como se mencionó en párrafos anteriores, sólo se contabilizaron los días en los que no hubo presencia de lluvia. En total, en Los Romero las canoas recibieron agua 33 días de los cuales, 22 hubo lluvia, en Milingo 32 días y hubo 21 días con lluvia y en Río Chiquito 48 días con 16 días con lluvia, dejando así 11 días para Los Romero y Milingo y 32 días para Río Chiquito, para tomar en cuenta para el análisis. En las figuras 9, 10 y 11 se puede apreciar la diferencia de días en que estos sitios recibieron agua de neblina.

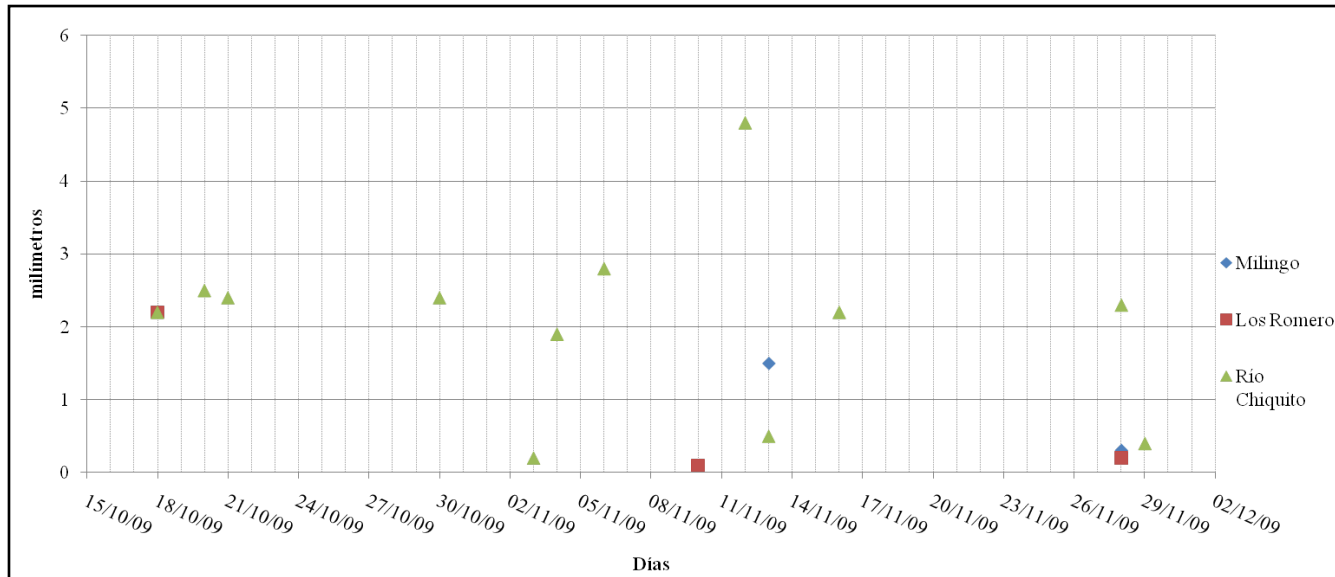


Figura 9. Días de registro de precipitación horizontal en los meses de octubre y noviembre 2009

Como se puede apreciar en la figura anterior, desde los primeros días del período de recolección de agua, Río Chiquito es el sitio que recibe las mayores cantidades de agua pero también es el que recibe mayor cantidad de días aporte de agua por neblina. Durante estos dos meses aun se reciben lluvias fuertes, por lo tanto los días hábiles para ser tomados en cuenta en el cálculo de aporte de neblina fueron pocos.

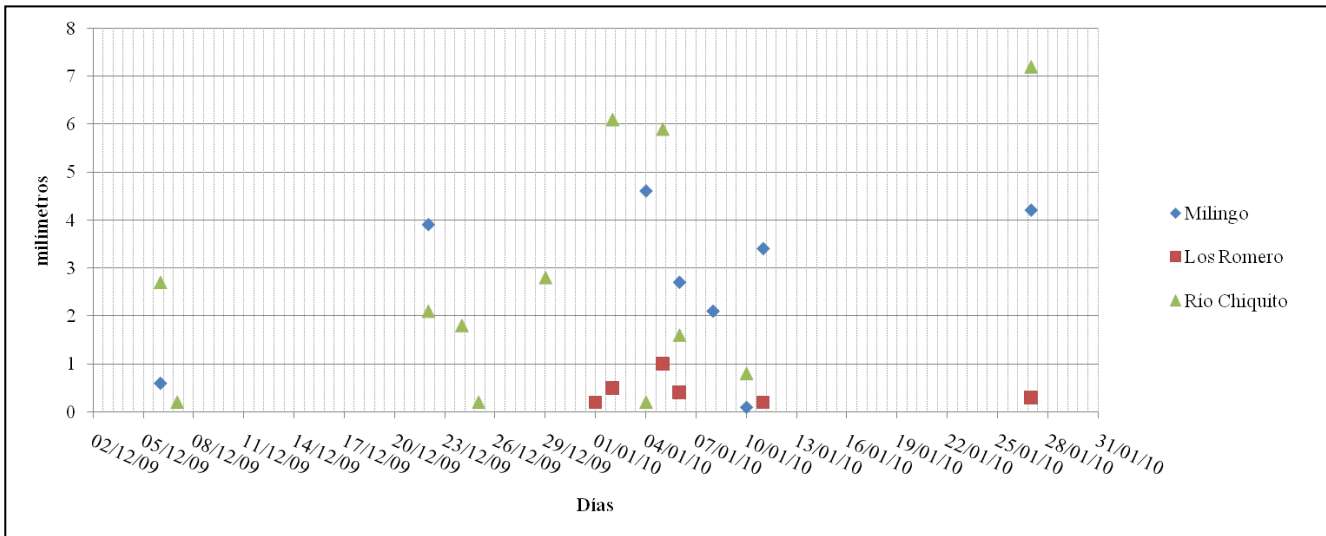


Figura 10. Días de registro de precipitación horizontal en los meses de diciembre 2009 y enero 2010

Durante los meses de diciembre y enero ya la época seca estaba más acentuada y es durante estos meses que se aprecia una mejor distribución de la neblina en los tres sitios. Esta mejor distribución y mayor aporte de neblina puede deberse al hecho que es durante estos meses que hay una mayor cantidad de frentes fríos (Zárate 2005), lo que con sus fuertes vientos permite que haya una mejor circulación de las nubes bajas a lo largo de toda la zona alta de San Ignacio. Los tres sitios reciben aporte de neblina un mayor número de días, pero aun así persiste el hecho que Río Chiquito recibe los aportes de mayor cantidad y presenta más días de registro.

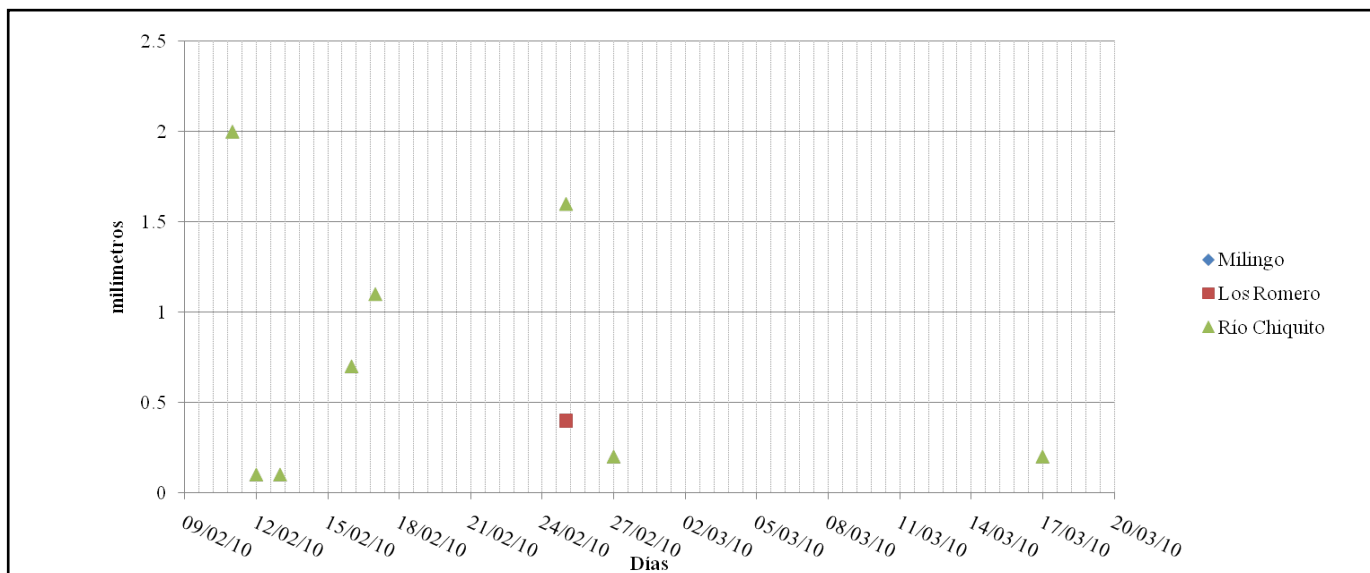


Figura 11. Días de registro de precipitación horizontal en los meses de febrero y marzo 2010

En los tres sitios no se recibieron lluvias durante estos dos últimos meses de época seca, dejando así fácilmente distinguibles los días que se contabilizarían como aporte de lluvia o como aporte de neblina. Sin embargo, igual que hubo una reducción en las lluvias, también hubo una reducción en presencia de frentes fríos. Zárate (2005) indica que en el mes de febrero los vientos provenientes del Pacífico desaparecen casi por completo y comienzan también a disiparse los vientos del Norte, provocando así una disminución en la movilización de las nubes bajas en la zona. Se puede apreciar en la figura 11, cómo Milingo dejó de recibir aporte de neblina desde el mes de enero, Los Romero recibió una mínima cantidad (0,2 mm) de agua en estos dos meses y, al igual que en todo el período de toma de datos, recibió mayores volúmenes de agua en una mayor cantidad de días.

Entonces a manera de resumen mensual, las cantidades de agua recibidas en los tres sitios provenientes de la interceptación de la neblina por el bosque son: Los Romero 5 mm, Milingo 24 mm y Río Chiquito 62 mm, como puede apreciarse en el cuadro 9. Cabe mencionar que de los 3 sitios, Río Chiquito fue el único que todos los meses presentó aporte de neblina, mientras que los otros dos tuvieron 2 meses en los que no hubo aporte.

Cuadro 9. Aporte diario de neblina en milímetros para la época seca

	Día	Milingo	Los Romero	Río Chiquito
Octubre	18		2,2	2,2
	20			2,5
	21			2,4
	30			2,4
Noviembre	3			0,2
	4			1,9
	6			2,8
	10		0,1	
	12			4,8
	13	1,5		0,5
	16			2,2
	28	0,3	0,2	2,3
	29			0,4
Diciembre	6	0,6		2,7
	7			0,2
	22	3,9		2,1
	24			1,8
	25			0,2
	29			2,8
Enero	1		0,2	
	2		0,5	6,1
	4	4,6		0,2
	5		1,0	5,9
	6	2,7	0,4	1,6
	8	2,1		
	10	0,1		0,8
	11	3,4	0,2	
	27	4,2	0,3	7,2
Febrero	11			2,0
	12			0,1
	13			0,1
	16			0,7
	17			1,1
	25	0,4	0,4	1,6
	27			0,2

Marzo	17			0,2
Total		23,8	5,5	62,2

En el cuadro 9 se pueden apreciar los días en que hubo aporte de agua por neblina, cabe repetir que en estos días no hubo registro de lluvia en los pluviómetros. El día en que hubo un mayor aporte de agua de neblina en Milingo fue de 4,6 mm, mientras que en Los Romero fue de solamente 1 mm y en Río Chiquito de 7,2 mm. Los aportes de neblina representan en Los Romero el 2%, Milingo 8% y Río Chiquito 18% de lo que llueve en la época seca, teniendo así un aporte adicional en el orden de 2, 8 y 18%. El mes que presentó mayor cantidad de aporte de neblina fue, en los tres casos, enero, mes que también es el de más frentes fríos en El Salvador (Zárate 2005). Enero recibe el 72% de todo el aporte de neblina en Milingo, 47% en Los Romero y 35% en Río Chiquito.

Cuadro 10. Aporte mensual de neblina en milímetros para la época seca

	Los Romero	Milingo	Río Chiquito
Octubre	2,2	0,0	9,5
Noviembre	0,2	1,8	15,0
Diciembre	0,0	4,5	9,8
Enero	2,5	17,2	21,7
Febrero	0,4	0,4	5,8
Marzo	0,0	0,0	0,2
Total	5,0	24,0	62,0

Como se muestra en el cuadro 9, no son muchos los días en que se recibió aporte de neblina. Es por ello, que en algunos meses el aporte de uno o dos días representa un alto porcentaje del total recibido. Por ejemplo, En Los Romero hubo aporte de neblina un solo día; sin embargo, el aporte de ese día representa el 40% del total recibido en la época seca en Los Romero. Otro ejemplo en Milingo fue el mes de diciembre en el cual sólo 2 días recibieron el total de neblina en todo el mes, estos dos días representan el 19% del total para la época seca en ese sitio.

Los Romero tiene menos aporte de agua debido a que se encuentra frente a la vertiente del Atlántico a diferencia de los otros dos sitios, lo que hace que la mayoría de la humedad se disipe en Honduras. De acuerdo con Zárate (2005), del 100% de los empujes fríos que alcanzan Centroamérica por la vertiente del Atlántico, 33% se disipan entre Belice y el noreste

de Honduras, 32% lo hacen entre el noreste de Honduras y el norte de Panamá y el restante 34%, lo hace al este de la porción central de Panamá. Otro factor que influye en los aportes de neblina es la altitud, Río Chiquito es el sitio más alto de los tres y es también el que recibe mayor aporte, caso contrario Los Romero, es el sitio más bajo y es el que también recibe menos cantidad de neblina. Tobón y Arroyave (2007) y Tobón (2009) en Colombia y Cavelier et al. (1996) en Panamá, realizaron investigaciones las cuales dieron como resultado que la intercepción de la neblina aumentó de manera directamente proporcional a la altitud. Los resultados de ambos estudios condujeron a establecer que los bosques alto andinos pueden interceptar 16 veces más la neblina que los bosques húmedos bajos.

En las figuras que a continuación se presentan (Figuras 12 – Figura 17), se puede apreciar variación que existió entre las precipitaciones ocurridas por cada mes con respecto al promedio encontrado en un período de 10 años para el mismo mes. También se muestra el aporte de la precipitación horizontal para el mes indicado.

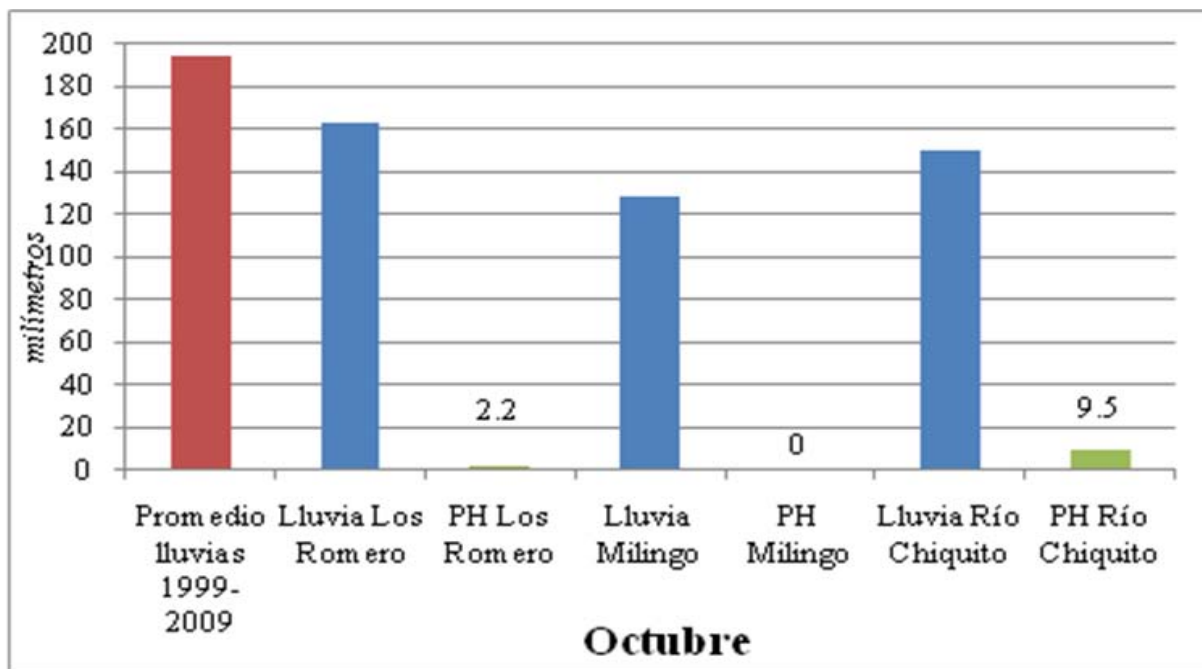


Figura 12. Comparación entre el promedio de lluvias para octubre de 1999 – 2009, lluvia octubre 2009 y precipitación horizontal (PH) para octubre 2009

En la figura 9 se muestra el promedio de lluvia que se ha recibido en el mes de octubre entre 1999 y 2009, seguido de la lluvia recibida en cada sitio y el aporte adicional recibido como

precipitación horizontal para la segunda mitad del mes. Este es el único mes con los que solamente se cuentan con los registros de la segunda mitad del mes. Como puede apreciarse, este mes se recibió menos lluvia del promedio y el aporte de neblina es muy bajo en los tres sitios, siendo nulo en Milingo.

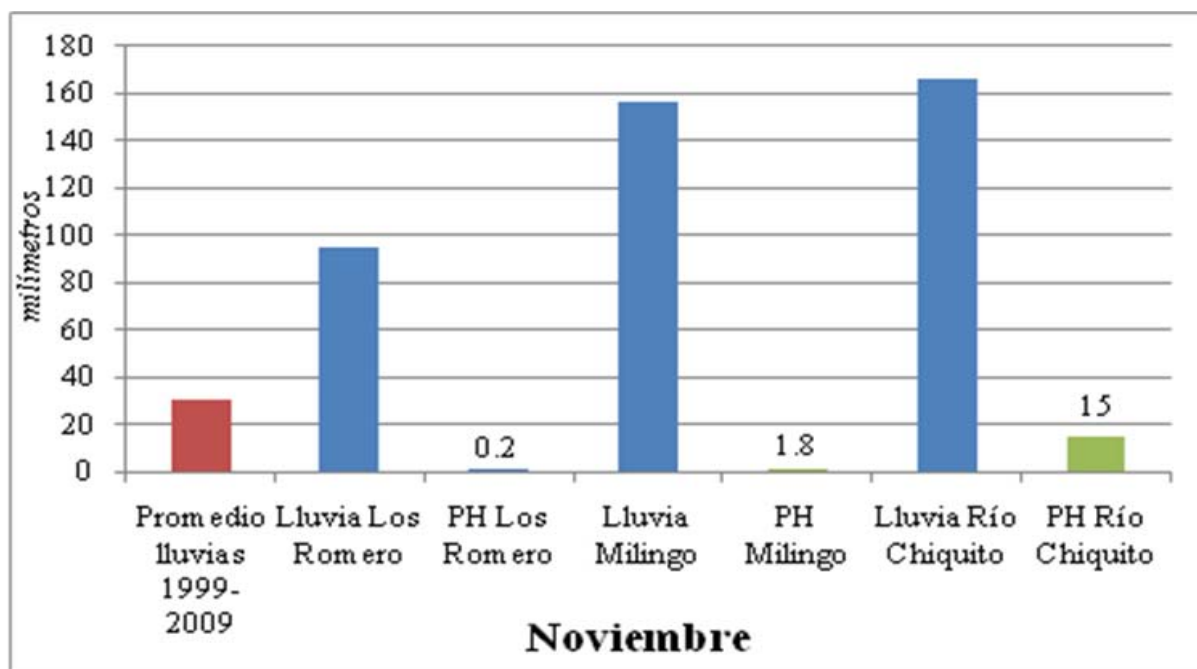


Figura 13. Comparación entre el promedio de lluvias para noviembre de 1999 – 2009, lluvia noviembre 2009 y precipitación horizontal (PH) para noviembre 2009

Para el mes de noviembre se puede apreciar cómo la época lluviosa se extendió más de lo esperado. Cuando en promedio se han recibido 30 mm de lluvia, este año se recibió entre 94 y 166 mm en los sitios de toma de datos. Para noviembre aun no hay mayor evidencia de precipitación horizontal en Los Romero y Milingo; Río Chiquito, por su parte lleva casi 25 mm como aporte adicional entre el mes de octubre y noviembre.

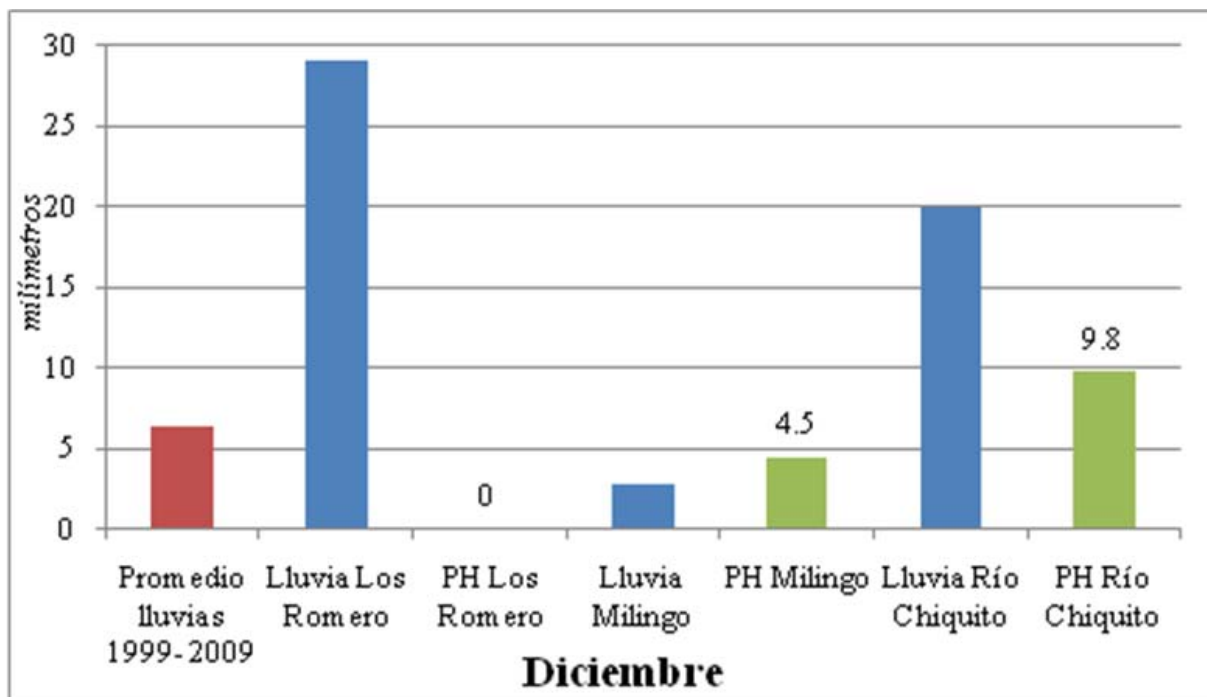


Figura 14. Comparación entre el promedio de lluvias para diciembre de 1999 – 2009, lluvia diciembre 2009 y precipitación horizontal (PH) para diciembre 2009

Diciembre, al igual que el mes anterior, recibió mayor cantidad de lluvia que el promedio. Diciembre es el mes que en el cuadro 7 se muestra con un mayor coeficiente de variación (165%). Ya este mes, Milingo también muestra aporte adicional junto con Río Chiquito. El mes de diciembre es el segundo mes con mayor aporte de precipitación horizontal en Milingo con 4,5 mm y en Río Chiquito con 9,8 mm, más que el promedio de lluvia que se recibe para ese mes (6 mm).

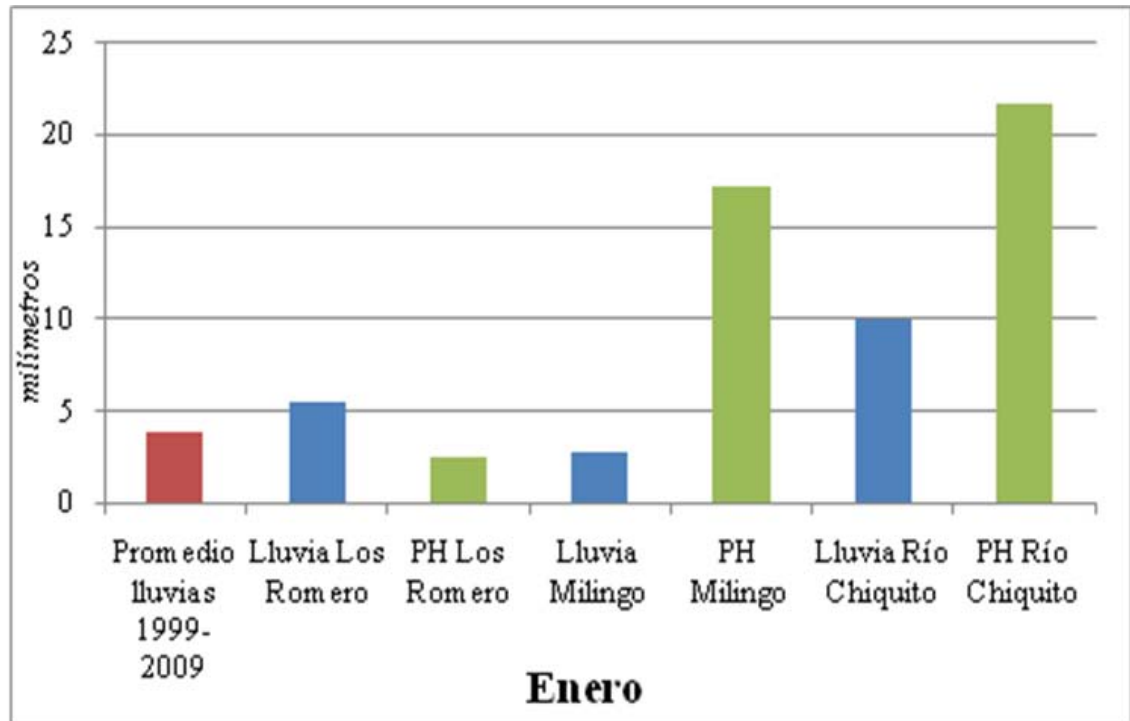


Figura 15. Comparación entre el promedio de lluvias para enero de 1999 – 2009, lluvia enero 2010 y precipitación horizontal (PH) para enero 2010

El mes de enero ya se acentúa más la época seca y aumenta considerablemente el aporte de agua por precipitación horizontal. Es en este mes donde en los tres sitios se recibe la mayor cantidad de precipitación horizontal de toda la época seca. Los Romero recibió el 50% del total recibido en toda la época (2,5 mm), Milingo recibió el 72% del total (17 mm) y Río Chiquito 35% (22 mm).

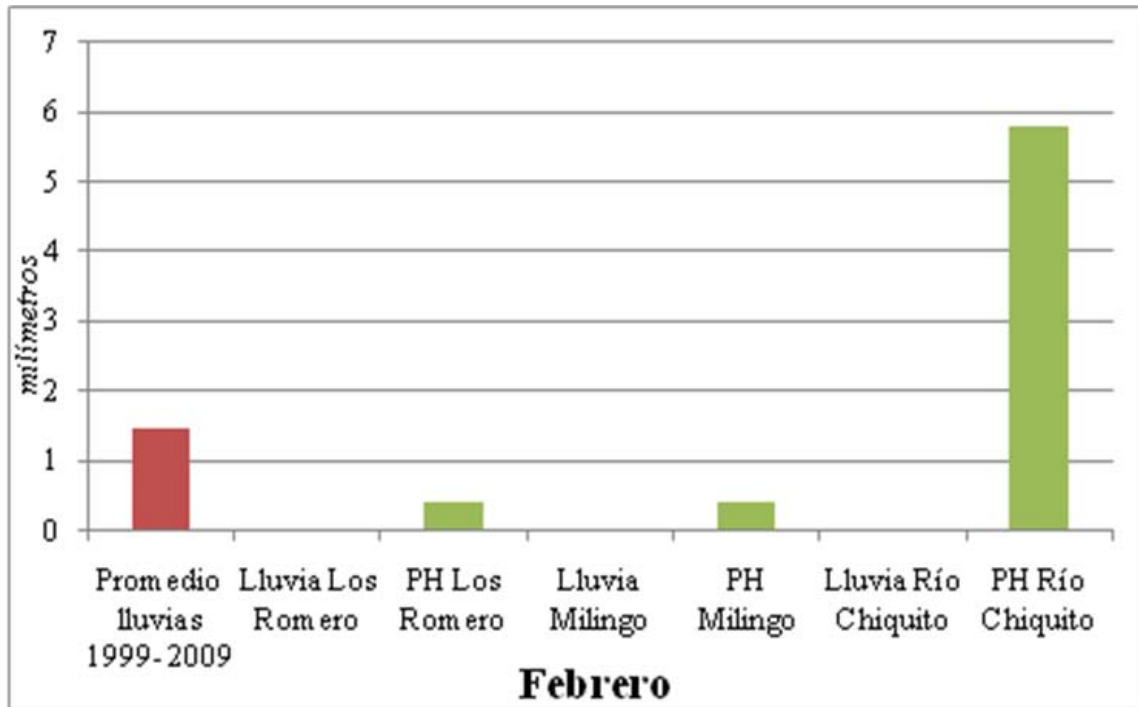


Figura 16. Comparación entre el promedio de lluvias para febrero de 1999 – 2009, lluvia febrero 2010 y precipitación horizontal (PH) para febrero 2010

Febrero no recibió lluvia en ninguno de los tres sitios; sin embargo, en promedio para este mes solamente se espera 1,45 mm. Como aporte adicional de precipitación horizontal sólo en Río Chiquito se recibió una cantidad mayor al promedio de lluvia que se recibe este mes, casi 6 mm.

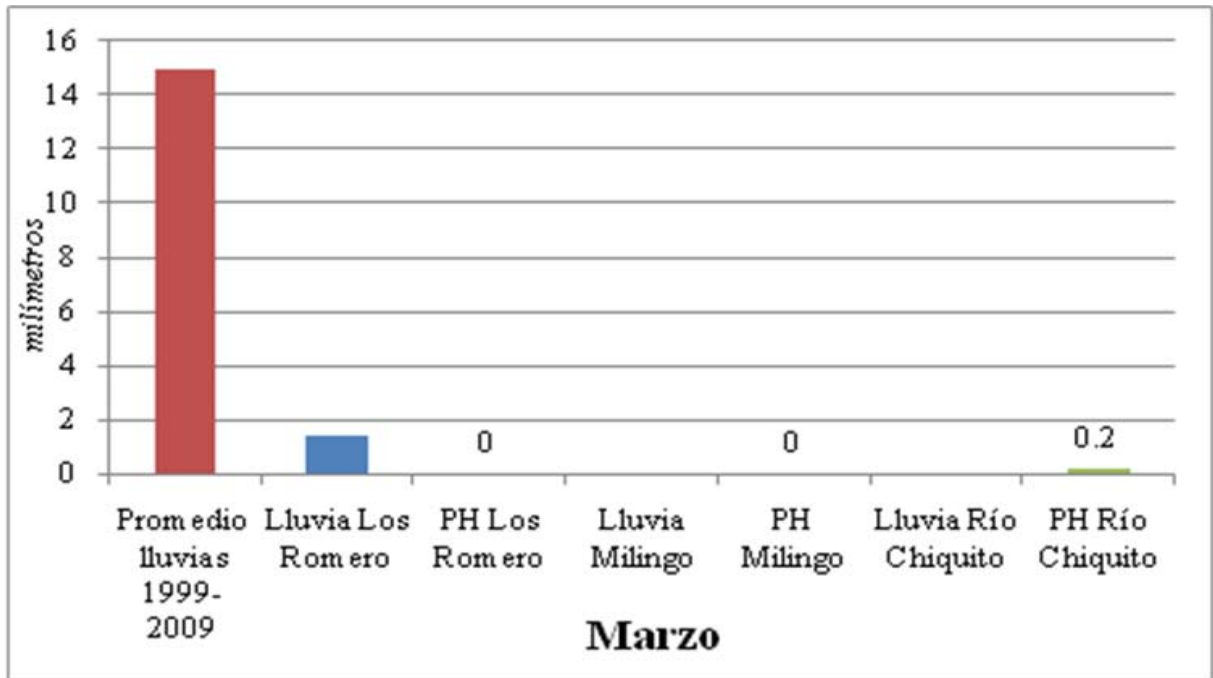


Figura 17. Comparación entre el promedio de lluvias para marzo de 1999 – 2009, lluvia marzo 2010 y precipitación horizontal (PH) para marzo 2010

El mes de marzo tiene como promedio de lluvia a recibir de 15 mm, pero este año Los Romero sólo recibió 1 mm de lluvia, mientras que el resto de sitios no recibió agua. Esta diferencia se debe al episodio de El Niño que comenzó en 2009 (OMM 2010). Este efecto de El Niño se disipó hasta principios de mayo y dio paso al fenómeno de La Niña. Se puede también notar en la figura 14, que deja de haber aporte de precipitación horizontal. Es en este mes que deja de haber presencia de nubes bajas en la zona y hasta la próxima época seca aparecen de nuevo.

4.3 Aporte de neblina a la relación evapotranspiración – precipitación

Para el balance de estos bosques, lo que se buscaba principalmente era determinar si el aporte de agua proveniente de neblina era significativo en cuanto a los requerimientos mínimos que tiene el bosque en esta época. De tal manera que tomando en cuenta solamente los procesos de evapotranspiración e intercepción de lluvia como demanda de agua y la precipitación más la neblina como oferta de agua, se observa que hay un déficit de agua como era de esperarse. Como se puede observar, la cuenca presentó un déficit de 215 mm en el período seco, es decir un 43% de la demanda de agua requerida para cubrir los procesos de evapotranspiración e intercepción en el bosque no son cubiertos (Cuadro 10). Lo clave de este cálculo fue notar el

aporte de la neblina, la cual nos indica que agregando la neblina a la oferta de agua no hace mayor diferencia en el balance. Incluyendo la neblina el déficit de agua solamente se reduce a 191 mm (24 mm menos), en porcentaje el déficit baja a 38% (Cuadro 11).

Cuadro 11. Balance hídrico climático, tipo Thornthwaite, sin incluir precipitación horizontal en Milingo, Chalatenango, El Salvador

Mes	EVT + I (mm)	Precipitación incidente (mm)	Exceso (mm)	Déficit (mm)
oct	104,0	128,0	24,0	-
nov	97,	156,0	59,0	-
dic	76,0	2,8	-	73,2
ene	71,0	2,8	-	68,2
feb	71,0	0,0	-	71,0
mar	85,0	0,0	-	85,0
Total	505,0	290,0	-	215,0

Los valores de evapotranspiración se encuentran entre la media que se puede esperar para bosques con estas condiciones; en Colombia a una altitud de 2000 msnm los valores encontrados fueron de 800 mm al año, en Ecuador a 2200 msnm indican pérdidas de 1280 mm al año, en Perú 605 mm al año en una altitud de 2500 msnm y en Bolivia a una altitud de 1700 msnm la evapotranspiración fue de 1190 mm al año (Tobón 2009).

Cuadro 12. Balance hídrico climático, tipo Thornthwaite, incluyendo precipitación horizontal en Milingo, Chalatenango, El Salvador

Mes	EVT + I (mm)	Precipitación incidente (mm) + neblina	Exceso (mm)	Déficit (mm)
oct	104,0	128,0	24,0	-
nov	97,0	158,0	61,0	-
dic	76,0	7,0	-	69,0
ene	71,0	20,0	-	51,0
feb	71,0	0,0	-	71,0
mar	85,0	0,0	-	85,0
Total	505,0	313,0	-	192,0

Estos datos coinciden con los cálculos hechos para 10 años. Calculando la evapotranspiración para la zona con los registros de precipitación y temperatura de la estación meteorológica de SNET de los últimos 10 años y sin incluir el aporte de neblina, se encuentra que el déficit de agua en la época seca ha sido de 36%. En ambos cuadros se puede ver que de la época seca, octubre y noviembre son los meses donde aun se cuenta con excedente de agua, el resto de los meses hay un déficit.

A pesar de mostrar un valor muy bajo en cuanto a aporte adicional, la neblina modifica las variables que intervienen en el balance hídrico de manera que se produzcan ahorros significativos de agua. Entre ellos, reduce la radiación solar, aumenta la humedad relativa que a su vez reduce la evapotranspiración (Bruijnzeel 2004 y Tobón 2009). Así como el coeficiente de variación de las precipitaciones anuales de 10 años es elevado en esta zona, así mismo podría mostrarse el de precipitación horizontal. Por ejemplo, investigaciones en Panamá han encontrado valores en que un año intercepta 2,4% de las entradas totales y otros años presenta 60,6% (Cavelier et al. 1996), en Colombia la cantidad de agua oscila entre 43 mm a 273 mm al año en una zona, mientras que en otra zona más expuesta a la neblina oscila

entre 143 y 796 mm al año. Otro factor a tomar en cuenta sobre el ahorro de agua es la altitud al que estos bosques influenciados por la neblina se encuentran. Frere et al. (1978, citado por Tobón 2009) en un estudio agroclimático de la región andina se encontraron valores mensuales de evapotranspiración a lo largo de un gradiente altitudinal y latitudinal los cuales indican que existe una disminución de la evapotranspiración de alrededor de 150 mm al año por cada 1000 m de aumento en la altitud.

5. CONCLUSIONES

La metodología que mejor se adapta a las condiciones del sitio, por su topografía y velocidad del viento fueron un sistema de canoas para recibir el agua que atraviesa el dosel y una manguera dispuesta en forma circular en el tronco para el agua que escurre por el mismo. Así mismo, este sistema permite de manera fácil su limpieza y lectura de datos.

El porcentaje de aporte hídrico va desde un 2% en la zona más baja (Los Romero), un 15% en Milingo y en la zona más alta un 18% Río Chiquito de la precipitación total, para la pasada época seca 2009 – 2010. Estos porcentajes equivalen a que en Los Romero se tenga una lámina de 5 mm, Milingo 24 mm y en Río Chiquito 62 mm.

La época de neblina en esta zona es durante la época seca, sin embargo, este fenómeno no es constante. El hecho que haya pérdida por intercepción de la lluvia en esa época, indica que el bosque no está en permanente contacto con nubes. Sin embargo, por las características que posee un bosque nublado, este puede llegar a ser más eficiente con el uso del agua. Por permanecer una buena parte del tiempo nublado, el ecosistema recibe muy poca radiación y permanece con una alta humedad relativa, reflejándose esto en una menor utilización de agua para el proceso de evapotranspiración.

El aporte adicional a la precipitación por condensación de neblina, no es significativo dentro del balance hídrico de la zona. Al inicio del estudio, se esperaba que la cantidad de agua por si sola fuera considerablemente importante; sin embargo agregarle los demás beneficios que el bosque brinda dentro de la cuenca lo hacen significativo. El ahorro de agua en el proceso de evapotranspiración, la capacidad de limpiar el aire, mejorar la calidad de agua y reducir la erosión y la cantidad de agua adicionada de precipitación horizontal hacen que la presencia de estos bosques de pino sean de importancia significativa para las comunidades aledañas a ellos. Otro elemento importante de mencionar es la época en que se da, época seca. Este aporte no es de mayor relevancia para este sitio por las altas precipitaciones que se produjeron durante el estudio, pero en zonas más secas esta cantidad puede representar un mayor porcentaje y por ende mayor importancia.

6. RECOMENDACIONES

Para zonas de fuertes vientos, la metodología de verificación, de cuadros de plásticos de 3 m x 3 m, utilizada en esta investigación no es recomendada. Si fuera necesario usarla, se recomienda colocar una base de un material duro que no ceda antes el viento o bien colocar una mayor cantidad de plásticos de menor tamaño.

Por limitados recursos en esta investigación no se tomaron datos en más sitios. Sin embargo, para una futura investigación se recomienda tener sitios en diferentes altitudes de tal modo que se tenga un gradiente continuo hasta el punto más alto del cerro y de esta manera ver de manera más concreta la relación entre altitud y presencia de neblina. De igual manera colocar más sitios en los diferentes rumbos con mediciones de velocidad y dirección del viento para poder plasmar las diferencias entre los vientos provenientes del Pacífico y del Caribe.

Como se mencionó al inicio del documento, los bosques húmedos son de los ecosistemas más amenazados por tala, es por eso que son necesarios más estudios encaminados a buscar una recuperación del ecosistema y los servicios este brinda. La reforestación con especies eficientes en el proceso de intercepción de precipitación horizontal, es una de las alternativas para lograrlo.

Es necesario prestar atención a otras zonas que presentan similares características, como por ejemplo el cerro Montecristo y el Coloso de Los Volcanes, que lleva su nombre porque alberga tres grandes volcanes. Estos dos sitios están dentro de la categoría de Parques Nacionales por lo que se le da un manejo sostenible que permite la preservar el estado natural de las comunidades bióticas y fenómenos geomorfológicos únicos de estos sitios; sin embargo, no se ha generado información en cuanto a la relación que hay entre estas zonas boscosas y la precipitación horizontal, elemento que puede servir a la hora de prevenir la presión demográfica que actualmente sufren.

Es necesario generar más estudios de la importancia no sólo hidrológica, sino de biodiversidad, ecosistemas únicos que no se presentan en el resto del país, captura de carbono, erosión del suelo, que ayuden a que esta área ingrese al Sistema de Áreas Naturales Protegidas. De esta manera, también se podrá aprovechar el potencial turístico de la zona,

generar y diversificar más empleos en la zona y reducir la presión por el recurso boscoso para agricultura.

Ya estudios anteriores han demostrado la alta vulnerabilidad de esta zona, por sus fuertes pendientes y actividad sísmica del país, por lo que es necesario una zonificación de uso de suelo donde por una parte se reduzca la vulnerabilidad a sufrir deslizamientos de las personas que habitan esta zona, pero que también ayude a proteger el recurso boscoso.

7. LITERATURA CITADA

- Arriaga Frías, A; Cruz Cuzmán, G; Ortíz Montiel, G. 1999. Relaciones hídricas en las plantas. Teoría y ejercicios. México. 133 p.
- Ataroff, M; Rada, F. 2000. Deforestation Impact on Water Dynamics in a Venezuelan Andean Cloud Forest. *Ambio*. Vol 29. No.7:440-444.
- Banco Mundial. 2005. Project Appraisal Document in a Proposed Grant from the Global Environment Facility Trust Fund in the Amount of US\$5.0 Million to the Republic of El Salvador for a Protected Areas Consolidation and Administration Project (en línea). Consultado en 15 oct. 2009. Disponible en: http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2005/11/09/000090341_20051109101216/Rendered/PDF/33759.pdf
- Blackman, A; Ávalos-Sartorio, B; Chow, J; Aguilar, F. 2006. Pérdida de los bosques en las áreas de cultivo del café de sombra en El Salvador (en línea). Consultado 12 de oct. 2009. Disponible en http://www.rff.org/rff/Events/upload/24036_1.pdf
- Bruijnzeel, L.A. & Proctor, J. (1995) Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forests: what do we really know? En: Hamilton, LS; Juvik, JO y Scatena, FN. eds. *Tropical Montane Cloud Forests. Ecological Studies*. 110 ed. Springer Verlag, Nueva York. 38-78 p.
- Bruijnzeel, S. 2001a. Hydrology of Tropical Montane Cloud Forests: A Reassessment. Second International Colloquium on Hydrology and Water Management in the Humid Tropics. 352- 440 p.
- Bruijnzeel, S. 2001b. Tiempo decisivo para las selvas de neblina. UNESCO. 41 p. (Serie IHP Programa Trópicos Húmedos no. 13)
- Bruijnzeel, S; Werner, E; Burkard, R. 2005. Fog as a Hydrologic Input. *Encyclopedia of Hydrological Science*. 559-582 p.

- Bryant, M; Bhat, S; Jacobs, J. 2005. Measurements and modeling of throughfall variability for five forest communities in the southeastern US. *Journal of Hydrology*. 312: 95 – 108 .
- Butler, DR; Huband, ND. 1985. Throughfall and stem-flow in wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*. 35:329 – 338.
- Cáceres Moreno, G. 1981. Importancia hidrológica de la intercepción horizontal en un bosque muy húmedo premontano en Balalaica, Turrialba, Costa Rica. Tesis M. Sc. Turrialba, CR. UCR y CATIE. 112 p.
- Calder, IR; Wright, IR; Murdiyarso, D. A study of evaporation from tropical rain forest – west Java. 1986. *Journal of Hydrology*. 89:13-31.
- Calder, I. 2005. *Blue revolution; Integrated Land and Water Resource Management*. 2 ed. Londres, GB. Earthscan. 353 p.
- Calder, I; Hofer, T; Vermont, S; Warren, P. 2007. Hacia una nueva comprensión de bosques y el agua. *UNASYLVA Revista Internacional de silvicultura e Industrias forestales*. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 58(229): 3-10.
- Calheiros de Miranda, RA; Butler, DR. 1986. Interception of rainfall in a hedgerow apple orchard. *Journal of Hydrology*. 87: 245 – 253.
- Cantú Silva, I. y González Rodríguez, H. 2005. Pérdidas por intercepción de la lluvia en tres especies del matorral submontano. *Ciencia UANL (Universidad Autónoma de Nuevo León)*. 8(001): 80 - 85.
- Cavelier, J., Goldstein, G., 1989. Mist and fog interception in elfin cloud forests in Colombia and Venezuela. *J. Trop. Ecol.* 5, 309– 322 p.
- Cavelier, J; Solis, D; Jaramillo, M. 1996. Fog interception in montane forest across the Central

Cordillera of Panamá. *Journal of Tropical Ecology*. 12:357 – 359.

Cifuentes Jara, M. 2009. ABC del cambio climático en Mesoamérica. Grupo Cambio Climático, CATIE. Turrialba, CR. 57 p.

Clarke, RT. 1986. The interception process in tropical rain forests: A literatura review and critique. *Acta Amazonica*. 16/17: 225-238.

COSUDE (Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación). 2003. Análisis de amenazas y propuesta de Plan de reducción Municipal de Desastres. San Salvador, ES. 74 p.

De Groot, R., M. Wilson y R. Boumans (2002) A typology for the classification, descriptions and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41: 393-408.

Doumenge, C., Gilmour, D.A., Ruiz Perez, M. y Blockhus, J. (1995) Tropical montane cloud forests: conservation status and management issues. En: L.S. Hamilton, J.O. Juvik & F.N. Scatena, eds. *Tropical Montane Cloud Forests*. Ecological Studies. 110 ed. Springer Verlag, Nueva York. 24-37 p.

Ekern, P. C. 1964. Direct Interception of Cloud Water on Lanaihale, Hawaii. *Proceedings of Soil Science Society of America*. 28: 417-421.

Fahey, BD. 1964. Throughfall and interception of rainfall in a stand of Radiata Pine. University of Otago, NZ. 10 p.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2005a. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2005: Hacia la ordenación forestal sostenible (en línea). Consultado 12 de oct 2009. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0400s/a0400s.pdf>

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2005b. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2005: 15 resultados claves (en línea). Consultado 12 de oct 2009. Disponible en: <http://www.fao.org/forestry/foris/data/fra2005/kf/common/GlobalForestA4-SPsmall.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2005c. Global tables (en línea). Consultado en 12 de oct 2009. Disponible en: <http://www.fao.org/forestry/fra/fra2005/en/>
- Foster, P. 2001. The potencial negative impacts of global climate change on tropical montane cloud forests. *Earth-Science Reviews*. Misasa, JP. 55:73-106
- Hamilton, L.S; King, P.N. 1983. Tropical forested watersheds. Hydrologic and soils response to major uses or conversions. Westview Replica Education, Westview Press, Boulder, Colorado. 168 p.
- Heuvelodop, J; Pardo Tasies, J; Quirós Conejo, S; Espinoza Prieto, L. 1986. Agroclimatología Tropical. EUNED (Editorial Universidad Estatal a Distancia). San José, CR. Consultado en 6 de oct 2009. Disponible en: http://books.google.co.cr/books?hl=en&lr=lang_en|lang_es&id=DD05AfVeRs0C&oi=fnd&pg=PR7&dq=bosques+y+temperatura+del+suelo&ots=bATh_ieThQ&sig=s1BGz7uKC2i8zZVonH9xLtWiSSY#v=onepage&q=bosques%20y%20temperatura%20del%20suelo&f=false
- Holder, C. 2004. Rainfall interception and fog precipitation in a tropical montane cloud forest of Guatemala. *Forest Ecology and Management* 190: 373–384
- Holdridge, LR. 1978. Ecología basada en zonas de vida. IICA (Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas). San José, CR. 216 p.

- Holwerda, F; Burkard, R; Eugster, W; Scatena, F.N; Meesters, A.G.C.A; Buijnzeel, L.A. 2006. Estimating fog deposition at a Puerto Rican elfin cloud forest site: comparison of the water budget and eddy covariance methods. *Hydrological Processes*. 20: 2669-2692.
- Huber, A; Oyarzún, C. fecha. Precipitación neta e intercepción en un bosque adulto de *Pinus radiata* (D. Don). *Bosque* 5 (1): 13 - 20.
- Jaramillo R; Chaves C, B. 1999. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) al sol y bajo sombra. *Cenicafé*. 50 (2): 97 – 105.
- Jiménez Otórola, F. 1986. Balance hídrico con énfasis en percolación de dos sistemas agroforestales: café – poró y café – laurel, en Turrialba, Costa Rica. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Educación). 104 p.
- Jong, Carme de. 2005. The contribution of condensation to the water cycle under high-mountain conditions. B.E.R.G. (Institut für Geographisches Wissenschaften). Germany. 17 p.
- Juvik; Ekern. 1978. A Climatology of Mountain Fog on Mauna Loa, Hawaii Island. Univeridad de Hawaii. 73 p. (Reporte técnico no. 118).
- Kämmer, F. 1974. Klima und vegetation auf Tenerife, besonders im Hinblick auf den Nebelniederschlag. *Scripta Geobotanica*. Universidad Gottingen. 78 p.
- Kappelle, M; Brown, A. D. 2001. Bosques nublados del neotrópico. INBio (Instituto Nacional de Biodiversidad). CR. 1 ed. 704 p.
- Keizer, JJ; Corninck; HL; van Dijck, SJE; Coelho, COA; Warmerdam, PMM. 2002. Interception in pine and eucalypt forest in Central Portugal: Inicial measurement and modeling results. *UNESCO technical Documents in Hydrology*. 77:53 – 58.

- La Bastille, A. & Pool, D.J. (1978). On the need for a system of cloud-forest parks in Middle America and the Caribbean. *Environmental Conservation* 5:183-190.
- Lloyd, CR; Marques F, A. 1988. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*. 42: 63 – 73.
- Lloyd, CR. 1990. The temporal distribution of Amazonian rainfall and its implications for forest interception. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 116: 1487 – 1494.
- Manokaran, N. 1979. Stemflow, throughfall and rainfall interception in a lowland tropical rain forest in peninsular Malaysia. *The Malaysian Forester*. 42(3): 174-200.
- Manson, R. H. 2004. Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques* 10 (1): 3-20.
- Martínez, A. 2006. Catálogo de mapas de los municipios de La Palma y San Ignacio: Una aproximación al Ordenamiento Territorial y Riesgos naturales. ES. 17 p.
- McJannet, D; Wallace, J; Fitch, P; Disher, M; Reddell, P. 2007. Water balance of tropical rainforest canopies in north Queensland, Australia. *Hydrological Processes*. no. 21:3473-3484.
- Nye, PH. 1961. Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest. *Plan and soil*. 13 (4): 333-345-
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2010. El Niño/La Niña Hoy (en línea). Consultado 24 de nov. 2010. Disponible en: http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/documents/El_Niño_Es_000.pdf

- Oyarzún, C; Nahuelhual, L; Núñez, D. 2005. Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica (en línea). Revista Ambiente y Desarrollo de CIPMA. 20(3) – 21(1): 88-95. Consultado 12 de oct. 2009. Disponible en: http://www.cipma.cl/RAD/2004/3_oyarzun.pdf
- Roach, J. 2001. Cloud Forests Fading in the Mist, Their Treasures Little Known (en línea). National Geographic News. Consultado en 8 de oct 2009. Disponible en: http://news.nationalgeographic.com/news/2001/08/0813_cloudforest.html
- Rutter, AJ; Morton, AJ; Robins, PC. 1974. A predictive model of rainfall interception in forests: II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. London. 367 -
- Sánchez, F. 2005. Evapotranspiración (en línea). Consultado en: 20 de nov. 2010. Disponible en: <http://web.usal.es/~javisan/hidro/>
- Schemenauer, R; Cereceda, P. 1994. A Proposed Standard Fod Collector for the Use in High-Elevation Regions. Journal of Applied Meteorology. Vol. 33: 1313-1322
- Segerer, C; Villodas, R. 2006. Hidrología I: Evaporación, transpiración y evapotranspiración (en línea). Universidad Nacional de Cuyo. Consultado en: 20 de nov. 2010. Disponible en: http://www.fing.uncu.edu.ar/catedras/hidrologia_i/teoria/H1_06_U06.PDF
- Segura, O; Kaimowitz, D; Rodríguez, J. 1997. Políticas Forestales en Centro América: Análisis de las Restricciones para el Desarrollo del Sector Forestal (en línea). 1 ed. San Salvador, ES. Consultado 12 oct. 2009. Disponible en <http://books.google.hn/books?hl=es&lr=&id=v7oqAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PA179&dq=bosque+nublado+de+el+salvador&ots=GRhpk9by1&sig=LcmJ7cRHbS8NTf9DOG2ZuoHDRCw#v=onepage&q=&f=false>
- SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales). 2009. Consultado en 18 oct. 2009. Disponible en: <http://www.snet.gob.sv>

- SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales). 2006. Consultado en 20 oct. 2010. Disponible en: <http://atlas.snet.gob.sv/snet/?q=node/176>
- Soihet, C. 2000. Bibliografía comentada: Cambios en la Cobertura Forestal, El Salvador (en línea). Programa de Evaluación de los Recursos Forestales. Roma, IT. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Consultado 12 oct. 2009. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/ak238s/ak238s00.pdf>
- Stadtmüller, T. 1987a. Los Bosques Nublados en el Trópico Húmedo. UNA (Universidad de las Naciones Unidas). 85 p.
- Stadtmüller, T. 1987b. Los Bosques Nublados en el Trópico Húmedo: distribución e importancia hidrológica. Curso corto de Bases hidrológicas para el manejo de cuencas. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Educación). Turrialba, CR. s.p.
- Stadtmüller, T; Agudelo, N. 1990. Amount and variability of cloud moisture input in a tropical cloud forest. *Hydrology in Mountainous Regions*. no. 193: 25-32
- Stadtmüller, T. 1994. Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Educación). Turrialba, CR. 62 p.
- Swank, W. s.f. The influence of rainfall interception on streamflow. North Carolina, USA. 12 p.
- Tobón, C., y Arroyave, F. 2007. «Inputs by fog and horizontal precipitation to the páramo ecosystems and their contribution to the water balance». *Fourth International Conference on Fog Collection and Dew*. La Serena, Chile, 2007. Proceedings, pp. 233-236.

- Tobón, C. 2009. Los bosques andinos y el agua. Serie investigación y sistematización #4. Programa Regional ECOBONA – IINTERCOOPERATION, CONDESAN. Quitó, Ec. 64 p.
- Turcios Carrasco, W. 1995. Producción y valoración económica del componente hídrico y forestal de los robledales de altura bajo intervenciones silviculturales. Tesis M. Sc. Turrialba, CR. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Educación). 97 p.
- UNAM (Universidad Nacional de México). s.f. Evaporación y transpiración (en línea). Textos Universitarios. Consultado en 16 de nov. 2010. Disponible en: <http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/hidrogeografia/cp3.pdf>
- Villón, M. 2002. Hidrología. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Educación). Turrialba, CR. 399 p.
- Vogelmann, H. 1973. Fog Precipitation in the Cloud Forest of Eastern Mexico. BioScience. Vol. 23 no. 23: 96-100
- Went, FW. 1955. Fog, mist, dew, and other sources of water. Yearbook of agriculture 1955. USDA (United States Department of Agriculture). 103 – 109 p.
- Wicht, CL. 1961. Volumetric determination of rainfall in hydrological research. En: Interafrican Conference of Hydrology. Nairobi. Commission for Technical Cooperation in Africa, South of Sahara. 94 – 99 p.
- Zadroga, F. 1981. The Hydrological Importance of a Montane Cloud Forest Area of CR. Tropical Agricultural Hydrology. 59 – 73 p.

Zambrana Rivera, H. 1975. Comparación y evaluación de la intercepción de lluvias en dos tipos de bosques tropicales. Tesis M. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 61 p.

Zárate Hernández, E. 2005. Comportamiento de los “empujes fríos” que alcanzan Centroamérica y el Caribe. Comité Regional de Recursos Hidráulicos del Istmo centroamericano (CRRH) y Universidad de Costa Rica. San José, CR. 24 p.