



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**LA AFECTACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL EN EL BALANCE HÍDRICO DE LOS SUELOS
EN LA SUBCUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AGUA SALUD -PANAMÁ.**

EDNA CATALINA RODRÍGUEZ GUERRA

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

GIRARDOT

2016



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**LA AFECTACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL EN EL BALANCE HÍDRICO DE LOS SUELOS
EN LA SUBCUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AGUA SALUD -PANAMÁ.**

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL

EDNA CATALINA RODRÍGUEZ GUERRA

DIRECTOR

**JAN M.H. HENDRICKX, PH.D., IR.
PROFESOR DE HIDROLOGÍA DE NEW MÉXICO TECH
SOCORRO NM EE.UU.**

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
GIRARDOT
2016**



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

Nota de aceptación

Firma del Jurado:

Firma del Jurado:



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

AGRADECIMIENTOS

Agradezco ante todo a Dios, quien me brindó la sabiduría y las capacidades necesarias para llevar a cabo con rotundo éxito la carrera de Ingeniería Ambiental. De igual manera a mis padres, que con sus esfuerzos me apoyaron y brindaron todo para culminar mis estudios.

Gracias al Dr. Jan M.H. Hendrickx y a mi tía Graciela Rodríguez, quienes me impulsaron y guiaron en todo el proceso, por su tiempo y paciencia. Sin duda, sus enseñanzas fueron fundamentales para la elaboración de este trabajo.

Muchas son las personas que me respaldaron para que este trabajo se pudiera concluir. Sin el apoyo moral, intelectual, afectivo y económico recibido hubiera resultado imposible lograr con este objetivo. A todos los involucrados, expreso un sincero agradecimiento y espero pronto retribuirles.

Agradezco al Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI) de Panamá en especial, a las personas que lideran el proyecto Agua Salud; por haberme facilitado el acceso a las instalaciones, por brindarme sus conocimientos y experiencias.

A todos los docentes que orientaron esta maravillosa carrera e inculcaron saberes, que me permitieron el crecimiento personal durante los años de formación académica.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	11
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
3.	JUSTIFICACIÓN.....	15
4.	OBJETIVOS	16
4.1	Objetivo General.....	16
4.2	Objetivos Específicos	16
5	MARCO REFERENCIAL	17
5.1	Marco teórico.....	17
5.2	Marco conceptual	22
5.3	Marco legal.....	27
6	DIAGNÓSTICO GENERAL DE LA SUBCUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AGUA SALUD ..	28
6.1	Área de estudio	28
6.2	Aspectos geomorfológicos y erosión	29
6.3	Marco geológico	30
6.4	Hidrología.....	32
6.5	Aspectos edafológicos.....	32
6.6	Clima	33
6.7	Uso actual y cobertura vegetal	35
7	METODOLOGÍA.....	36
7.1	Formulación matemática	38
7.2	Simulación	40
7.2.1	Descripción de los parámetros de entrada HYDRUS-1D.....	43
7.3	Datos meteorológicos	49
7.4	Tipo de vegetación	50
7.5	Descripción muestras de suelo.....	53
8	RESULTADOS	55



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

9	CONCLUSIONES.....	80
10	RECOMENDACIONES.....	81
11	BIBLIOGRAFÍA.....	82
	ANEXOS.....	89
	Anexo1. Mapa Cobertura Vegetal presente en el área de estudio.	89



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. LOS COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO EN DOS CUENCAS ALEDAÑAS CON COBERTURA DE BOSQUE Y POTRERO EN EL AÑO HIDROLÓGICO DEL 4 DE MAYO 2009 HASTA EL 14 DE MAYO 2010	12
TABLA 2. ZONAS DE MUESTREO (BOSQUE SECUNDARIO ANTIGUO CON MÁS DE 80 AÑOS, POTRERO CON MÁS DE 50 AÑOS)	37
TABLA 3. PARÁMETROS DE VAN GENUCHTEN PARA OXISOL MEDICIONES EN EL CAMPO POR TOMASELLA Y HODNETT (1996)	44
TABLA 4. MASA DE RAÍCES EN LAS 4 ZONAS DE MUESTREO	45
TABLA 5. DESCRIPCIÓN DE LOS PERFILES DEL SUELO EN LAS 4 ZONAS DE MUESTREO	53
TABLA 6. DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN DURANTE EL AÑO. EL PERIODO SECO (ENERO – ABRIL) Y EL PERIODO HÚMEDO (MAYO – DICIEMBRE)	61
TABLA 7. VALORES DE PRECIPITACIÓN (P), EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET _r), INTERCEPCIÓN (I) Y TRANSPIRACIÓN (T) PARA EL POTRERO Y BOSQUE DURANTE LOS PERIODOS SECO Y HÚMEDO.....	63
TABLA 8. COMPARACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HIDROLÓGICO EN UN BOSQUE Y POTRERO EN LA SUBCUENCA DE AGUA SALUD SIMULADOS POR HYDRUS-1D Y MEDIDOS EN EL CAMPO POR OGDEN ET AL. (2013) DURANTE EL AÑO 2009	64



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. LOCALIZACIÓN REGIONAL DEL ÁREA DE ESTUDIO	28
FIGURA 2. SUBCUENCA RÍO AGUA SALUD	28
FIGURA 3. LOCALIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO DENTRO DEL PARQUE NACIONAL SOBERANÍA	29
FIGURA 4. MAPA GEOLÓGICO SUBCUENCA HIDROGRÁFICA RÍO AGUA SALUD	31
FIGURA 5. MAPA DE PRECIPITACIÓN MEDIA DE LA REPÚBLICA DE PANAMÁ	34
FIGURA 6. TEMPERATURA EN PANAMÁ.....	34
FIGURA 7. SATURACIÓN DEL FLUJO SUPERFICIAL DEBIDO A LA CORRIENTE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	41
FIGURA 8. SITUACIONES EN LAS QUE LA SATURACIÓN DE FLUJO SUPERFICIAL PUEDE SURGIR EN LADERAS FUERA DE LAS ÁREAS CERCANAS A LOS ARROYOS	42
FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DE LA MASA DE LAS RAÍCES EN POZOS DE PASTOREO Y DEL SUELO DEL BOSQUE ..	48
FIGURA 10. PRECIPITACIÓN PARA LOS AÑOS 2002 AL 2015	49
FIGURA 11. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET _r) PARA LOS AÑOS 2002 AL 2015	50
FIGURA 12. UBICACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO DENTRO DE LA REPÚBLICA DE PANAMÁ, JUNTO CON EL USO Y COBERTURA DEL SUELO	51
Figura 13. El paisaje de Agua Salud y sus bosques secundarios	52
FIGURA 14. LA DIFERENCIA ET _r -P ES POSITIVA EN EL PERIODO SECO PERO NEGATIVA EN EL PERIODO HÚMEDO	65
FIGURA 15. LA EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA EL POTRERO DURANTE 2002-2015	66
FIGURA 16. LA EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA EL BOSQUE DURANTE 2002-2015	67
FIGURA 17. ALMACENAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO DE LA ZONA DE LAS RAÍCES (POTRERO) DURANTE 2002-2015	68
FIGURA 18. ALMACENAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO DE LA ZONA DE LAS RAÍCES (BOSQUE) DURANTE 2002-2015	69
FIGURA 19. LA INFILTRACIÓN SUPERFICIAL/PRECIPITACIÓN DIRECTA DURANTE 2002-2015 EN EL POTRERO	70
FIGURA 20. LA INFILTRACIÓN SUPERFICIAL/PRECIPITACIÓN DIRECTA DURANTE 2002-2015 EN EL BOSQUE..	70
FIGURA 21. LA INFILTRACIÓN PROFUNDA EN EL ÁREA DE POTRERO DURANTE 2002-2015	71
FIGURA 22. LA INFILTRACIÓN PROFUNDA EN EL ÁREA DE BOSQUE DURANTE 2002-2015	71
FIGURA 23. LOS FLUJOS ACUMULATIVOS DE LA PRECIPITACIÓN (P), EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET) E INFILTRACIÓN PROFUNDA (IP) EN EL POTRERO DURANTE 2002-2015.....	72
FIGURA 24. LOS FLUJOS ACUMULATIVOS DE LA PRECIPITACIÓN (P), INFILTRACIÓN SUPERFICIAL (IS), EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET), INFILTRACIÓN PROFUNDA (IP), INTERCEPCIÓN (I) Y TRANSPIRACIÓN (T) EN EL BOSQUE DURANTE 2002-2015	73
FIGURA 25. LA EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA EL POTRERO DURANTE 2009	74
FIGURA 26. LA EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA EL BOSQUE DURANTE 2009	74



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

FIGURA 27. ALMACENAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO DE LA ZONA DE LAS RAÍCES PARA EL POTRERO DURANTE 2009	75
FIGURA 28. ALMACENAMIENTO DE AGUA EN EL SUELO DE LA ZONA DE LAS RAÍCES PARA EL BOSQUE DURANTE 2009	76
FIGURA 29. LA INFILTRACIÓN SUPERFICIAL/PRECIPITACIÓN DIRECTA DURANTE 2009 EN EL POTRERO	77
FIGURA 30. LA INFILTRACIÓN SUPERFICIAL/PRECIPITACIÓN DIRECTA DURANTE 2009 EN EL BOSQUE.....	77
FIGURA 31. LA INFILTRACIÓN PROFUNDA (IP) EN EL POTRERO DURANTE 2009.....	78
FIGURA 32. LA INFILTRACIÓN PROFUNDA (IP) EN EL BOSQUE DURANTE 2009	78
FIGURA 33. LOS FLUJOS ACUMULATIVOS DE LA PRECIPITACIÓN (P), EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET) E INFILTRACIÓN PROFUNDA (IP) EN EL POTRERO DURANTE EL AÑO HIDROLÓGICO 2009	79
FIGURA 34. LOS FLUJOS ACUMULATIVOS DE LA PRECIPITACIÓN (P), INFILTRACIÓN SUPERFICIAL (IS), EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET), INFILTRACIÓN PROFUNDA (IP), INTERCEPCIÓN (I) Y TRANSPIRACIÓN (T) EN EL BOSQUE DURANTE EL AÑO HIDROLÓGICO 2009	79



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

RESUMEN

El balance hídrico de los bosques tropicales es de suma importancia para el clima global porque esta cobertura vegetal mantiene una evapotranspiración anual alrededor de 155 cm, mucho más que cualquier otra cobertura (Calder, 1999; Zhang et al, 2001). Debido a un aumento global de la demanda para alimentos, forraje y combustible, los bosques tropicales están siendo convertidos rápidamente en tierras agrícolas y actualmente las coberturas agrícolas prevalecen en muchas cuencas en el trópico. La Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá ha perdido cerca de la mitad de sus bosques, afectando la gestión sostenible de sus recursos hídricos. Este trabajo consiste en investigar la afectación de la cobertura vegetal en el balance hídrico de la Subcuenca Hidrográfica del Río Agua Salud en Panamá utilizando el modelo Hydrus-1D para simular el flujo de agua a través de dos coberturas típicas durante el periodo 2002–2015. La cobertura de bosque representa las condiciones hídricas antes de la deforestación, mientras que la de potrero representa la conversión en tierra agrícola. Como primera medida Hydrus-1D fue validado para confirmar que sus estimaciones de evapotranspiración e infiltración superficial y profunda fueran correctas. La validación se hizo usando los balances hídricos medidos en una cuenca con bosque y otra al lado con potrero (50%) y bosque (50%) durante el año hidrológico del 4 mayo de 2009 hasta el 14 mayo de 2010.

El modelo Hydrus-1D logró analizar la dinámica de los procesos de evapotranspiración e infiltración profunda en un bosque y potrero tropical. El comportamiento hidrológico de las dos coberturas vegetales fue similar, respecto a los datos presentados en la literatura.

Este trabajo demuestra que Hydrus-1D puede ser usado para el análisis del balance hídrico en la Cuenca del Canal de Panamá.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

1. INTRODUCCIÓN

La falta de agua durante los periodos de sequía prolongada está afectando el Canal de Panamá reduciendo el nivel del cauce de navegación y dificultando su óptima operación; por tal motivo, la autoridad del Canal de Panamá, proyecta maximizar el almacenamiento de agua subterránea, para mantener caudales razonables en las quebradas y ríos que alimentan la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá, durante la estación seca.

El almacenamiento de agua subterránea durante los periodos de sequía depende del balance hídrico en la Subcuenca Hidrográfica, balance que se encuentra en estrecha relación con la cobertura vegetal que principalmente consiste de bosque y potrero; por tal razón, el Centro de Ciencias Forestales del Trópico (CTFS) del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI), inició una detallada investigación sobre la influencia de la reforestación y las prácticas de manejo de suelo, sobre los principales servicios que prestan los ecosistemas tropicales (agua, carbono y biodiversidad).

Como parte de la investigación adelantada por el Instituto, se desarrolló el proyecto de Agua Salud para investigar las relaciones entre la cobertura vegetal y el balance hídrico. Ogden, et al¹ han medido diferencias grandes entre los componentes del balance hídrico en una cuenca con bosque y otra al lado con potrero (50%) y bosque (50%). Por ejemplo, en el año hidrológico del 4 de mayo 2009 hasta el 14 de mayo 2010 la cuenca recibió 3078 mm de lluvia que fue compartido entre caudal de salida, evaporación de intercepción, transpiración, y almacenamiento subterráneo como se muestra en la Tabla 1.

¹ OGDEN, et al. Sponge effect paper. Panamá, 2013.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

Tabla 1. Los componentes del balance hídrico en dos cuencas aledañas con cobertura de bosque y potrero en el año hidrológico del 4 de mayo 2009 hasta el 14 de mayo 2010

Componentes del balance hídrico	Bosque	Potrero/Bosque 50%/50%
Precipitación P (mm)	3078	3078
Intercepción I (mm)	422	0
Precipitación Directa PD=P-I (mm)	2656	3078
Caudal de Salida Q(mm)	1164	1686
Evapotranspiración Total ET=I+T (mm)	1451	874
Transpiración T=ET-I (mm)	1029	874
Cambio en almacenamiento ΔG (mm)	71	40
Residual P-Q-ET- ΔG (mm)	389	373
Residual (% de P)	13%	12%
Residual (% de Q)	33%	22%
Residual (% de ET)	27%	43%
Residual (% de T)	38%	43%

Fuente: Ogden, et al. (2013)

Este año hidrológico fue aproximadamente un año con precipitación promedia. El residual por el error de clausura del balance hidrológico es alrededor de 13-12% de la precipitación, 33% y 22% del caudal de salida, 27% y 43% de la evapotranspiración y 38% y 43% de la transpiración, respectivamente, en el bosque y potrero/bosque. Es importante saber la causa de éstos residuales para el caudal de salida, la evapotranspiración y la transpiración. Un método para analizar las causas es el uso de modelos. La modelación del caudal de salida necesita un modelo hidrológico completo en dos o tres dimensiones para tener en cuenta los procesos de flujo en las laderas (Figura 7) y cabeceras (Figura 8) que dominan la topografía del proyecto de Agua Salud. Un ejemplo de dicho modelo es el de “Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis (GSSHA) for Watershed Modeling System” por Downer, et al². La implementación de GSSHA es un esfuerzo de muchos

² DOWNER, et al. Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis (GSSHA) User's Manual. 2006.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

meses con computadoras avanzadas y necesita entrenamiento especializado. Además, el grupo del Dr. Ogden está realizando esta labor como parte del proyecto. Para la evapotranspiración también hay algoritmos muy sofisticados que usan imágenes satelitales para áreas grandes; tal es el caso del algoritmo “Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration (METRIC)” Allen et al³ que fue usado por el Dr. Hendrickx en Panamá para una imagen de Landsat. Pero para analizar la evapotranspiración durante un periodo de años es necesario usar modelos hidrológicos, Hendrickx, et al⁴. En este trabajo de grado se usa el modelo HYDRUS-1D de una dimensión para analizar la evapotranspiración en dos sitios que representan un bosque de 80 años y un potrero de al menos 50 años. Este modelo hidrológico utiliza la ecuación de Richards para la simulación del balance hidrológico en suelos no-saturados incluyendo la infiltración de las lluvias y la evapotranspiración por la vegetación. La información obtenida orientará las decisiones que se tomen para el manejo de la Subcuenca Agua Salud, y en extensión a otras cuencas tropicales del mundo.

³ ALLEN, et al. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC, 2011.

⁴ HENDRICKX, et al. Benchmarking optical/thermal satellite imagery for estimating evapotranspiration and soil moisture in decision support tools. 2016.



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En todas las zonas tropicales húmedas del mundo, la deforestación ha causado una disminución en los caudales de los ríos y quebradas durante el periodo seco y como consecuencia, un déficit en el almacenamiento de agua.⁵ Esta situación es más grave en la Cuenca del Canal de Panamá porque ha incrementado sustancialmente la demanda debido a su ampliación, y al crecimiento poblacional. Actualmente, la Subcuenca Hidrográfica del Río Agua Salud, se encuentra expuesta a procesos de deforestación por lo que es menester tomar acciones, sobre el tipo de cobertura vegetal para facilitar la infiltración y garantizar el almacenamiento de agua durante el periodo seco.

Dada la anterior descripción del problema, la investigación pretende establecer ¿Qué tipo de cobertura vegetal es más favorable para garantizar la infiltración, controlar la evapotranspiración y mejorar el almacenamiento y aporte de agua en la Subcuenca Hidrográfica del Río Agua Salud?

⁵ BRUIJNZEE, L. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?. 2004 p. 217

³ Ibid., p. 5



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

3. JUSTIFICACIÓN

La Subcuenca hidrográfica del río Agua Salud, pertenece a la Gran Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá, donde se capta, almacena y suple parte del agua necesaria para el funcionamiento de la vía interoceánica y el abastecimiento de las principales ciudades y centros poblados adyacentes al canal.

La sequía acentuada durante los últimos años, ha producido un déficit de agua en la cuenca hidrográfica, desencadenando problemas que afectan la economía del país; por tal motivo, es indispensable garantizar la cantidad y calidad de agua de la subcuenca para el bienestar económico, social y ambiental de los panameños. En este sentido, se debe comprender mejor el funcionamiento de la subcuenca, los procesos que la alteran y obtener información vital para guiar las decisiones que se tomen para administrarla.

La investigación adelantada, permitirá conocer cómo la cobertura vegetal en la subcuenca, afecta la disponibilidad de agua. El estudio aportará información valiosa para guiar las decisiones que se tomen, en los aspectos que contribuyan a maximizar el almacenamiento de agua; en especial, con el establecimiento de la cobertura vegetal adecuada.

La aplicación del programa Hydrus-1D, sobre la subcuenca hidrográfica permite el conocimiento de los procesos de infiltración y evapotranspiración. Los resultados ayudarán a minimizar las prácticas inadecuadas de manejo en la subcuenca; además de conocer cómo la cobertura vegetal afecta los procesos de infiltración y evapotranspiración en los escenarios de cobertura de bosque y potrero.



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Determinar cómo la cobertura vegetal afecta los procesos de infiltración y evapotranspiración en la Subcuenca Hidrográfica del Río Agua Salud.

4.2 Objetivos Específicos

- Recopilar los datos de entrada para las simulaciones del balance hídrico en los suelos con el modelo HYDRUS1D.
- Simular por medio de Hydrus-1D el flujo de agua a través del perfil de suelo para cuantificar la infiltración y evapotranspiración bajo las coberturas vegetales de bosque y potrero.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

5 MARCO REFERENCIAL

5.1 Marco teórico

Se han realizado estudios anteriores, no obstante la información es limitada. Sin embargo C.P. Ghimire et al⁶, elaboraron un estudio llamado: Negative trade-off between changes in vegetation water use and infiltration recovery after reforesting degraded pasture land in the Nepalese Lesser Himalaya en el cual relacionaron la cantidad de infiltración proporcionada por dos tipos de vegetación (Pasto, Plantación de Pinos) observaron la disminución de los flujos de la estación seca en el área de estudio y dedujeron que la infiltración es mayor en los pinos. Recomiendan que se debe realizar una mejor gestión forestal y de suelos que promuevan la infiltración.

L.A. Bruijnzeel⁷ en su trabajo denominado: Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? muestra que las medidas de reforestación y de conservación de suelo sirven para disminuir los picos de caudales máximos. No obstante, no se ha demostrado que dichas prácticas promuevan al incremento en el almacenamiento subterráneo de agua. Éste ha sido considerado uno de los mayores problemas de la cuenca que requiere de más investigación junto con los efectos de la reforestación de la cuenca parte alta en la producción de los sedimentos río abajo.

Jefferson Hall, et al⁸. Realizaron un artículo titulado: The ecology and ecosystem services of native trees: Implications for reforestation and land restoration in Mesoamerica. Basado en una recopilación de diferentes artículos expuestos en una conferencia llevada a cabo en Panamá en Enero de 2010 para evaluar el conocimiento de la reforestación con especies nativas y los servicios de los ecosistemas asociados. A su vez, hacen un llamado para la continua investigación de la interacción árbol-ambiente biofísico.

⁶ GHIMIRE C, et al. Negative trade-off between changes in vegetation water use and infiltration recovery after reforesting degraded pasture land in the Nepalese Lesser Himalaya. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4933-4949, doi:10.5194/hess-18-4933-2014, 2014.

⁸ HALL J, et al. The ecology and ecosystem services of native trees: Implications for reforestation and land restoration in Mesoamerica, 2010 p. 1553



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

K.E. Clark, et al⁹. Realizaron un estudio llamado: The hydrological regime of a forested tropical Andean catchment. Hacen énfasis en que la hidrología de cuencas montañosas tropicales juega un papel central en la función ecológica, en los ciclos biogeoquímicos, la erosión, producción de sedimentos, y el suministro de agua en entornos de importancia mundial. A su vez, investigaron el balance hídrico durante el período 2010-2011 de la cuenca Kosñipata en Perú y demuestran la importancia del almacenamiento de aguas subterráneas mediante un hidrograma anual de la región de los Andes.

Albert Gottle y ElHadji N. Séné¹⁰ en un congreso realizado por la FAO, publicaron: Las Funciones Ambientales de los Bosques están descritas y ampliamente abordadas en "Funciones Protectoras y ambientales de los Bosques" exponen que los árboles y los bosques reducen el ritmo de dispersión del agua y favorecen una lenta pero total infiltración del agua de lluvia, también resaltan el papel amortiguador que ejercen los bosques y mencionan a la deforestación como un proceso que lleva a exacerbar la escorrentía, la lixiviación, la destrucción de las estructuras del suelo, a una creciente erosión y eventualmente a la desertización.

Fred L. Ogden, et al¹¹. Realizaron un estudio llamado: Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama. Al estudiar 3 cuencas con diferentes coberturas vegetales encontraron que la escorrentía en la cuenca forestada era de 1-50 % más en la estación seca debido al "sponge-effect hypothesis" en contraste, en épocas de inundación la escorrentía y los caudales máximos son mayores en la cuenca de vegetación mixta y en la cuenca con pasto para el ganado.

Esteban S, et al¹². Estudiaron la influencia en la cobertura vegetal en la capacidad de infiltración de agua en suelos de páramo. Midieron la tasa de infiltración en diferentes tipos de vegetación

⁹ CLARK K, et al. The hydrological regime of a forested tropical Andean catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 5377-5397, doi:10.5194/hess-18-5377-2014, 2014.

¹⁰ GOTTLE A, et al. Las Funciones Ambientales de los Bosques están descritas y ampliamente abordadas en Funciones Protectoras y ambientales de los Bosques. En: CONGRESO FORESTAL MUNDIAL FAO (2°: 1997: Europa). Memorias del XI Congreso Forestal Mundial. Departamento de Montes, Wunelfe, 2008.

¹¹ OGDEN F, et al. Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama. Panamá, 2013 p. 8443-8462.

¹² SUÁREZ E, et al. Influencia en la cobertura vegetal en la capacidad de infiltración de agua en suelos de páramo. Quito, 2010



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

realizando dos pruebas, una con vegetación y otra sin vegetación. Observaron que las tasas de infiltración son significativamente más altas en las muestras que tenían vegetación.

Un balance hídrico realizado en San Salvador en el año 2005 por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales y el Servicio Hidrológico Nacional¹³, demuestra que la mayor pérdida de agua en una cuenca, es generalmente debida a la evapotranspiración, la cual es la combinación de pérdida de agua por evaporación en el suelo y la transpiración de las plantas; otra pérdida importante de agua en la cuenca es debida a la evaporación en cuerpos de agua. La incidencia de la cobertura vegetal en la pérdida o en la retención de agua y la importancia de las condiciones del suelo en cuanto a su porosidad en este mismo aspecto.

Las características climáticas de viento y humedad relativa también inciden en las pérdidas de agua por parte de las plantas. En zonas de mayor viento, se produce mayor pérdida de agua, al igual que en zonas más secas y con temperaturas más elevadas. El suministro de humedad a la superficie de evaporación es un factor determinante en la evapotranspiración. A medida que el suelo se seca, la tasa de evapotranspiración cae por debajo del nivel que generalmente mantiene en un suelo bien humedecido. La humedad del suelo está relacionada con la capacidad de agua disponible en el suelo (llamada también Agua Útil), la cual es función de la textura y estructura del suelo. La propiedad física que incide en la capacidad de agua disponible es la porosidad (cantidad, forma, tamaño y distribución de poros). Dentro del suelo existen diferentes tamaños de poros, los hay macroporos, mesoporos y microporos. La función de los macroporos es de infiltración, conductividad y aireación; la de los mesoporos es de conducción lenta de agua y la de microporos es de almacenamiento.

Un estudio realizado por Galeana P, et al¹⁴. Relacionado a los cambios en la cobertura vegetal revela que éstos están teniendo una mayor atención debido esencialmente a las implicaciones de la deforestación. A nivel regional, dicho proceso genera la reducción de la cubierta vegetal, el detrimento de los recursos forestales, el deterioro físico y químico del suelo, alteración del balance

¹³ SERVICIO NACIONAL DE ESTUDIOS TERRITORIALES – SERVICIO HIDROLÓGICO NACIONAL. Balance hídrico integrado y dinámico en El Salvador, 2005.

¹⁴ GALEANA P, et al. Análisis dimensional de la cobertura vegetal-uso de suelo en la Cuenca del Río Magdalena, 2009.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

hídrico y la desestabilización de cuencas; a nivel global altera el albedo y el balance de agua atmosférica, pudiendo afectar los patrones climáticos y contribuir al calentamiento global.

En el pasado, la principal preocupación en el caso de forestación o deforestación ha sido su efecto sobre el caudal, pero en los últimos años el desmonte a gran escala de los bosques tropicales ha centrado la atención en los posibles efectos de la deforestación sobre el clima. Es por esto que Hodnett et al¹⁵, realizaron un estudio titulado: cambios estacionales de almacenamiento de agua del suelo por debajo de la selva amazónica y pastos. En este, compararon la evaporación y la infiltración de la selva tropical y pastizales, cuyo suelo se caracterizaba por ser un oxisol arcilloso. Determinaron que el cambio máximo en el almacenamiento de agua en un bosque era de 154mm, mientras que en el pasto era de 131 y 112mm.

La variabilidad espacial de almacenamiento de agua en el suelo fue significativamente mayor por debajo de los pastos que por debajo de la selva, en particular después de los eventos de precipitación en la estación seca. Esto fue en gran medida el resultado de la redistribución de las precipitaciones en forma de escorrentía superficial. No hubo evidencia de la escorrentía en el bosque.

En síntesis hay muchos mecanismos, tanto por encima como por debajo del suelo, lo que puede dar lugar a las diferencias en el comportamiento de la reserva de agua del suelo por debajo de bosques y pastizales.

La evaporación de los bosques es probable que sea superior a la de los pastos debido a una mayor eficiencia de la transferencia de vapor de agua de la superficie y de captura más eficiente de la energía solar. En la superficie del suelo, los cambios en la permeabilidad como resultado de la deforestación puede tener un efecto significativo sobre la infiltración. Por debajo de la tierra, en general, una mayor profundidad de las raíces de los bosques les permite acceder a mayores reservas de agua del suelo en los períodos secos. Sin embargo, esto sólo será el caso si las propiedades hidráulicas de la superficie del suelo se mantienen sin cambios cuando se elimina el

¹⁵ HODNETT, et al. Cambios estacionales de almacenamiento de agua del suelo por debajo de la selva amazónica y pastos, 1995.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

bosque. El proceso de la tala de bosques y la conversión a pastizales o tierras de cultivo a menudo conducen a graves problemas tales como la compactación y la degradación de la superficie del suelo y esto es particularmente el caso de la limpieza mecánica que conduce a un aumento de la escorrentía superficial y, en consecuencia, el aumento de la erosión y el riesgo de inundación. Disminución de la recarga de aguas subterráneas y flujos de la estación seca más bajos.

Tomasella et al¹⁶, exponen que falta de los datos de los suelos tropicales ha sido señalado como un obstáculo importante para el desarrollo de la pedotransferencia (PTF) para suelos tropicales; puesto que recientemente, el interés de comprender el efecto del uso de la tierra y el cambio de la cobertura de la tierra en los trópicos en el clima mundial ha planteado la necesidad de un mejor conocimiento de la hidrología y el funcionamiento de los suelos tropicales. Los impactos de estos cambios se evalúan por lo general con el uso de modelos de circulación general, o MCG, que requieren información detallada del suelo en un escala global. Ya que los suelos tropicales han sido estudiados desde un punto de vista edafológico, con muy poca información de las características hidráulicas, PTF son la única herramienta que puede proporcionar la información hidráulica necesaria en la escala espacial necesaria por MCG. En dicho estudio, deducen que los suelos tropicales tienen contenidos de arcilla por lo general van de 60 a 90%. En climas templados, suelos con más de 60% de arcilla son considerados como de baja permeabilidad arcillas pesadas y son considerados como "suelos no agrícolas". De modo conciso, mostraron claramente que los suelos tropicales caoliniticos muestran propiedades "inusuales" si se compara con suelos arcillosos templados. Las diferencias pronunciadas entre los suelos arcillosos templados y tropicales usualmente se explica por la estructura de micro-agregados de oxisoles.

Simunek J¹⁷ en sus modelos HYDRUS1D y HYDRUS2/3D: el agua en la raíz de la planta y la absorción de nutrientes expone que es uno de los procesos más importantes en el subsuelo flujo no saturado, ya que la absorción de la raíz controla la evapotranspiración real de la planta, la recarga de agua y la lixiviación de nutrientes a las aguas subterráneas, y ejerce una gran influencia en las

¹⁶ TOMASELLA, et al. Las funciones de pedotransferencia en suelos tropicales, 2002.

¹⁷ SIMUNEK J. Modelar el agua de raíz compensada y la absorción de nutrientes, 2009.



predicciones de los modelos climáticos globales. En general, los modelos insaturados describen absorción radicular relativamente simple.

5.2 Marco conceptual

Para mejor comprensión del presente documento, se presenta una lista de definiciones generales utilizadas en el desarrollo del texto:

Atmómetro: instrumento para medir la velocidad de evaporación a partir de una superficie húmeda. En este estudio el Dr. Hendrickx ha usado las medidas diarias de atmómetro para determinar la evapotranspiración de referencia (E_{Tr}) durante el periodo 2002 – 2014 como $E_{Tr} = 1.33 \times (E)$ atmómetro.

Balance Hídrico: toda unidad hidrológica, sea una cuenca superficial o subterránea, recibe aportaciones de agua y descarga un volumen de agua, además de que contiene otra cantidad de agua variable. El balance hídrico es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado¹⁸.

Sintéticamente puede expresarse por la fórmula:

$$\text{Estado } (t + 1) = \text{Estado } t + \sum \text{Entradas } i - \sum \text{Salidas } j$$

En este trabajo usamos dos balances hídricos: uno para la subcuenca en Agua Salud y otro para el análisis de los resultados de HYDRUS-1D.

El balance para la subcuenca es:

$$L = P - Q - ET - \Delta G - \Delta S$$

¹⁸HERAS, R. Manual de Hidrología-Concepto de Balance Hídrico 1970.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

L es el residual del balance atribuido a errores en las mediciones y/o posibles flujos subterráneos que no se puede medir, P es la Precipitación, Q es la Caudal que sale de la cuenca, ET es la Evapotranspiración, I es la Intercepción. En el bosque la ET consiste en I y Transpiración T, ΔG es el almacenamiento de acuífero y ΔS es el cambio del almacenamiento del agua en el suelo.

El balance para HYDRUS-1D es:

$$L = P - ET - IP - \Delta S$$

IP es la infiltración profunda que es igual a $Q + \Delta G$

ΔG : es el cambio en el almacenamiento en un acuífero somero (cm).

ΔS : es el cambio en el almacenamiento de agua en el suelo (cm).

Capacidad de Infiltración: cantidad máxima de agua que puede absorber un suelo en determinadas condiciones, valor que es variable en el tiempo en función de la humedad del suelo, el material que conforma al suelo, y la mayor o menor compactación que tiene el mismo¹⁹.

Caudal de Salida (Q): es el caudal de drenaje medido en la salida de una subcuenca.

Cuenca Hidrográfica: es el contorno o límite de la misma que drena agua en un punto en común²⁰.

De acuerdo al Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Suelos²¹. Clasifica a las cuencas por su tamaño de la siguiente manera:

¹⁹ HORTON. Significado de Capacidad de infiltración.

²⁰ORDOÑEZ, J. Concepto de Cuenca Hidrográfica. Cartilla técnica: aguas subterráneas y acuíferos. Perú, 2011 p. 8

²¹AGUIRRE. Clasificación de cuencas 2007.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

Sistema hidrográfico (+ de 300.000 ha)

Cuencas (60.000 - 300.000 ha)

Subcuencas (10.000 - 60.000 ha)

Microcuenca (< 10.000 ha)

Cuenca Hidrológica: unidad del territorio, normalmente delimitada por un parteaguas o divisoria de las aguas, en donde ocurre el agua en distintas formas y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal.

En la cuenca se distinguen por lo general tres sectores característicos: Alto, Medio y Bajo, los cuales en función a las características topográficas del medio pueden influir en sus procesos hidrometeorológicos y en el uso de sus recursos. Y se conoce a la cuenca como una unidad territorial natural²².

Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá (CHCP): es el elemento hidrológico más importante del istmo por sus diferentes usos. Los aportes hídricos del majestuoso río Chagres son utilizados en múltiples formas: para el consumo humano en las ciudades de Panamá, Colón y alrededores; para el funcionamiento del Canal de Panamá y en la generación de energía hidroeléctrica²³.

Efecto Esponja: contenido de agua en el suelo que permite minimizar los daños por inundaciones y maximizar la disponibilidad de agua en sequías²⁴.

Escorrentía cortical (EC): el agua de lluvia que fluye por las ramas y troncos durante una tormenta. La escorrentía cortical alcanza el suelo concentrándose en la zona que bordea el tronco.

²² LLERENA, C. Concepto de Cuenca Hidrológica 2003.

²³ REVISTA INFORMATIVA DE LA AUTORIDAD DEL CANAL DE PANAMÁ (EL FARO). Significado de La Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá (CHCP), Panamá, 2010.

²⁴ INSTITUTO SMITHSONIAN DE INVESTIGACIONES TROPICALES (STRI). Concepto Efecto Esponja. Panamá, 2013.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

De acuerdo con los investigadores “los bosques tropicales reducen el máximo de escorrentía durante las tormentas y liberan el agua almacenada durante las sequías”, precisa un informe del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales.

Evaporación: proceso esencial del ciclo hidrológico, pues se estima que aproximadamente el 75% de la precipitación total anual que ocurre sobre los continentes retorna a la atmósfera en forma de vapor, directamente por evaporación o a través de las plantas, por transpiración²⁵

Evapotranspiración (ET): proceso simultáneo entre la evaporación del agua de la superficie del suelo y de la vegetación mojada más la transpiración de las hojas a través de sus tejidos especializados, como variable hidrológica. A su vez, es un componente principal del balance de agua en el suelo²⁶.

Evapotranspiración de Referencia (ET_r): se refiere a la que tiene un cultivo en óptimas condiciones de crecimiento u bajo un adecuado suministro de agua. La superficie de referencia es un cultivo herbáceo ideal, pudiendo ser una pradera de gramíneas. Al considerar un buen suministro de agua en el suelo, el agua disponible en él, y las características del suelo no afectan el ritmo de evapotranspiración.

Este concepto se introduce para estudiar la demanda evaporativa de la atmósfera independientemente del tipo de cultivo, de su estado de desarrollo y de su manejo. Recomendado por el manual de FAO (Allen et, al 1998). Para las condiciones de la subcuenca de Agua Salud es necesario usar el **ET_r** porque refleja mejor la rugosidad de la superficie en dicho lugar.

Hydrus-1D: es un modelo basado en Microsoft Windows para el análisis de flujo de agua y el transporte de solutos en medios porosos variablemente saturado. Está basado en gráficos interactivos. HYDRUS utiliza la ecuación de Richards para la simulación de flujo variablemente

²⁵GRAY, et al. Concepto de Evaporación 1973.

²⁶ PEREIRA, et al. Concepto de Evapotranspiración 2006.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

saturado y ecuaciones de advección-dispersión basados en Fick para el transporte de calor y soluto²⁷.

Infiltración Superficial (IS): proceso de entrada, generalmente vertical de agua a través del terreno, procedente de una lluvia, riego, o de una corriente de agua sobre la superficie del suelo²⁸. En este trabajo no hay escorrentía superficial y por eso la infiltración es igual a la precipitación directa (PD).

Infiltración Profunda (IP): es el flujo de agua que sale del fondo del perfil simulado en HYDRUS1D. En este trabajo IP de HYDRUS1D es equivalente a $\Delta G + Q$.

Intercepción (I): es aquella parte de la precipitación que es almacenada temporalmente sobre la superficie de las hojas y ramas, mientras que la pérdida por intercepción corresponde a la evaporación del agua almacenada en las copas²⁹.

Precipitación Directa (PD): Precipitación que no es interceptada por el follaje, no obstante, cae directamente sobre el suelo.

Recursos Hídricos: usualmente se considera como el número de cuerpos de agua de los cuales se extrae dicho elemento, para uso humano. Un concepto más moderno considera todos los usos antrópicos que estén relacionados con el ciclo hidrológico (suministro de agua, navegación, pesca, hidroeléctrica, recreación, mantenimiento de los ecosistemas acuáticos, etc.)³⁰

Transpiración (T): proceso de la evaporación del agua en las hojas a través de sus tejidos especializados, como variable hidrológica.

²⁷ ŠIMŮNEK J, et al. Concepto Hydrus 1-D. USA, 2009.

²⁸ CUSTODIO, et al. Concepto de Infiltración.

²⁹ SHAW. Concepto de Intercepción 1996.

³⁰ CONVENCIÓN SITIOS RAMSAR. Concepto de Recursos Hídricos 2005.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

Zona No Saturada: también llamada de aireación o vadosa, donde los poros del suelo pueden contener aire, agua o una combinación de estas y donde la presión del agua es menor que la presión atmosférica, produciendo presiones de tensión o de succión.

5.3 Marco legal

Panamá cuenta con 52 cuencas hidrográficas, de las cuales la Vertiente Caribe comprende 18 cuencas, abarcando el 30% del territorio Panameño. La vertiente Pacífico integra 34 cuencas, abarcando el 70% del territorio³¹.

La Constitución Panameña establece que las aguas subterráneas y termales, las aguas lacustres y fluviales, sus riberas, los ríos navegables, puertos y esteros, pertenecen al estado y son de Uso Público.

1. El Artículo 2 de la Ley 35 del 22 septiembre 1966 define como bienes de dominio público del Estado, de aprovechamiento libre y común, todas las aguas fluviales, lacustres, marítimas, subterráneas y atmosféricas, comprendidas dentro del territorio nacional continental e insular, el subsuelo, la plataforma continental submarina, el mar territorial y el espacio aéreo de la República³².
2. Ley 44 de 31 de agosto de 1999. “Por el cual se aprueban los Límites de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá”. (G.O. 23,877 de 2 de septiembre de 1999)³³.

³¹SITUACIÓN ACTUAL DE LA GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN PANAMÁ. <http://www.pnuma.org/agua-miaac/CODIA%20HIDROGEOLOGIA/MATERIAL%20ADICIONAL/PONENCIAS%20HIDROGEOLOGIA/PARTICIPANTES/Panama/Hidrogeologia%20en%20Panama.pdf>. Panamá, 2010.

³² CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE PANAMÁ. Artículo 2 de la Ley 35 del 22 septiembre 1966, Ley 44 de 31 de agosto de 1999.

³³ Ibid., p. 9



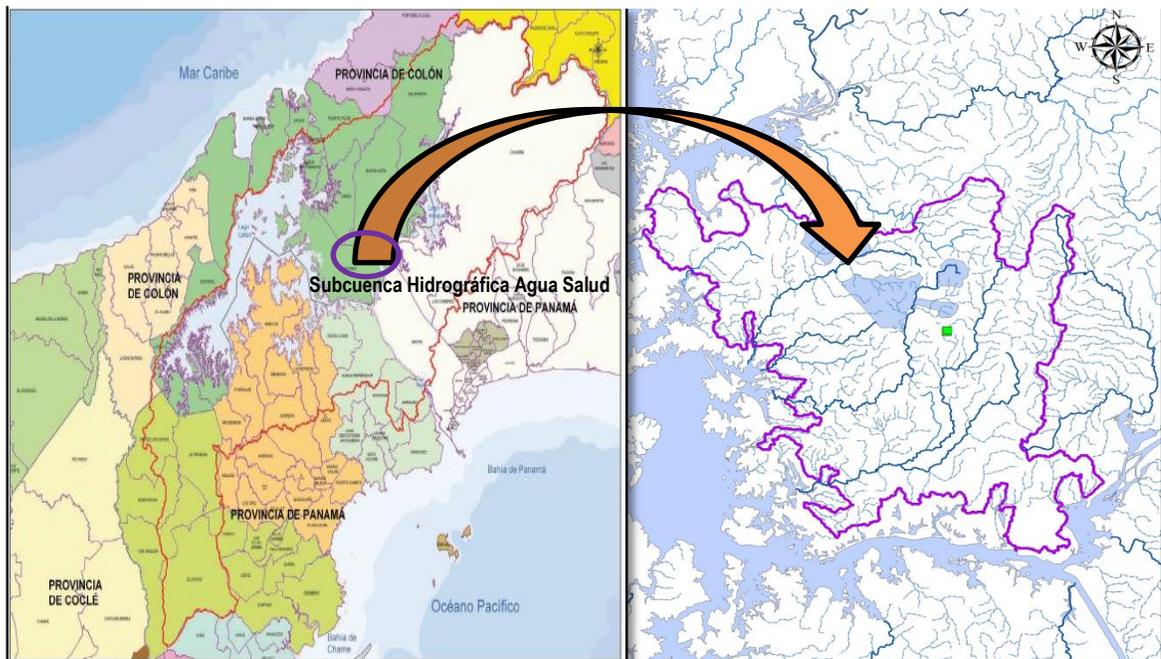
6 DIAGNÓSTICO GENERAL DE LA SUBCUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AGUA SALUD

A continuación se presenta una descripción sucinta de las características y estado actual de la Subcuenca Agua Salud. Se realiza una breve caracterización de los principales aspectos físicos y bióticos del área de estudio, los cuales permiten hacer una aproximación del estado actual.

6.1 Área de estudio

El proyecto investigativo se realizó sobre la provincia de Colón, en el Distrito del mismo nombre, en la denominada Subcuenca del río Agua Salud, ubicada en la parte central de la Cuenca del Canal (9°13' N, 79°47' W). Figura 2. Las aguas del río Agua Salud, pertenecen a la subcuenca del Lago Gatún y fluyen hacia el lago Gatún Figura 1, drenando una superficie de 1,740 hectáreas. Gran parte del área de la cuenca pertenece al Parque Nacional Soberanía Figura 3.

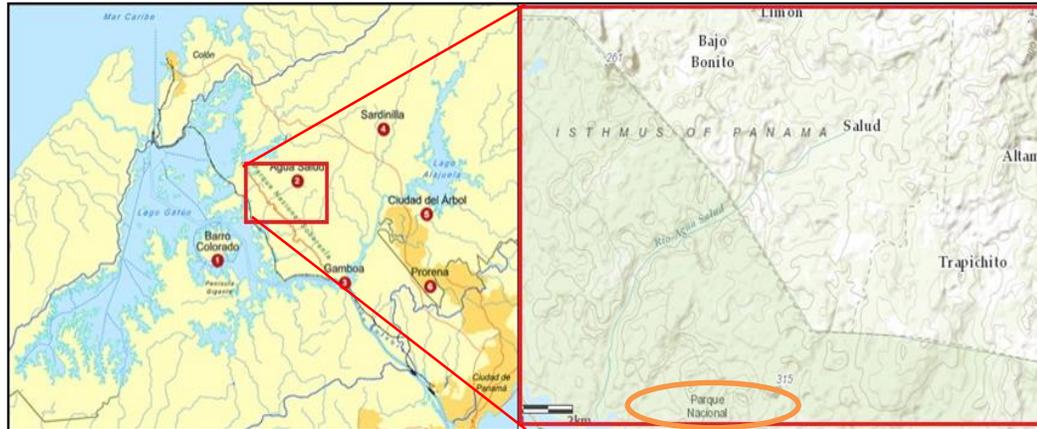
Figura 1. Localización regional del área de estudio **Figura 2.** Subcuenca Río Agua Salud



Fuente: <http://es.slideshare.net/gwpcam/jos-morn-del-consejo-consultivo-panam>



Figura 3. Localización área de estudio dentro del Parque Nacional Soberanía



Fuente: http://www.ctfs.si.edu/data/documents/Resumen_del_Proyecto_AguaSalud_enerojulio_2009_sm.pdf

6.2 Aspectos geomorfológicos y erosión

De acuerdo con el mapa Geomorfológico contenido en el Atlas Nacional de la República de Panamá (Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia, 1988), la zona de estudio se caracteriza por tener numerosas colinas de forma cónica. Las fallas y dobleces juegan un papel secundario en la configuración del paisaje. Se encuentran patrones de drenaje bien desarrollados y agudamente definidos, a pesar que su edad geológica, relativamente reciente.

La Subcuenca de Agua Salud, está conformada geomorfológicamente por cerros bajos y colinas, las cuales presentan formas convexas en las partes superiores y formas cóncavas en las partes inferiores. Las diferencias de nivel en la subcuenca del proyecto Agua Salud, oscila entre 52 a 302 m sobre el nivel medio del mar.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

La pérdida de suelos por erosión hídrica en general, está asociada con las zonas con mayores pendientes y con la existencia de suelos de alta erodabilidad. En la subcuenca del río Agua Salud, se registran valores de 200 toneladas por hectárea por año (ARI, 1996).

6.3 Marco geológico

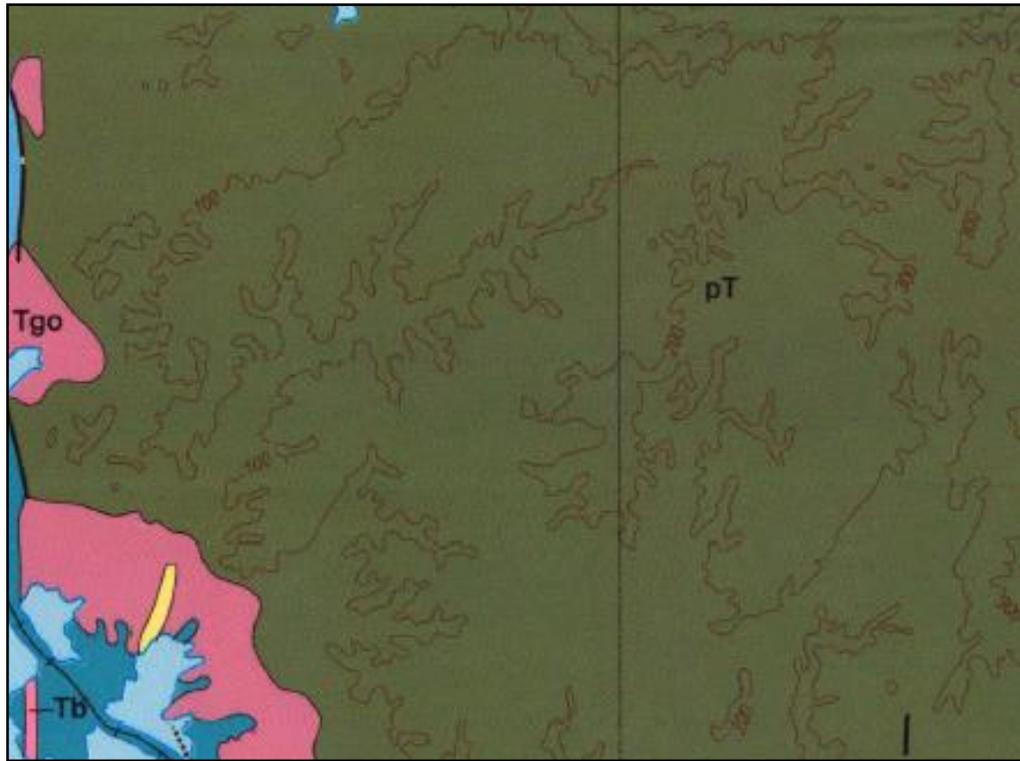
Geológicamente, la subcuenca del río Agua Salud constituye parte de una subcuenca sedimentaria bien definida que se extiende desde el Pacífico hasta el Caribe, a través del Istmo de Panamá. La subcuenca está conformada por Unidades Terciarias y del Cuaternario Reciente, que incluyen de más joven a más antiguo, las siguientes Formaciones: Sedimentos aluviales Holocénicos (Qa); areniscas tobáceas, lutitas y calizas de la Formación Caimito (Tcm); lutitas calizas areniscas y arcillolitas de la Formación Gatuncillo (Tgo) y lavas y rocas basálticas intruidas por cuerpos intrusivos dioríticos y andesíticos del denominado Anti Terciario o Pre Terciario (Tp) que hacían parte de una meseta basáltica fuertemente disectada desarrollada en los restos de un arco de islas Cretácico, Harmon, et al³⁴. La subcuenca está profundamente sustentada por un sustrato basáltico y andesítico. Figura 4.

³⁴ HARMON, et al. (2005). The geological development of Panama, in *The Rio Chagres, Panama: A Multidisciplinary Profile of a Tropical Watershed*, edited by R. S. Harmon, pp. 45–64, Springer, Dordrecht, Netherlands.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

Figura 4. Mapa geológico Subcuenca Hidrográfica Río Agua Salud



CONVENCIONES	
Qa	Sedimentos Holocenos, no diferenciados, principalmente aluvión o relleno
Tcm	Formación Caimito, Oligoceno superior, marino. Arenisca tobácea, lutita tobácea, toba y caliza foraminífera
Tgo	Formación Gatuncillo, Eoceno medio a superior. Esquisto arcilloso, lutita, arenisca de cuarzo, caliza algácea y foraminífera
pT	Anti-Terciario. Lavas y tobas basálticas y andesíticas alteradas. Incluye rocas intrusivas dioríticas y dacíticas

Fuente: Mapa geológico del canal de Panamá y sus alrededores, por R.H. and J.L. Stewart



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

6.4 Hidrología

La Subcuenca del río Agua Salud, conforma parte de la Cuenca del Lago Gatún, dentro de la gran Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá. El drenaje es de tipo paralelo en la mayor parte del recorrido del río, el cual efectúa en dirección Sur Oeste hacia el lago Gatún, donde vierte sus aguas.

En cuanto al régimen hidrológico o comportamiento de las aguas en los cursos de las microcuencas que constituyen la subcuenca de Agua Salud, en la estación lluviosa, se observó que el flujo de las aguas superficiales en la zona deforestada es mayor en 62 milímetros que en la microcuenca parcialmente deforestada. La mayor escorrentía obedece a la disminución en la permeabilidad de los suelos como producto del cambio de su estructura, producto de la compactación por las actividades ganaderas y por la profundidad de las raíces al ser reemplazados los árboles por pastos.

Durante las tormentas de la estación invernal, los volúmenes de agua alcanzan niveles más rápidos y elevados; es decir, mayor torrencialidad en la microcuenca parcialmente deforestada que en la totalmente cubierta por bosque.

6.5 Aspectos edafológicos

Los suelos en la subcuenca estudiada se derivan de Oxisoles producto de meteorización de la roca madre, dichos suelos alcanzan hasta 20 m de profundidad, de acuerdo con estudios sísmicos Ogden, et al³⁵. Los Oxisoles presentes corresponden a los suelos más comunes en la subcuenca, son arcillosos, granulares, de color rojo amarillento, pardo rojizo o pardo oscuro, varían de medianamente profundos a profundos, presentan horizontes pobremente marcados, de buena permeabilidad y bajo contenido de materia orgánica, varían de muy ácidos a medianamente ácidos, con contenidos bajos de bases intercambiables y de nutrientes. Las características anteriores definen una escasa productividad agrícola y una fertilidad natural baja.

³⁵ OGDEN, et al. (2010). Ecohydrologic investigations of shallow lateral subsurface flow in tropical soils using time-lapse surface electrical resistivity tomography.



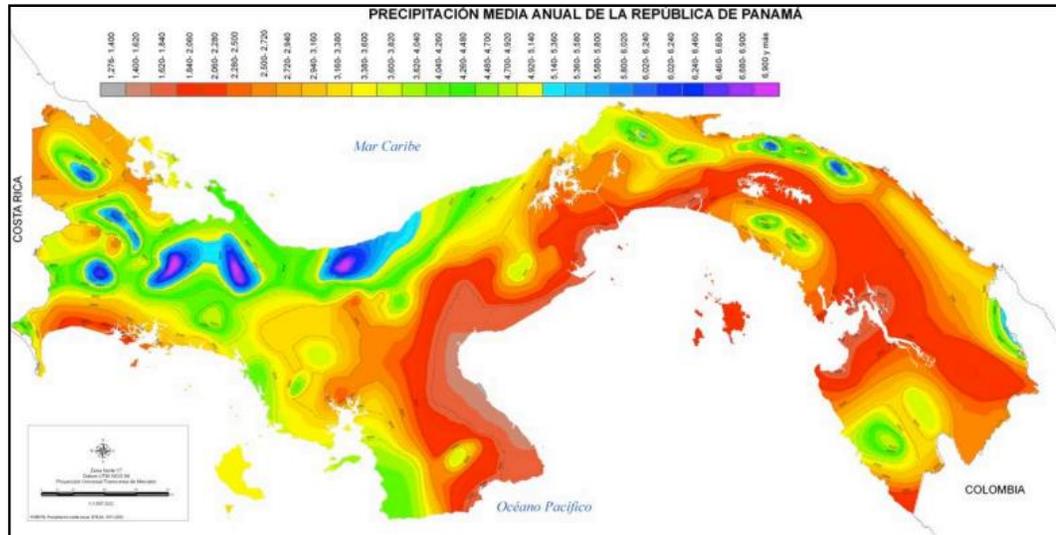
UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

6.6 Clima

De acuerdo con el sistema de clasificación de Köppen, la subcuenca se encuentra dentro del Clima Tropical Muy Húmedo (Afi). El clima se caracteriza por una precipitación copiosa durante todo el año (Figura 5). Durante el mes más seco (las precipitaciones suelen ser superiores a 60 mm, la temperatura media del mes más fresco es mayor de 20°C, y la diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y el mes más fresco, es menor de 5°C. El sitio de investigación focal del proyecto de Agua Salud recibe un promedio de 2700mm de lluvia por año. Las temperaturas diurnas alcanzan un promedio de 32°C, con las bajadas nocturnas de aproximadamente 23°C (Figura 6). El año meteorológico se divide en dos partes: una estación seca pronunciada (aproximadamente desde mediados de diciembre hasta finales de abril), y una estación lluviosa (mayo a mediados de diciembre). En promedio, aproximadamente 300 mm de lluvia cae durante la estación seca. Humedad relativa es alta, del orden del 75 por ciento, y la evapotranspiración potencial anual promedio es 2.000 mm³⁶.

³⁶ SIAGUA. Características del Clima de Panamá. (En línea). Disponible en: <http://www.siagua.org/pais/panama>.

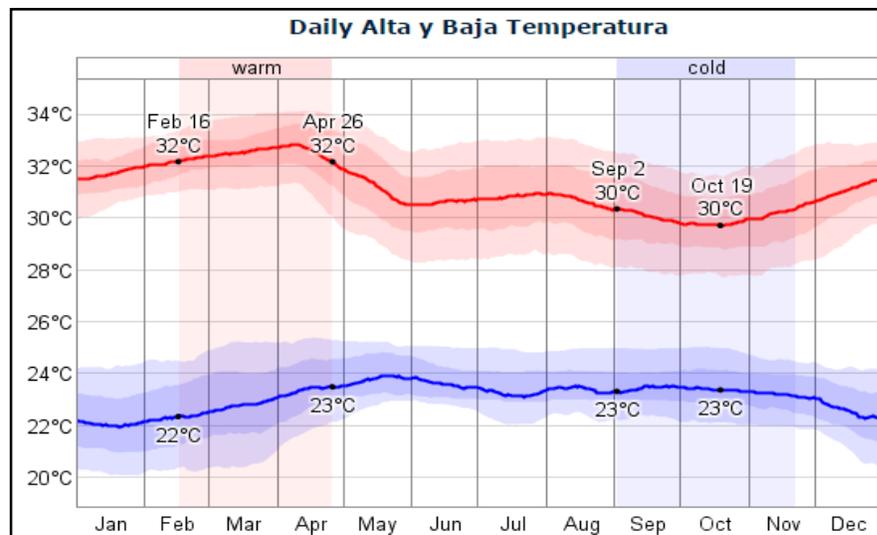
Figura 5. Mapa de Precipitación media de la República de Panamá



Fuente:

<http://www.libertadciudadana.org/archivos/Biblioteca%20Virtual/Documentos%20Informes%20Indigenas/Nacionales/Salud%20y%20Pobreza/Recurso%20Hidricos%20Panama%202011.pdf>

Figura 6. Temperatura en Panamá



Fuente: <https://weatherspark.com/averages/32639/Panama-City>



6.7 Uso actual y cobertura vegetal

En la subcuenca todavía existe una buena cobertura de bosques mayores de 70 años, localizados especialmente, hacia la parte alta de la cuenca y dentro del parque Nacional Soberanía. La subcuenca tiene 56% de su superficie cubierta con bosques, el 13% con matorrales y el 31% con potreros sometidos a quemadas durante la estación seca. La flora y vegetación de la región son descritos por los croatas³⁷ y Leigh³⁸.

Desde la década de 1950, el uso del suelo en el área de estudio ha sido dominada por la ganadería extensiva y el desplazamiento a pequeña escala de cultivo. En la actualidad, el paisaje se compone de un mosaico de ganado, pastos y campos de cultivo, barbechos, bosques secundarios, plantaciones y los fragmentos de bosque secundario mayores³⁹

³⁷ CROAT TB (1978). Flora of Barro Colorado Island. Stanford, California, U.S.A.: Stanford University Press. 943 p.

³⁸ LEIGH EG (1999). Tropical Forest Ecology. A View from Barro Colorado Island. OxfordUK: Oxford University Press. 264 p.

³⁹ BREUGEL M, et al. (2011). Estimating carbon stock in secondary forests: Decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. For Ecol Manage 262: 1648–1657.



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

7 METODOLOGÍA

La metodología de trabajo para el desarrollo de la presente investigación comprendió la realización de un conjunto de acciones coordinadas. Las mismas implicaron el desarrollo de actividades de campo y compilación de datos.

El presente estudio comprendió la realización de cuatro etapas; revisión bibliográfica, recopilación de datos meteorológicos, examinación de suelos y el empleo del programa Hydrus-1D para la simulación de (2) dos escenarios del balance hidrológico con coberturas vegetales diferentes (Potrero), (Bosque).

La revisión bibliográfica consistió en el reporte de diferentes temas vinculados con el presente estudio. Durante algunos viajes al campo se inspeccionó el tipo de vegetación presente en los sitios escogidos para las simulaciones (Anexo 1).

Para obtener las medidas de los parámetros que influyen en la infiltración y evapotranspiración, en la Subcuenca Hidrográfica del Río Agua Salud se hizo uso de los datos existentes, suministrados por el Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI).

El muestreo de suelos se realizó de acuerdo a la morfología del terreno en los (2) dos escenarios (Bosque-Potrero). Para cada escenario se hicieron (2) calicatas de 2x2m, para un total de (4) cuatro calicatas de (2m) de profundidad. Al mismo tiempo, la descripción de los perfiles del suelo se efectuó aplicando la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

Una vez obtenidos los datos de entrada, se hizo uso de una computadora y el software (HYDRUS 1D) que permitió la simulación del movimiento del agua en la zona no saturada del suelo, bajo diferentes condiciones de vegetación, y utilizando los datos atmosféricos obtenidos en las estaciones meteorológicas del área. HYDRUS1D es el modelo lo más usado para la simulación del flujo de agua y transporte de solutos en la zona no saturada. Además, es de fácil uso y se puede descargar el modelo sin gastos desde www.pc-progress.com.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

Tabla 2. Zonas de muestreo (Bosque secundario antiguo con más de 80 años, Potrero con más de 50 años)

Lugar	Zona	Coordenadas		Imagen
Rancho Don Valentín	Potrero 1-AS1	9°11'35.49"N	79°43'48.69"W	
Rancho Don Valentín	Potrero 2-AS5	9°11'35.60"N	79°43'49.80"W	
Rancho Don Valentín	Bosque 1-AS2	9°11'33.50"N	79°43'49.20"W	
Rancho Don Valentín	Bosque 2-AS6	9°11'33.52"N	79°43'50.65"W	

Fuente: Autor



7.1 Formulación matemática

La modelación en este trabajo considera a la ecuación de Richards (1931). Como ecuación constitutiva. Ésta describe el flujo en un medio poroso no saturado. Resulta de aplicar la ley de conservación de masa y la ley de flujo de Darcy. Se expresa en función del potencial métrico ψ .

$$c(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [k(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} + k(\psi)] \quad \text{Forma } \psi \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [k(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} - k(\psi)] \quad \text{Forma mixta.} \quad (1.2)$$

Donde $K(\psi)$ es la conductividad hidráulica no saturada, $c(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi}$ es la capacidad de humedecimiento y z denota la coordenada vertical (dirección).

La forma ψ a menudo tiene problemas en el balance de masa. Para compensar las dificultades relacionadas con el balance de masa y al mismo tiempo conservar las ventajas de la forma ψ , el programa Hydrus-1D (Šimůnek et al., 2009) usa la ecuación 1.2.

El agua del suelo que es absorbido por las raíces es uno de los procesos más importantes considerado en los modelos numéricos, la simulación de flujos de agua en el subsuelo, permite controlar el flujo de agua (recarga) y el transporte de nutrientes (lixiviación) a las aguas subterráneas, y ejercen una influencia importante en las predicciones de los impactos del cambio climático sobre los sistemas ecológicos terrestres.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

Estudios cuantitativos detallados de agua extraída por la planta se basan en un modelo microscópico o mesoscópico explicado por Feddes en propiedades de absorción de agua. El flujo de agua hacia la raíz se describe mediante la ecuación de Richards formulado en coordenadas radiales, con flujo en la raíz impulsado por gradientes de potencial de agua que proporciona la conductividad hidráulica del suelo que rodea la raíz. Para la simulación de la absorción de agua por las raíces, se tiene que incorporar una variable de sumidero $A(\psi)$ (volumen de agua absorbido de un volumen de suelo por día, 1/día) en la ecuación 1.2 como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} - k(\psi) \right] + A(\psi) \quad (1.3)$$

y

$$A(\psi) = \alpha(\psi) A_p \quad (1.4)$$

Con A_p la transpiración potencial (1/día) que es igual a $ET_r - I$ en este trabajo y $\alpha(\psi)$ es una función de la respuesta del suelo al déficit de agua. El valor de $\alpha(\psi)$ varía de cero en suelos secos hasta uno en suelos mojados. El director del trabajo, Dr. Hendrickx, hizo la parametrización de $\alpha(\psi)$ para las simulaciones en el bosque y el potrero.

En síntesis, el código HYDRUS-1D, describe la relación entre el contenido de agua (θ), la presión de succión (ψ) y la conductividad hidráulica (k) utilizando tres modelos: van Genuchten (1980), Brooks y Corey (1964) y las ecuaciones modificadas de van Genuchten (Vogel y Cislerova, 1988). En este trabajo, se optó por emplear las ecuaciones empíricas de van Genuchten (1980) debido a su amplio uso y la cantidad reducida de parámetros.



7.2 Simulación

Se simuló el flujo de agua mediante el programa Hydrus-1D (Šimůnek, 2009). Puesto que el objetivo de este trabajo no incluye determinar aspectos de la calidad del agua, no se simularon procesos de transporte de contaminantes.

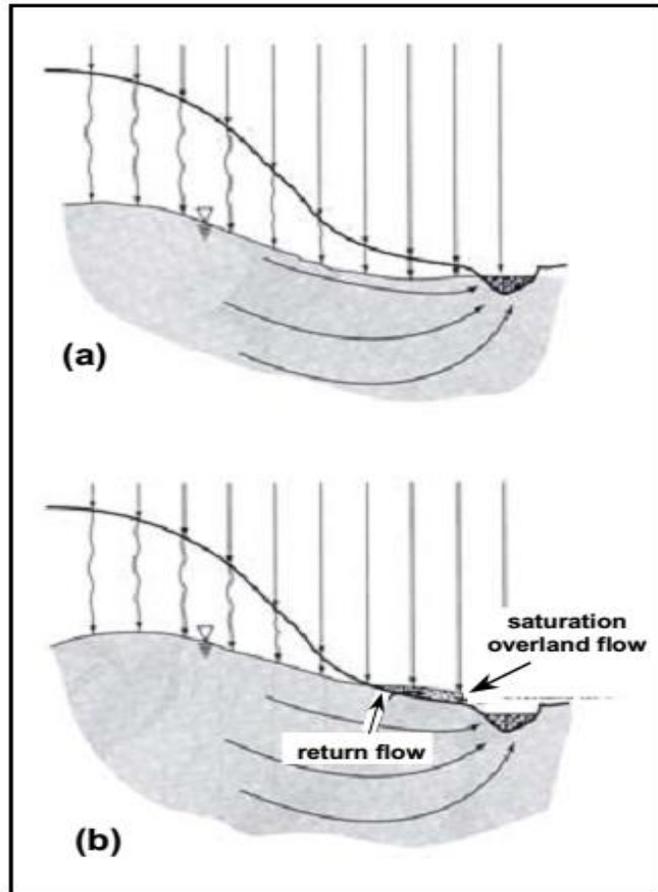
El balance hídrico completo de las laderas empinadas en colinas del proyecto Agua Salud requiere modelos en dos dimensiones a lo largo de la ladera de la colina y en tres dimensiones en las cabeceras, Figuras 7 y 8. Sin embargo, debido a la alta conductividad hidráulica de los oxisoles tropicales Hendrickx, et al⁴⁰ que se encuentran en Agua Salud; el flujo multidimensional ocurre únicamente durante y después de lluvias torrenciales. En periodos regulares tienen un comportamiento unidireccional. Por lo tanto, el modelo HYDRUS1D es una herramienta adecuada para la investigación del bosque y potrero en este proyecto.

Se utilizó la evapotranspiración de referencia (ET_r) y la precipitación (P) como condiciones de contorno en la parte superior del perfil y "drenaje libre" en la parte inferior del perfil del suelo. El modelo de porosidad Van Genuchten-Mualem se empleó para la generación de las curvas de retención de agua del suelo y conductividad hidráulica no saturada. Las observaciones de campo se utilizaron para la determinación de las distribuciones de la raíz a una profundidad de 2 m, mientras que los parámetros para el modelo de absorción de agua de la raíz en la ecuación (1.4) se tomaron de la literatura.

⁴⁰ HENDRICKX, et al. (1996). Soil hydraulic properties and van Genuchten parameters for an oxisol under pasture in central Amazonia, in Amazonian deforestation and climate.



Figura 7. Saturación del flujo superficial debido a la corriente de aguas subterráneas



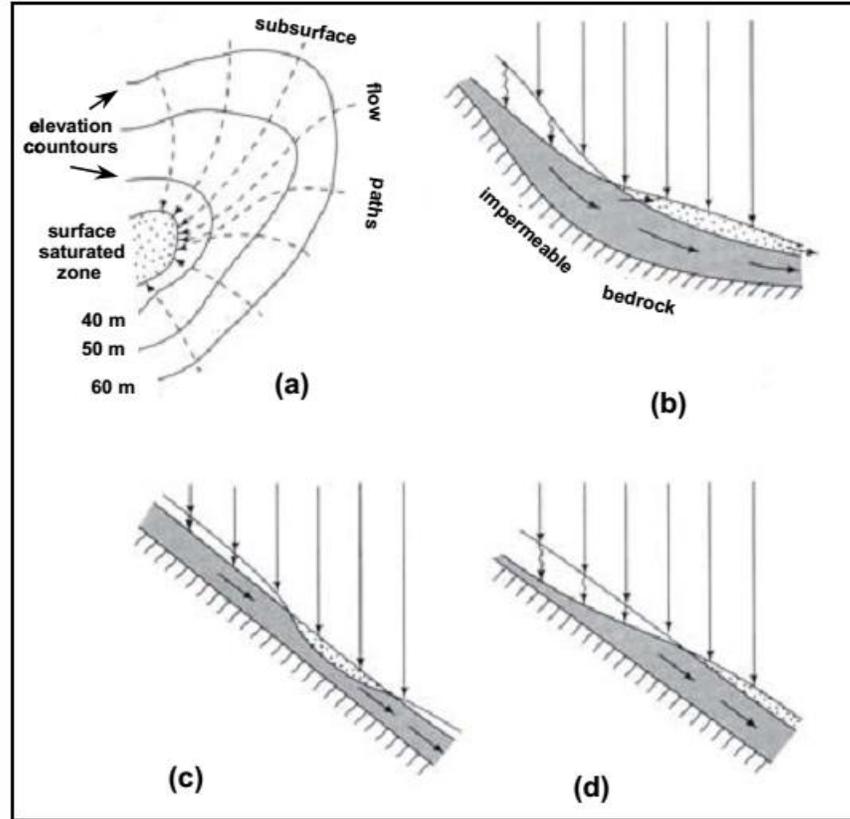
(Modificado de Dingman, 2002; después de Ward, 1984)

a) en la primera etapa del evento no hay flujo superficial, solamente hay descarga subterránea (flujo de base).

b) después, el nivel freático sube a la superficie en áreas cercanas a la corriente debido a la recarga local, la infiltración cesa y solamente hay escorrentía superficial.

Se observó en los experimentos de infiltración realizados por Ogden (agosto 2015, enero 2016) que en el bosque nunca hay escorrentía superficial y en el potrero la escorrentía es muy poca.

Figura 8. Situaciones en las que el flujo superficial puede surgir en laderas fuera de las áreas cercanas a los arroyos



(Modificado de Dingman, 2002; después de Ward, 1984)

- a) vista en planta que muestra la convergencia de las trayectorias de flujo subterráneo.
- b) sección transversal que muestra la reducción en el gradiente hidráulico asociado con ruptura de pendiente.
- c) sección transversal que muestra como el flujo subterráneo pasa por un área local con suelo de poco espesor.
- d) sección transversal que muestra donde comienza el flujo superficial cuando el flujo subterráneo aparece en la superficie del terreno.



7.2.1 Descripción de los parámetros de entrada HYDRUS-1D

La precipitación y la evapotranspiración de referencia

Los datos de evapotranspiración de referencia y de precipitación diaria han sido proporcionados por Steve Paton, Director del Programa de Control Físico en el Smithsonian Tropical Research Institute. Los datos cubren 5113 días, es decir, un período correspondiente a (14) años, sin interrupción durante los años 2002-2015 y se midieron por encima del dosel en una estación meteorológica ubicada en la parte superior de una torre en la Isla de Barro Colorado. La evapotranspiración de referencia se ha estimado a partir de mediciones utilizando atmómetros de placa-cerámica, tal es el caso de Broner, et al⁴¹. Con base en la literatura (Knox et al 2011; Chen et al 2009; Irmak et al 2005) el Dr. Hendrickx ha convertido la evapotranspiración de atmómetro (ETatmómetro) en la evapotranspiración de referencia (ETr) como $ETr = 1.33 \times ETatmómetro$.

Ogden et al⁴² estiman que el 16% de la precipitación es interceptada por el dosel en el bosque y se pierde por evaporación. En las simulaciones la precipitación diaria se redujó en un 16% para estimar la precipitación directa que es la cantidad de lluvia que llega a la superficie del suelo e infiltra.

Propiedades hidráulicas del suelo

Los parámetros del modelo de Van Genuchten-Mualem⁴³ se utilizaron para generar las propiedades hidráulicas del suelo en el modelo HYDRUS-1D. Estos parámetros son contenido residual de agua (Qs), contenido de agua saturada (Qs), parámetros empíricos (Alfa, n y l) y la conductividad hidráulica saturada (Ks).

HYDRUS-1D proporciona un "catálogo de suelo" y una "predicción de red neural" para la generación de parámetros Van Genuchten sobre la base de la textura del suelo y la densidad aparente utilizando funciones de pedotransferencia derivados de los suelos en climas templados. Desafortunadamente, los suelos arcillosos tropicales son completamente diferentes de los suelos

⁴¹ BRONER, et al. (1991). Evaluation of a modified atmometer for estimating reference ET.

⁴² OGDEN, et al. Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama, 2013.

⁴³ VAN GENUCHTEN. (1980). Parameter estimation for unsaturated flow and transport models.



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

arcillosos formados en climas templados Tomasella, et al⁴⁴. Por lo tanto, el "Catálogo de suelo" o "predicción de red neural" no se puede utilizar.

Muchos de los suelos en la Cuenca del Canal de Panamá son oxisoles con alto contenido de arcilla que son extremadamente friables en comparación con los suelos arcillosos pesados en las regiones húmedas templadas Tomasella, et al⁴⁵. El tipo de suelo predominante encontrado en Agua Salud por Harrison y Hendrickx en enero del año 2016 son oxisoles similares a las descritas por Tomasella y Hodnett en 1996 en un rancho de ganado típico de unos 100 km al norte de Manaus, Amazonas. Estos investigadores realizaron un esfuerzo considerable para medir las propiedades hidráulicas de oxisoles en el campo y usaron las medidas para la estimación de los parámetros del modelo de Van Genuchten. Sus resultados finales (Tabla 3) se emplearon en este estudio.

Tabla 3. Parámetros de Van Genuchten para oxisol mediciones en el campo por Tomasella y Hodnett (1996)

Profundidad (cm)	Parámetros Van Genuchten					
	Qr (-)	Qs (-)	Alpha (1/cm)	n (-)	Ks (cm/día)	l (-)
0-45	0.305	0.448	0.075	1.50	1310	5.40
45-63	0.279	0.486	0.097	1.62	1622	1.98
63-90	0.304	0.573	0.462	1.33	2630	-1.77
90-120	0.355	0.565	0.664	1.20	1013	-4.91
>120	0.420	0.526	0.020	1.37	43	3.65

Tomasella y Hodnett observaron que sus valores Van Genuchten (Ks) optimizados son aproximadamente un orden de magnitud mayor que los valores de (Ks) medidos en campo. Hendrickx y Ogden (comunicación personal, verano de 2015) también midieron valores mucho más bajos de (Ks) en el campo, respectivamente, en las cuencas alta del Río Chagres y Agua Salud. La

⁴⁴ TOMASELLA, et al. (1996). Funciones de pedotransferencia en suelos tropicales.

⁴⁵ Ibid., p. 415.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

sobreestimación de (K_s) por Van Genuchten en el procedimiento de ajuste de curvas no es un problema en la simulación porque la capa superior del suelo nunca está completamente saturada. Además, los altos valores de (K_s) Van Genuchten darán lugar a un drenaje vertical rápido del perfil del suelo durante y después de eventos de lluvia y de drenaje lateral en nuestro enfoque de modelado unidimensional. La absorción de agua por las raíces, la absorción de agua por la vegetación, es decir, la transpiración, depende de la distribución de las raíces con la profundidad, así como la reducción de la tensión del agua causada por la reducción de las presiones de agua del suelo, cuando el terreno se vuelve más seco. En el trópico húmedo, la evaporación del suelo tiende a ser mínima debido a que los suelos están cubiertos de vegetación; y puesto que la simulación de la evaporación del suelo requiere considerables recursos computacionales ya que puede causar inestabilidad del modelo, no se considera en este estudio.

La masa de la raíz consiste en el peso de las raíces con un diámetro de aproximadamente 2-3 mm (Tabla 4).

Tabla 4. Masa de raíces en las 4 zonas de muestreo

Suelo del hueco (Potrero1-AS1)				
Área (m ²)	4,6225			
Profundidad (cm)			Masa de Raíces (kg)	Masa de Raíces(kg/m ²)
Inicio	Fin	Prof. Promedio		
0	20	10	0,95	0,21
20	50	35	1,2	0,26
50	100	75	0,04	0,01
100	150	125	0,02	0,00
150	200	175	0	0,00
Suelo del hueco (Potrero2-AS5)				
Área	4			



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

(m2)				
Profundidad (cm)			Masa de Raíces (kg)	Masa de Raíces(kg/m2)
Inicio	Fin	Prof. Promedio		
0	20	10	1,05	0,23
20	50	35	1,7	0,37
50	100	75	0,7	0,15
100	150	125	0,5	0,11
150	200	175	0,05	0,01
Suelo del hueco (Bosque1-AS2)				
Área (m2)	4			
Profundidad (cm)			Masa de Raíces (kg)	Masa de Raíces(kg/m2)
Inicio	Fin	Prof. Promedio		
0	20	10	8,4	1,82
20	50	35	2,6	0,56
50	100	75	0,75	0,16
100	150	125	0,65	0,14
150	200	175	0,04	0,01
Suelo del hueco (Bosque2-AS6)				
Área (m2)	4			
Profundidad (cm)			Masa de Raíces (kg)	Masa de Raíces(kg/m2)
Inicio	Fin	Prof. Promedio		
0	20	10	5,45	1,18
20	50	35	6,2	1,34



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

50	100	75	5,25	1,14
100	150	125	16,6	3,59
150	200	175	5,75	1,24

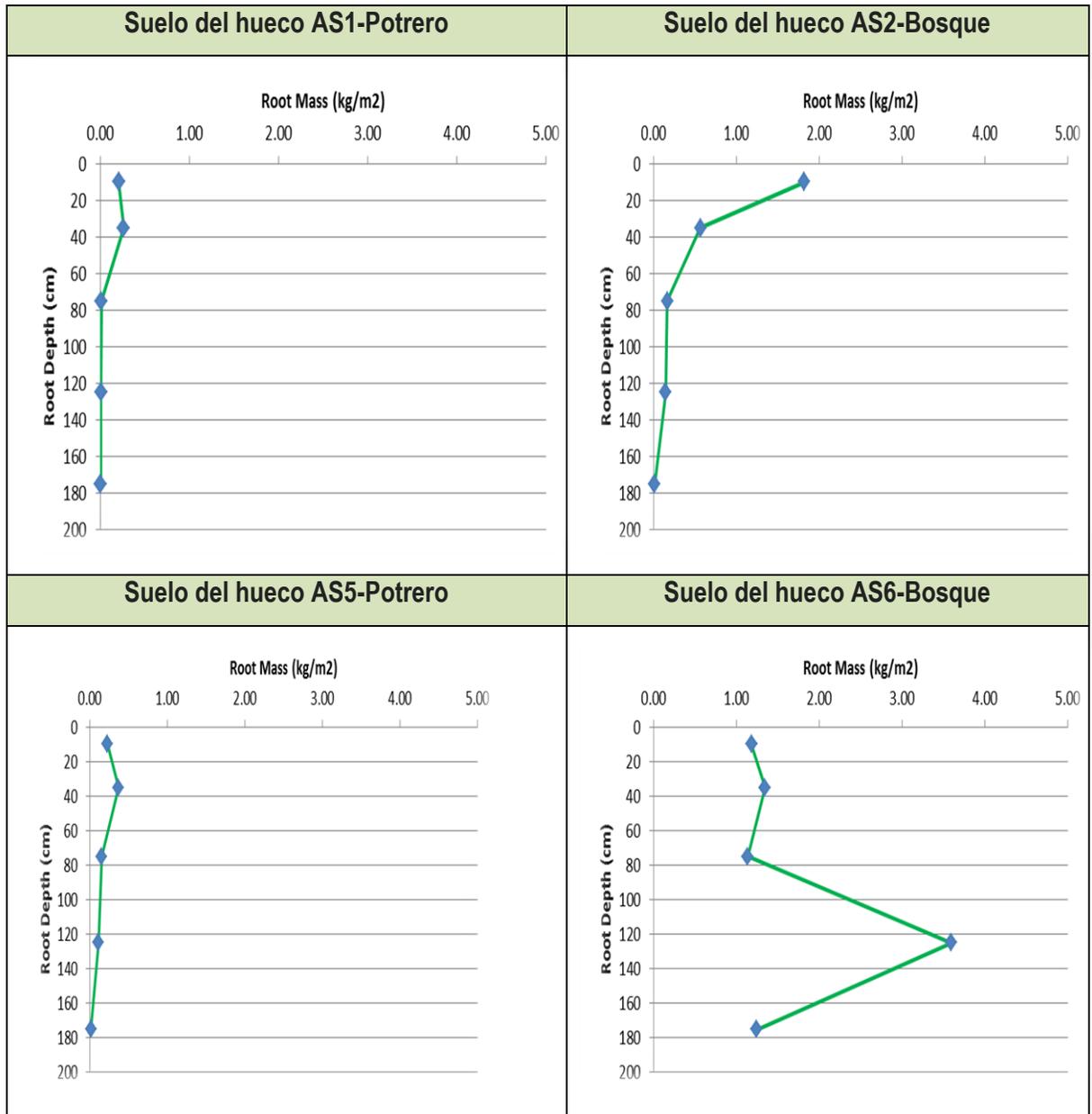
Fuente: Harrison y Hendrickx, comunicación personal, 2016.

La distribución en profundidad de las raíces en los suelos forestales y de pastoreo se presenta en la Figura 9. Las observaciones fueron tomadas por Harrison y Hendrickx en enero de 2016 dos calicatas en potrero (AS1 y AS5) y dos calicatas en bosque (AS2 y AS6).

En el potrero, las raíces disminuyen linealmente desde 0,25 kg/m² en la superficie a cero, a una profundidad de 100 cm. Para los bosques, las raíces tienen una distribución uniforme 1.00 kg/m² entre la superficie y la profundidad de 100 cm y luego disminuyen linealmente a cero en una profundidad de 200 cm en AS2, pero en AS5 es claro que las raíces tienen una profundidad mayor que 200 cm. Por eso, se usó en la simulación una profundidad de raíces de 300 cm.



Figura 9. Distribución de la masa de las raíces en pozos de pastoreo y suelo del bosque



Fuente: Harrison y Hendrickx, personal comunicación, 2016

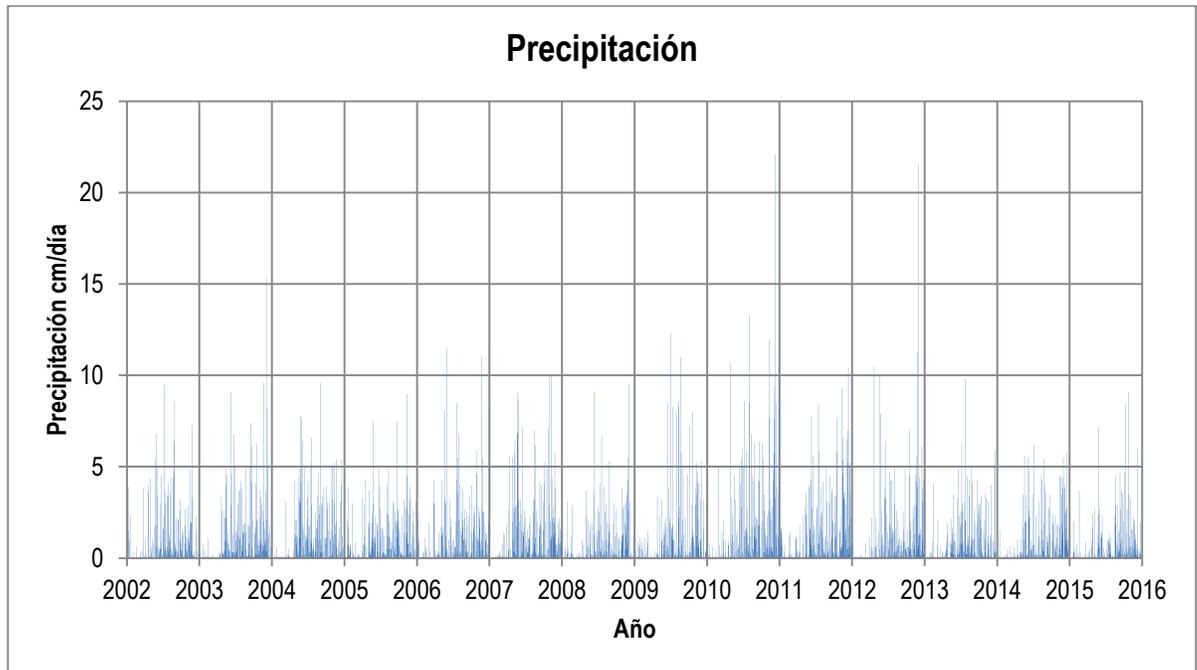
La masa de la raíz consiste en el peso de las raíces con un diámetro de aproximadamente 2-3 mm. El peso de las raíces se midió de 2 a 7 días después de su recolección; las raíces no se secaron y se almacenaron en una bolsa plástica.



7.3 Datos meteorológicos

Los datos corresponden a estaciones meteorológicas ubicadas en la Isla de Barro Colorado (BCI), donde se han reportado desde el 1 de enero del año 2002, hasta el 31 de diciembre de 2015. Los datos empleados fueron la evapotranspiración de referencia (ET_r) y la precipitación para cada día suministrados por Steve Patón, bioestadístico de (STRI).

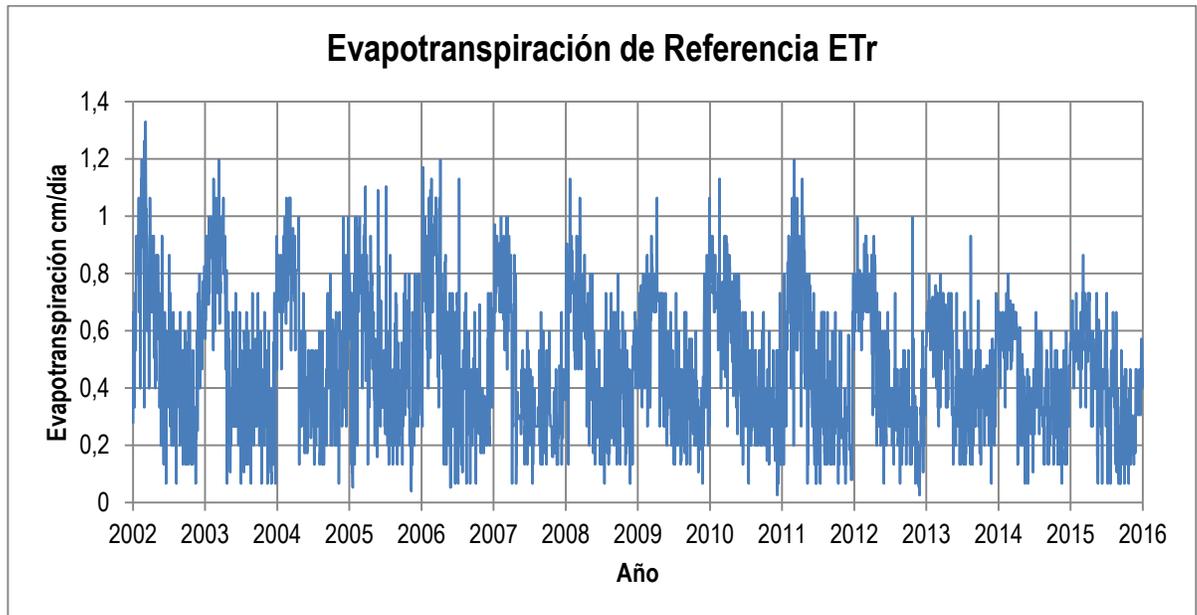
Figura 10. Precipitación para los años 2002 al 2015



En el periodo seco (Enero a Abril) la precipitación es baja mientras que en el periodo húmedo (Mayo a Diciembre) la precipitación es alta.



Figura 11. Evapotranspiración de referencia (E_{Tr}) para los años 2002 al 2015



El periodo seco de Enero a Abril tiene una alta evapotranspiración de referencia mientras que el periodo húmedo tiene una baja.

7.4 Tipo de vegetación

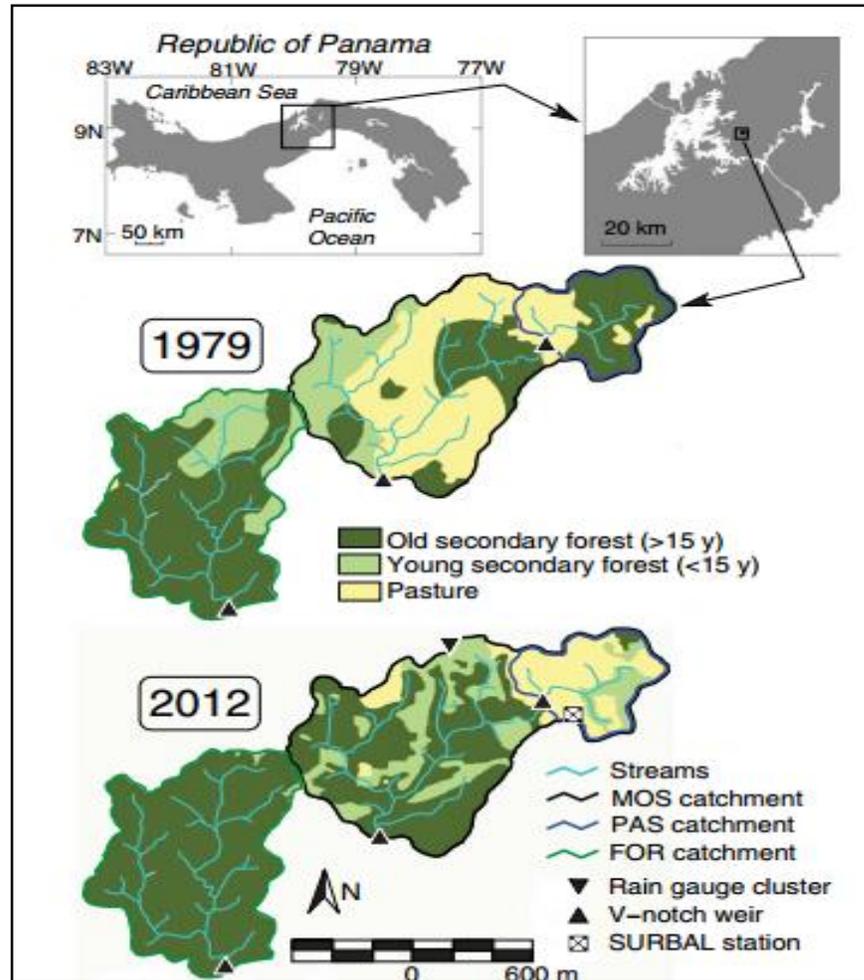
La cobertura vegetal (Anexo 1) en esta subcuenca está dominado por bosque secundario y bosque maduro. De acuerdo con la cubierta vegetal 1979 el 20% de los bosques de la cuenca podría ser tan jóvenes como de 34 años de edad, pero la mayor parte del bosque es probable por lo menos 80 años de edad (Figura 12). Hay muy poca actividad humana en la subcuenca, sin embargo hay pastoreo⁴⁶.

⁴⁶ OGDEN F, et al. Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama. Panamá, 2013 p. 8443–8462.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

Figura 12. Ubicación del sitio de estudio dentro de la República de Panamá, junto con el uso y cobertura del suelo



Fuente: http://repository.uwyo.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=civil_facpub

Los mapas de 1979 y 2012. El uso de la tierra 1979, fotografía aérea infrarrojo (PCC, 1984). Los datos de 2012 uso de la tierra/cubierta desarrollados a partir de imágenes de Google Earth y de campo.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

En el área de estudio la diversidad de especies de árboles y arbustos en los bosques secundarios es alta, con 324 especies Van Breugel, et al⁴⁷. El paisaje de Agua Salud es un mosaico de bosques secundarios de diferentes edades, pastos y campos de cultivo (Figura 13).

Figura 13. El paisaje de Agua Salud y sus bosques secundarios



Fuente: <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0082433>

Una perspectiva aérea de parte del paisaje de Agua Salud, con un mosaico dominado por los bosques secundarios de diferentes edades y pastizales. Foto impreso bajo una licencia CC BY con el permiso de Christian Ziegler.

Las especies más predominantes según estudios e inventarios forestales realizados por el personal científico del Instituto Smithsonian, destacándose Van Breugel, et al⁴⁸ son básicamente 5. Entre

⁴⁷ VAN BREUGEL, et al. (2013). Succession of Ephemeral Secondary Forests and Their Limited Role for the Conservation of Floristic Diversity in a Human-Modified Tropical Landscape.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

ellas: El Cocobolo (*Dalbergia retusa*), El Amarillo (*Terminalia amazonia*), Cedro espinoso (*Bombacopsis quinata*), Roble (*Tabebuia rosea*) y Espavel (*Anacardium rhinocarpus*).

7.5 Descripción muestras de suelo

Tabla 5. Descripción de los perfiles del suelo en las 4 zonas de muestreo.

Zona	Descripción			
	Horizonte	Grosor	Profundidad (cm)	Tasa de Infiltración (cm/día)
Potrero1-AS1	A	8	0-8	5760
	Bt1	11	19	26
	Bt2	11	30	26
	Bt3	16	46	26
	Bt4	24	70	26
	Bt5	25	95	26
	Bt6	15	110	26
	Bt7	19	129	26
	Bt8	22	151	26
	Bt9	20	171	19
	Bt10	26	195	19
Potrero2-AS5	AB	5	5	5760
	Bt1	7	12	26
	Bt2	15	27	26
	Bt3	30	57	26
	Bt4	25	82	26
	Bt5	24	106	26

⁴⁸ Ibid., p. 9.



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

	Bt6	35	141	26
	Bt7	39	180	19
Bosque1-AS2	AB	7	7	5760
	Bt1	10	17	26
	Bt2	11	28	26
	Bt3	19	49	26
	Bt4	32	87	26
	Bt5	23	110	26
	Bt6	25	135	26
	Bt7	51	186	19
	Bosque2-AS6	AB	4	4
Bt1		5	9	26
Bt2		15	24	26
Bt3		26	50	26
Bt4		48	98	26
Bt5		42	140	26
Bt6		40	180	19

Fuente: Harrison, comunicación personal, 2016.

En síntesis, más de 400 muestras de suelo tomadas a través del sitio del proyecto muestran poca variación en la textura (Más de 95% son clasificados como arcillas)⁴⁹.

⁴⁹ CALDER, et al. (2010). Panama canal watershed experiment: Agua Salud Project.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

8 RESULTADOS

La inspección de las figuras 10 y 11 (P y ETr) y la tabla 6 (periodo seco y húmedo) muestra que en el periodo húmedo la precipitación promedio de 242.3 cm es mucho mayor que la evapotranspiración de referencia promedio de 92.6 cm, mientras que en el periodo seco la precipitación es mucho menor que la evapotranspiración de referencia con 25.0 cm contra 83.1 cm. Por eso la evapotranspiración durante el periodo húmedo es limitada por la energía disponible para el proceso de evapotranspiración, mientras que durante el periodo seco la disponibilidad de agua es el factor limitante. Otra demostración de este fenómeno es presentado en la figura 14 (ETr - P) donde la diferencia entre ETr y P es positiva durante el periodo seco, pero negativa durante el periodo húmedo.

Este ciclo de P y ETr durante el año se repite también para los otros componentes del balance hídrico. Por ejemplo, en las figuras de los almacenamientos de agua en el suelo de potrero y bosque los valores aumentan rápidamente durante el periodo húmedo, y disminuyen durante el periodo seco. Hay una diferencia grande entre los valores de potrero y bosque. En el potrero la diferencia entre el valor máximo y mínimo es alrededor de $93-79 = 14$ cm de agua, por otro lado, en el bosque la diferencia es $144-118 = 26$ cm casi el doble del potrero. Esta diferencia no está causada por una diferencia de suelo porque los suelos son muy similares. La diferencia está causada por las profundidades de las raíces (Figura 9). En el potrero no existen raíces por debajo de 100 cm mientras que en el bosque se observaron raíces a los 200 cm. No obstante, la profundidad verdadera podría ser mucho mayor.

En las figuras 17 y 18 se evidencia que los suelos se llenan cada año hasta el mismo nivel de almacenamiento máximo y se secan hasta el mismo nivel mínimo. Por eso, se puede asumir que el cambio del almacenamiento de agua en el suelo es cero para un año hidrológico.

La evapotranspiración ET sigue el mismo patrón cíclico como la evapotranspiración de referencia: baja en el periodo seco y alta en el periodo húmedo. Sin embargo, la ET de potrero es menos que la del bosque. La tabla 6 muestra que durante el periodo seco el potrero tiene un ET promedio de 20.0



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

cm mientras el bosque tiene 30.2; en el periodo húmedo los valores son 73.2 y 96.8 cm, respectivamente. También es interesante inspeccionar la fracción de la evapotranspiración de referencia $E_{TrF} (=ET/ET_R)$. En el periodo seco el potrero tiene 0.24, en contraste, el bosque tiene 0.37 lo que indica que el bosque tiene un ET que es alrededor 50% más que el potrero. Sin embargo, la evapotranspiración del bosque es mucho menor que la E_{Tr} . Los valores de ET promedio para el periodo seco son 0.17 cm/d y 0.25 cm/d para el potrero y el bosque. Durante el periodo húmedo la fracción de la evapotranspiración de referencia ($E_{TrF}=ET/E_{Tr}$) llamada E_{TrF} es 0.79 para el potrero y 1.05 para el bosque. Eso quiere decir que el bosque usó toda la energía disponible para la evapotranspiración, mientras que al potrero tuvo un déficit pequeño de agua durante el periodo húmedo. Los valores de ET promedio para el periodo húmedo son 3.0 cm/d y 4.0 cm/d para el potrero y bosque, respectivamente.

Medidas de infiltración en el campo han demostrado que la tasa de infiltración es muy alta tanto en el bosque como en el potrero, por lo tanto, no existe escorrentía superficial en la cuenca. Todas las aguas de la precipitación que llegan a la superficie del suelo se infiltran, sin embargo en el bosque no toda la precipitación llega al suelo debido a la intercepción del dosel. El volumen de intercepción es alrededor de 16% en un bosque secundario viejo, mientras que no hay intercepción en un potrero viejo. El agua interceptada en el dosel se evapora directamente a la atmósfera por lo que queda solamente $100-16=84\%$ de la precipitación total para los procesos de infiltración y transpiración en el bosque. Las figuras 19 y 20 muestran que la infiltración de precipitación directa como la infiltración profunda (figuras 21 y 22) del potrero es mayor que la del bosque. Esta diferencia entre las dos coberturas vegetales es más clara después hacer un gráfico de los flujos acumulados durante los 14 años de las simulaciones. Figuras 23 y 24 muestran los flujos acumulados del potrero y del bosque, respectivamente. Los dos reciben la misma cantidad de precipitación de 3740 cm durante los 14 años. En el potrero la infiltración superficial acumulada es igual a la precipitación de 3740 cm. La infiltración se divide entre la ET acumulada de 1304 cm y la infiltración profunda acumulada de 2436. El balance hídrico en el bosque es más complicado porque 16% de la precipitación de 3740 cm se evapora directamente en el dosel por el proceso de intercepción, lo que corresponde a 580 cm. La precipitación directa (PD) queda como $3740-580 = 3160$ cm que corresponde a la infiltración superficial. Esta infiltración se divide entre la transpiración de 1190 cm y una infiltración profunda



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

de 170 cm. La Tabla 7 presenta valores para la infiltración profunda durante el periodo seco y el periodo húmedo. Durante el periodo seco las dos coberturas arrojan una infiltración profunda muy baja cerca de cero, mientras que durante el periodo húmedo la infiltración en el potrero con 170 cm es mayor que los 140 cm en el bosque. El potrero aporta el 70% de la precipitación, mientras que el bosque 58%.

Para una validación de HYDRUS-1D se hace una comparación con las medidas en el campo de Ogden et al. (2013) en el año hidrológico del 4 de Mayo 2009 hasta el 14 de Mayo 2010. Las figuras 25,26,27,28,29,30,31,32,33 y 34 muestran P, ETr, ETr – P, la ET, la precipitación directa (PD) o infiltración superficial, la infiltración profunda (IP), los almacenamientos de agua en el suelo y los flujos acumulados en el potrero y el bosque durante el año hidrológico 2009. El comportamiento de estos componentes es similar a lo que se observó para el periodo 2002–2015.

En el estudio realizado por Ogden, el balance de agua usa las medidas de Precipitación, Escorrentía, Evapotranspiración y cambios en el almacenamiento subterráneo para el año hidrológico 2009. Se expresa de la siguiente manera:

$$P = ET + Ra + Q + \Delta G + \Delta S$$

Donde:

P es la Precipitación

ET es la Evapotranspiración

Ra es la escorrentía

Q es la Caudal que sale de la cuenca

ΔG es el almacenamiento de acuífero

ΔS es el cambio del almacenamiento del agua en el suelo

En las observaciones durante las pruebas de infiltración con simuladores de lluvia en el campo, no se evidenció escorrentía, por lo tanto este componente es igual a cero (0) en la ecuación.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

En las simulaciones con HYDRUS-1D se observó un comportamiento cíclico en el contenido de agua en el suelo. Para un año hidrológico el cambio en el almacenamiento subterráneo es igual a cero (0). El balance hídrico general para el agua en el suelo usando las simulaciones del modelo HYDRUS-1D se expresa con la siguiente ecuación:

$$P = ET + IP$$

P es la precipitación

ET es la evapotranspiración

IP es la infiltración profunda

La infiltración profunda (IP) es el agua que sale del perfil del suelo y contribuye a los cambios en el almacenamiento subterráneo (ΔG) y al caudal subterráneo medido (Q) en los afloramientos con vertederos. (ΔG) fue estimado como la diferencia del almacenamiento promedio de los 10 días sucesivos antes del comienzo y el final de los periodos del balance de agua realizado por Ogden.

Balance hídrico para Bosque

$$P = ET + IP$$

$$307.6\text{cm} = 144.0\text{cm} + 164.1\text{cm}$$

$$P = 307.6\text{cm}$$

$$ET = T + I$$

$$T = 97.0\text{cm}$$

$$I = 46.9\text{cm}$$

$$IP = 164.1\text{cm}$$



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

Balance hídrico para Potrero

$$P = ET + IP$$

$$307.6\text{cm} = 109\text{cm} + 196\text{cm}$$

$$P = 307.6\text{cm}$$

$$ET = T + E$$

$$ET = 109\text{cm}$$

$$IP = 196\text{cm}$$

La Tabla 8 refleja una comparación entre los valores medidos en el campo y simulados con HYDRUS-1D. La precipitación fue medida en el campo como 307.6 cm; este valor se usó en HYDRUS-1D como dato de entrada. El valor de la interceptación usado como dato de entrada en HYDRUS-1D es el 16% de la precipitación.

La ET de 145.1 cm determinada en campo fue igual a la ET de 144.0 simulada con HYDRUS-1D para el bosque, por otra parte, existe una diferencia de 25% entre el valor medido de 87.4 cm y simulado de 109 cm en el potrero. Esta diferencia no se puede explicar porque la cuenca con potrero tiene una cobertura mixta de bosque (50%) y potrero (50%). La concordancia de ET medida y simulada en la cuenca de bosque es una buena validación de HYDRUS para la estimación de valores confiables de ET en los bosques de Agua Salud. HYDRUS también estimó bien que la cuenca con potrero/bosque tiene menor ET que la cuenca de bosque.

La suma medida del caudal anual de 116.4 cm y el ΔG de 7.1 cm es 123.5 cm para el bosque y caudal anual de 168.6 cm y el ΔG de 4.0 cm es 172.6 cm para el potrero. Estos valores se comparan con los resultados de la simulación como infiltración profunda de 164.1 cm para bosque y 196 cm para el potrero. Los valores obtenidos con HYDRUS-1D son una sobreestimación de los medidos en el campo para las dos cuencas. La sobreestimación varía entre 13.2% y 7.6% del volumen de



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

precipitación en el bosque y el potrero, respectivamente, valores que podrían estar en el rango de incertidumbres en un balance hidrológico. Sin embargo una explicación de esta sobreestimación puede ser que la infiltración profunda que resulta de HYDRUS-1D corresponde al caudal de salida medido, cambio en el almacenamiento subterráneo medido y a un flujo subterráneo profundo que no se ha medido en el estudio de Ogden et al. (2013). Las condiciones hidrogeológicas soportan esta hipótesis.

Tabla 6. Distribución de la Precipitación (P), Evapotranspiración de referencia (ETr), Fracción de la evapotranspiración de referencia (ETrF), Intercepción (I) y Transpiración (T) durante el año. El periodo seco (Enero – Abril) y el periodo húmedo (Mayo – Diciembre)

Año	Periodo Seco								Periodo Húmedo							
	Potrero				Bosque				Potrero				Bosque			
	P	ETr	ET	ET/ETr	ET	ET/ETr	I	T	P	ETr	ET	ET/ETr	ET	ET/ETr	I	T
	cm	cm	cm	-	cm	-	cm	cm	cm	cm	cm	-	cm	-	cm	cm
2002	37.6	96.9	27.2	0.28	42.8	0.44	6.9	35.9	193.6	110.5	80.9	0.73	108.3	0.98	33.6	74.8
2003	13.5	96.0	10.3	0.11	11.2	0.12	5.2	6.1	275.4	93.9	77.2	0.82	99.5	1.06	40.0	59.5
2004	19.5	90.8	12.8	0.14	24.6	0.27	5.3	19.3	256.3	106.6	82.6	0.77	110.4	1.04	36.3	74.1
2005	37.9	80.1	30.5	0.38	44.2	0.55	9.0	35.2	206.8	103.5	85.1	0.82	107.1	1.03	36.9	70.2
2006	26.1	92.5	27.4	0.30	39.5	0.43	8.2	31.3	251.5	91.0	75.8	0.83	96.7	1.06	35.5	61.2
2007	44.9	83.4	20.8	0.25	38.6	0.46	7.7	30.9	272.6	78.0	64.6	0.83	84.6	1.09	37.3	47.4
2008	21.2	86.3	19.0	0.22	31.4	0.36	7.1	24.2	182.3	96.3	73.2	0.76	100.3	1.04	30.0	70.3
2009	16.5	79.6	17.2	0.22	20.9	0.26	7.1	13.8	237.2	97.4	76.0	0.78	98.7	1.01	31.7	67.1
2010	34.4	83.4	24.1	0.29	29.9	0.36	7.6	22.3	381.0	87.4	70.5	0.81	93.7	1.07	38.6	55.1
2011	23.4	83.5	23.3	0.28	35.9	0.43	7.9	28.0	303.6	87.4	68.4	0.78	93.4	1.07	36.8	56.6
2012	21.6	83.6	15.2	0.18	26.6	0.32	4.3	22.3	277.8	83.7	69.0	0.82	89.7	1.07	35.5	54.2
2013	18.5	72.1	19.5	0.27	31.3	0.43	6.9	24.4	186.9	94.6	74.1	0.78	97.4	1.03	34.4	63.0
2014	13.4	67.0	11.3	0.17	17.5	0.26	5.6	11.9	206.9	84.5	67.7	0.80	90.6	1.07	33.7	56.8
2015	20.9	67.8	21.0	0.31	28.2	0.42	7.3	20.8	160.5	81.0	59.9	0.74	84.2	1.04	26.0	58.2
Promedio	25.0	83.1	20.0	0.24	30.2	0.37	6.9	3.3	242.3	92.6	73.2	0.79	96.8	1.05	34.7	62.0



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

El periodo seco (Enero – Abril) tiene una precipitación promedio de 25.0 cm y el periodo húmedo (Mayo – Diciembre) 242.3 cm. El periodo seco de cuatro meses tiene una ETr promedio de 83.1 cm y el periodo húmedo de ocho meses 92.6 cm. La evapotranspiración de potrero durante los periodos seco y húmedo es 20.0 y 73.2 cm mientras en el bosque es 30.2 y 96.8 cm. La mayor evapotranspiración del bosque en el periodo seco es causada por una profundidad de raíces mayor (3 m) en contraste con el potrero (1 m). La mayor evapotranspiración del bosque en el periodo húmedo es causado por la evaporación del agua que es interceptado por el dosel de 34.7 cm. La evapotranspiración en el potrero en el periodo húmedo es 73.2 mientras que la evapotranspiración del bosque es 96.8 cm similar a la evapotranspiración de referencia (ETr) de 92.6 cm.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

Tabla 7. Valores de Precipitación (P), Evapotranspiración de referencia (ETr), Intercepción (I) y Transpiración (T) para el potrero y bosque durante los periodos seco y húmedo.

Año	Periodo Seco								Periodo Húmedo							
	Potrero				Bosque				Potrero				Bosque			
	P	ETr	ET	IP	ET	IP	I	T	P	ETr	ET	IP	ET	IP	I	T
	cm	Cm	cm		cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	Cm	cm	cm
2002	37.6	96.9	27.2	-7.0	42.8	-5.8	6.9	35.9	193.6	110.5	80.9	-116.8	108.3	-88.6	33.6	74.8
2003	13.5	96.0	10.3	-0.4	11.2	0.0	5.2	6.1	275.4	93.9	77.2	-198.5	99.5	-165.5	40.0	59.5
2004	19.5	90.8	12.8	-2.0	24.6	-0.1	5.3	19.3	256.3	106.6	82.6	-179.7	110.4	-145.7	36.3	74.1
2005	37.9	80.1	30.5	-4.9	44.2	-0.1	9.0	35.2	206.8	103.5	85.1	-118.9	107.1	-87.4	36.9	70.2
2006	26.1	92.5	27.4	-4.0	39.5	0.0	8.2	31.3	251.5	91.0	75.8	-173.3	96.7	-140.9	35.5	61.2
2007	44.9	83.4	20.8	-17.8	38.6	-0.5	7.7	30.9	272.6	78.0	64.6	-213.3	84.6	-193.2	37.3	47.4
2008	21.2	86.3	19.0	-1.0	31.4	-0.5	7.1	24.2	182.3	96.3	73.2	-113.7	100.3	-82.7	30.0	70.3
2009	16.5	79.6	17.2	-0.2	20.9	0.0	7.1	13.8	237.2	97.4	76.0	-159.3	98.7	-131.8	31.7	67.1
2010	34.4	83.4	24.1	-3.8	29.9	0.0	7.6	22.3	381.0	87.4	70.5	-311.2	93.7	-279.4	38.6	55.1
2011	23.4	83.5	23.3	-7.4	35.9	-5.7	7.9	28.0	303.6	87.4	68.4	-232.5	93.4	-198.0	36.8	56.6
2012	21.6	83.6	15.2	-5.0	26.6	-0.2	4.3	22.3	277.8	83.7	69.0	-209.5	89.7	-181.9	35.5	54.2
2013	18.5	72.1	19.5	-0.8	31.3	-0.3	6.9	24.4	186.9	94.6	74.1	-112.1	97.4	-82.6	34.4	63.0
2014	13.4	67.0	11.3	-0.3	17.5	-0.1	5.6	11.9	206.9	84.5	67.7	-140.6	90.6	-111.2	33.7	56.8
2015	20.9	67.8	21.0	-0.4	28.2	-0.1	7.3	20.8	160.5	81.0	59.9	-101.1	84.2	-68.3	26.0	58.2
Promedio	25.0	83.1	20.0	-3.9	30.2	-1.0	6.9	23.3	242.3	92.6	73.2	-170.0	96.8	-139.8	34.7	62.0



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

La Infiltración Profunda IP es cerca de cero para las dos coberturas pero IP del potrero es más alta que la del bosque en el periodo húmedo.

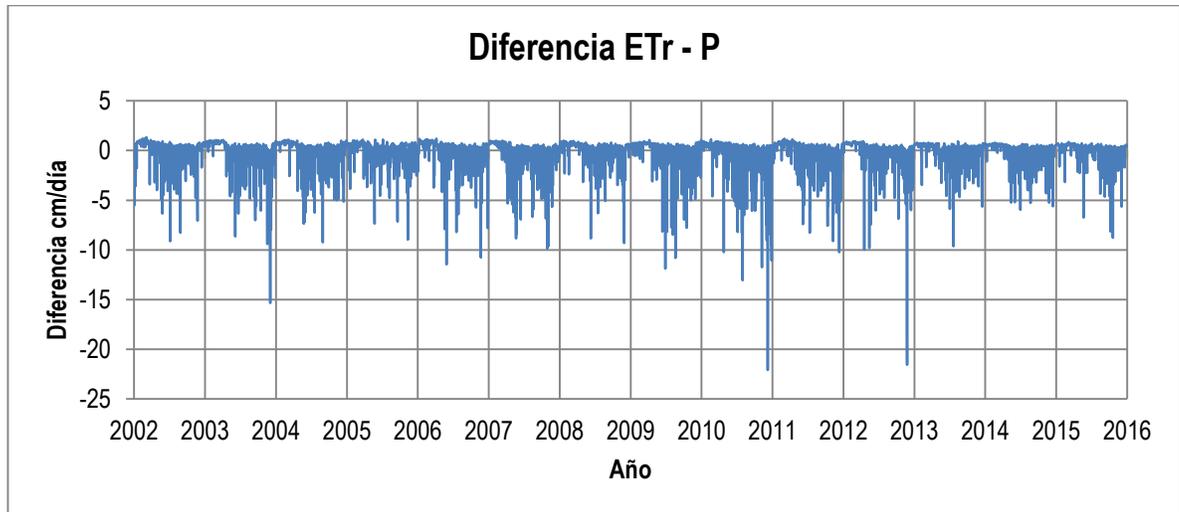
Tabla 8. Comparación de los componentes del balance hidrológico en un bosque y potrero en la subcuenca de Agua Salud simulados por HYDRUS-1D y medidos en el campo por Ogden et al. (2013) durante el año 2009

Componente del balance hidrológico	Bosque				Potrero			
	Medido	HYDRUS	Diferencia (cm)	Diferencia (%)	Medido	HYDRUS	Diferencia (cm)	Diferencia (%)
Precipitación P (cm/a)	307.6	307.6			307.6	307.6		
Intercepción I (cm/a)	42.2	46.9						
Transpiración T (cm/a)	102.9	97.0	5.9	5.7				
Evapotranspiración ET = T + I (cm/a) Bosque ET = T + E (cm/a) Potrero	145.1	144.0	1.1	0.8	87.4	109	-21.6	24.7
Infiltración Profunda IP = Q + ΔG (cm/a)		164.1	-40.6	32.9		196	-23.4	13.6
Caudal Q (cm/a)	116.4				168.6			
ΔG	7.1				4.0			
Ogden Residual=P-ET-ΔG-Q	39				47.6			
Hydrus Residual=P-ET-IP	-0.4		38.6	98.9	2.6		45.0	94.5

Fuente: Autor



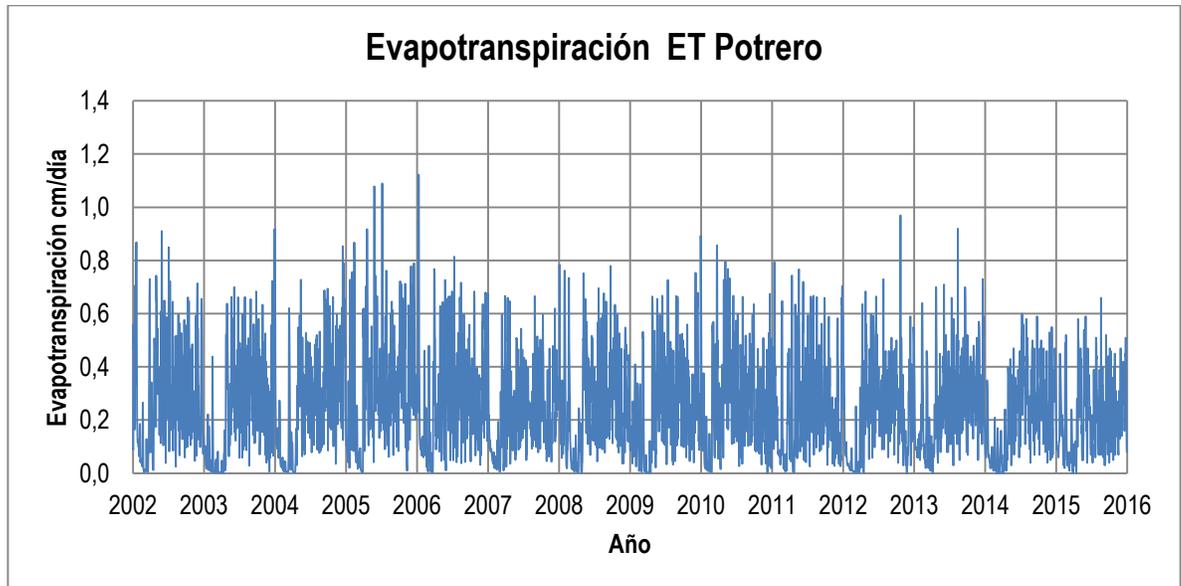
Figura 14. La diferencia $E_{Tr}-P$ es positiva en el periodo seco pero negativa en el periodo húmedo



Esto significa que la evapotranspiración en el periodo húmedo depende de la disponibilidad de energía mientras que en el periodo seco este proceso depende de la disponibilidad de agua. Durante el periodo húmedo la evapotranspiración real frecuentemente es igual a la evapotranspiración de referencia, mientras que durante el periodo seco la evapotranspiración real es menor que la evapotranspiración de referencia. El modelo HYDRUS-1D cuantifica la evapotranspiración real durante todo el año.



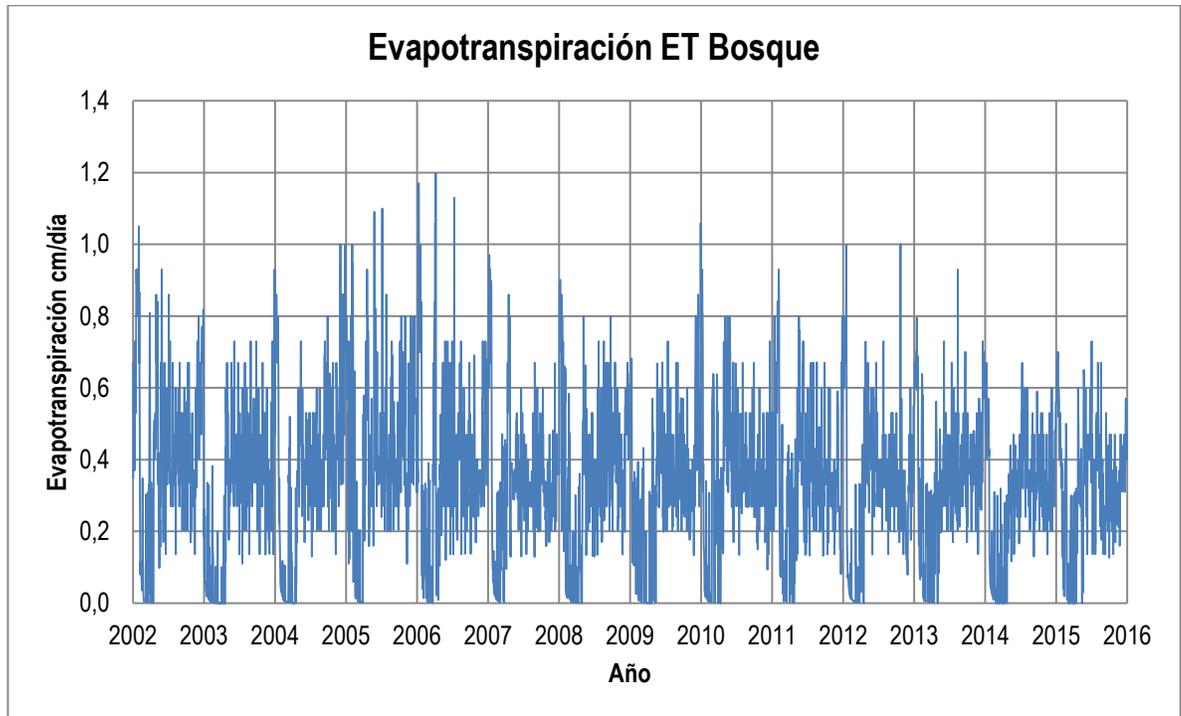
Figura 15. La evapotranspiración para el potrero durante 2002–2015



En el periodo seco el potrero tiene evapotranspiración más baja que la evapotranspiración de referencia mientras que en el periodo húmedo el potrero tiene una evapotranspiración que es casi igual a la evapotranspiración de referencia.



Figura 16. La evapotranspiración para el bosque durante 2002–2015



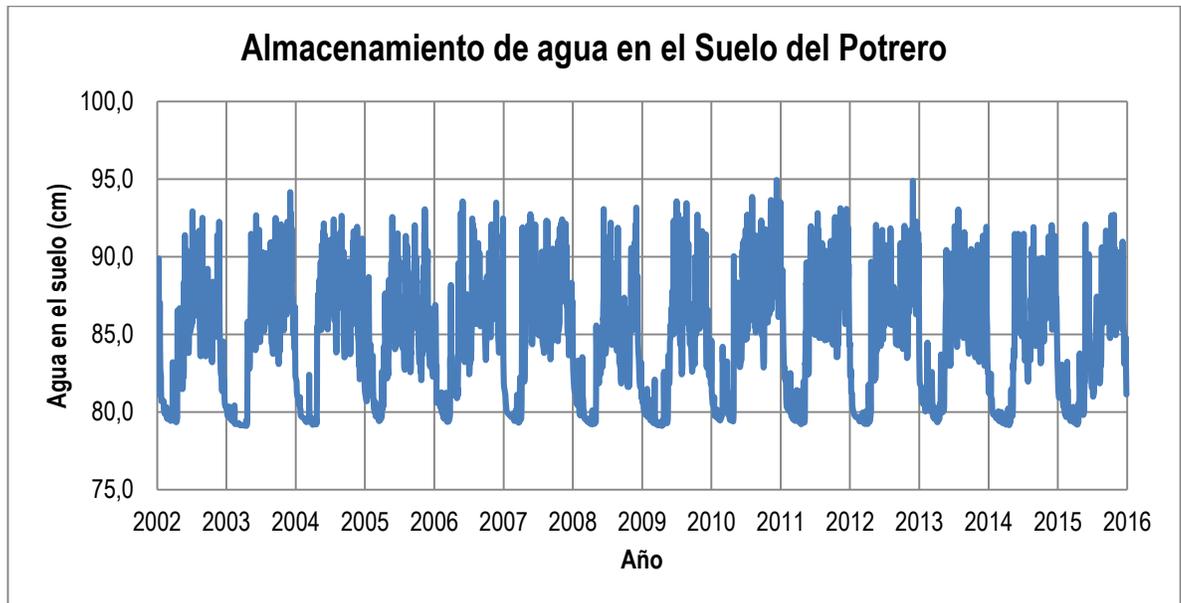
En el periodo seco el bosque tiene una evapotranspiración mayor que la evapotranspiración del potrero. Las raíces del bosque extraen el agua desde una profundidad de 0-3 metros mientras que las raíces del potrero solamente extraen desde una profundidad 0–1 metro. En esta capa del suelo hay muy poca agua durante el periodo seco. Durante el periodo húmedo la evapotranspiración del bosque y potrero es casi igual a la evapotranspiración de referencia porque el agua no es un factor limitante para el proceso de evapotranspiración. Schellekens, et al⁵⁰ Wallace J, et al⁵¹.

⁵⁰ Schellekens, et al. (1999). Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico. *Journal of Hydrology*, 225, 168-184.

⁵¹ Wallace J, et al. (2006). On interception modelling of a lowland coastal rainforest in northern Queensland, Australia. [Article]. *Journal of Hydrology*, 329, 477-488. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.03.003.



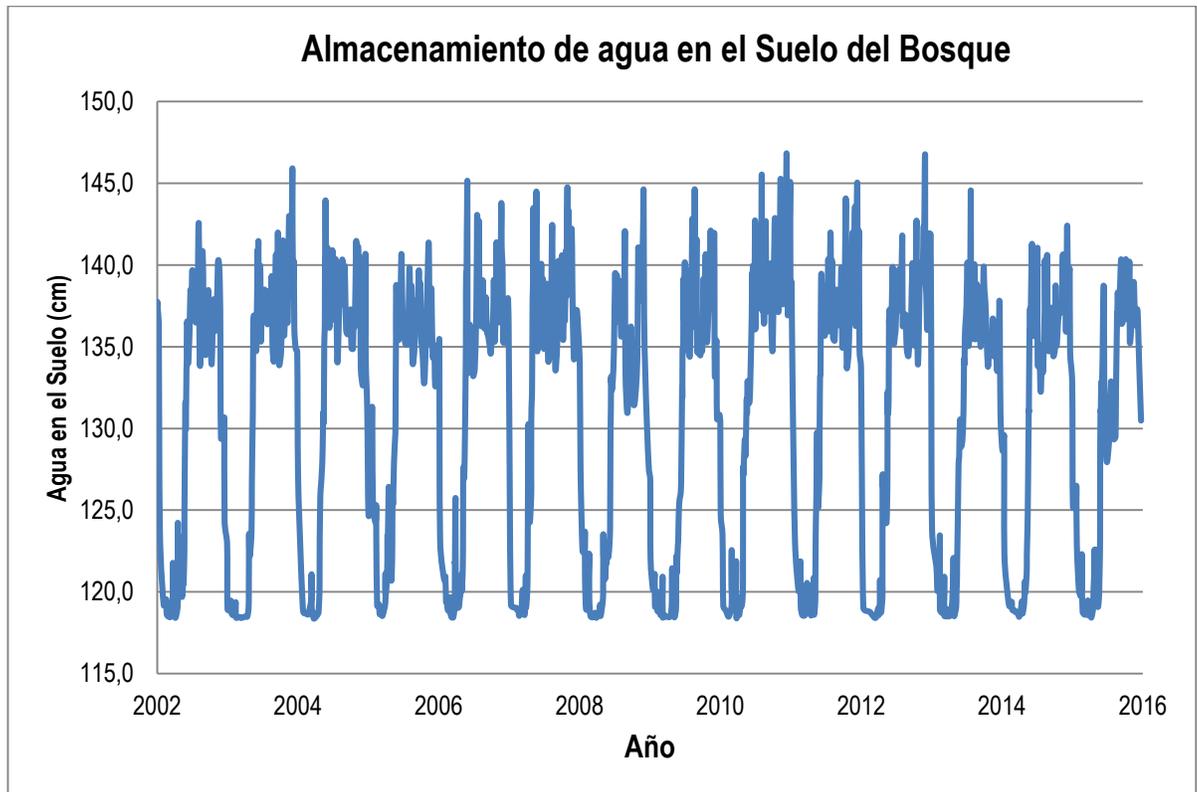
Figura 17. Almacenamiento de agua en el suelo de la zona de las raíces (Potrero) durante 2002–2015



En el potrero, el almacenamiento varía entre 77 y 95cm durante 2002–2015. Los valores más bajos se encuentran durante el periodo seco mientras que valores altos corresponden al periodo húmedo. Cada año al fin del periodo húmedo el almacenamiento regresa a 93cm lo que indica que el reservorio de suelo está lleno de agua.



Figura 18. Almacenamiento de agua en el suelo de la zona de las raíces (Bosque) durante 2002–2015



El almacenamiento de agua en el suelo de la zona de las raíces para el bosque durante 2002–2015 varía entre 118 y 147 cm. Los valores más bajos se encuentran durante el periodo seco mientras que valores altos corresponden al periodo húmedo. Cada año al final del periodo húmedo el almacenamiento regresa a 145 cm lo cual indica que el reservorio de suelo está lleno de agua.



Figura 19. La infiltración superficial/precipitación directa durante 2002–2015 en el potrero

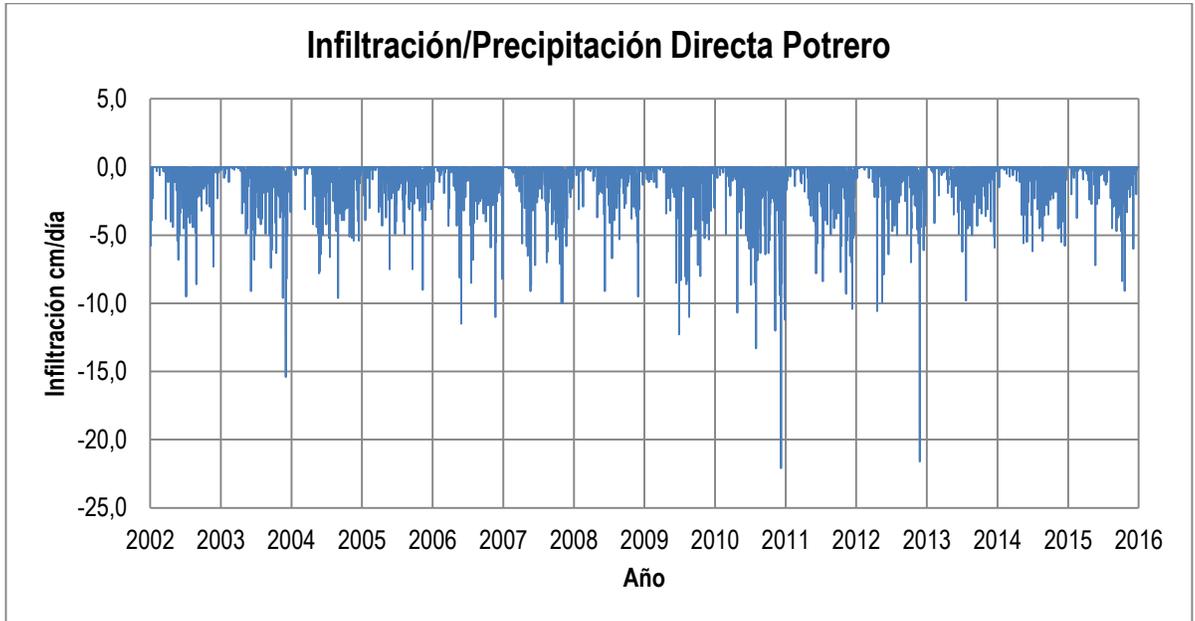


Figura 20. La infiltración superficial/precipitación directa durante 2002–2015 en el bosque

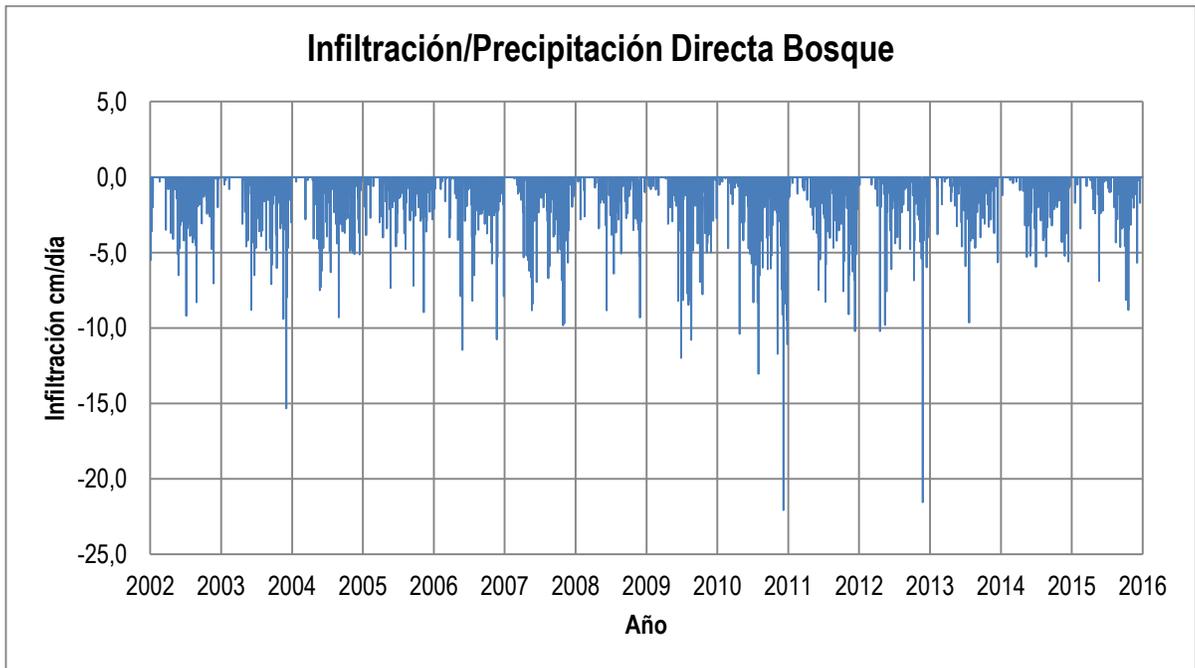




Figura 21. La infiltración profunda en el área de potrero durante 2002–2015

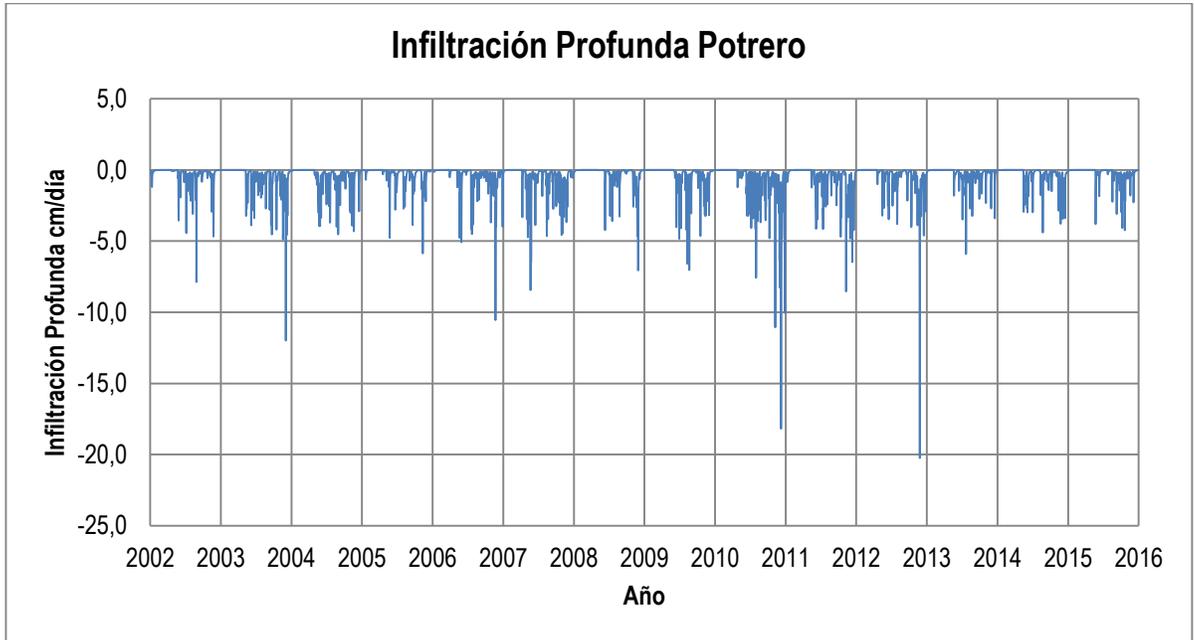
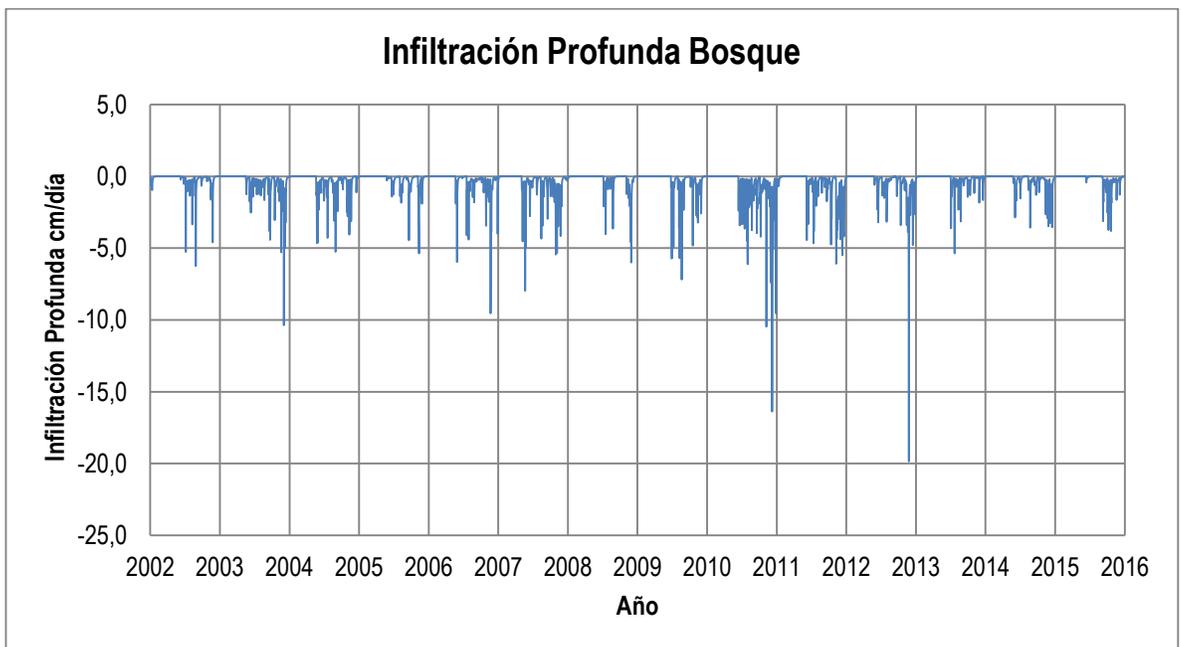


Figura 22. La infiltración profunda en el área de bosque durante 2002–2015





UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

Figura 23. Los flujos acumulados de la Precipitación (P), Evapotranspiración (ET) e Infiltración Profunda (IP) en el potrero durante 2002–2015

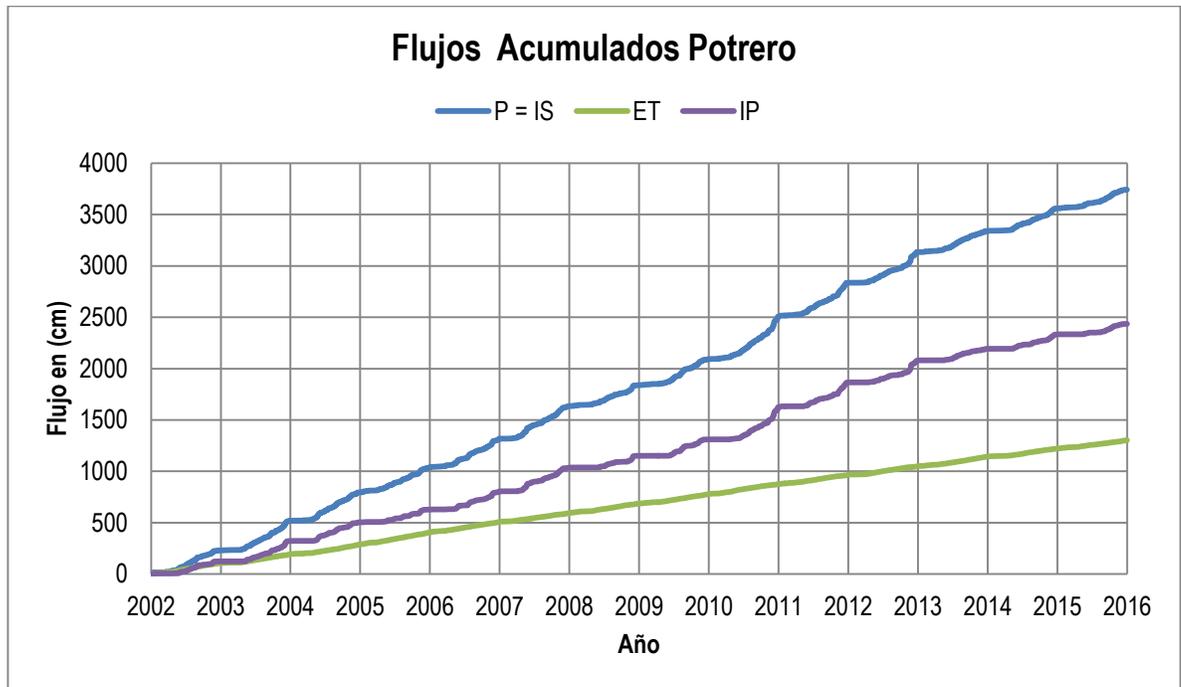
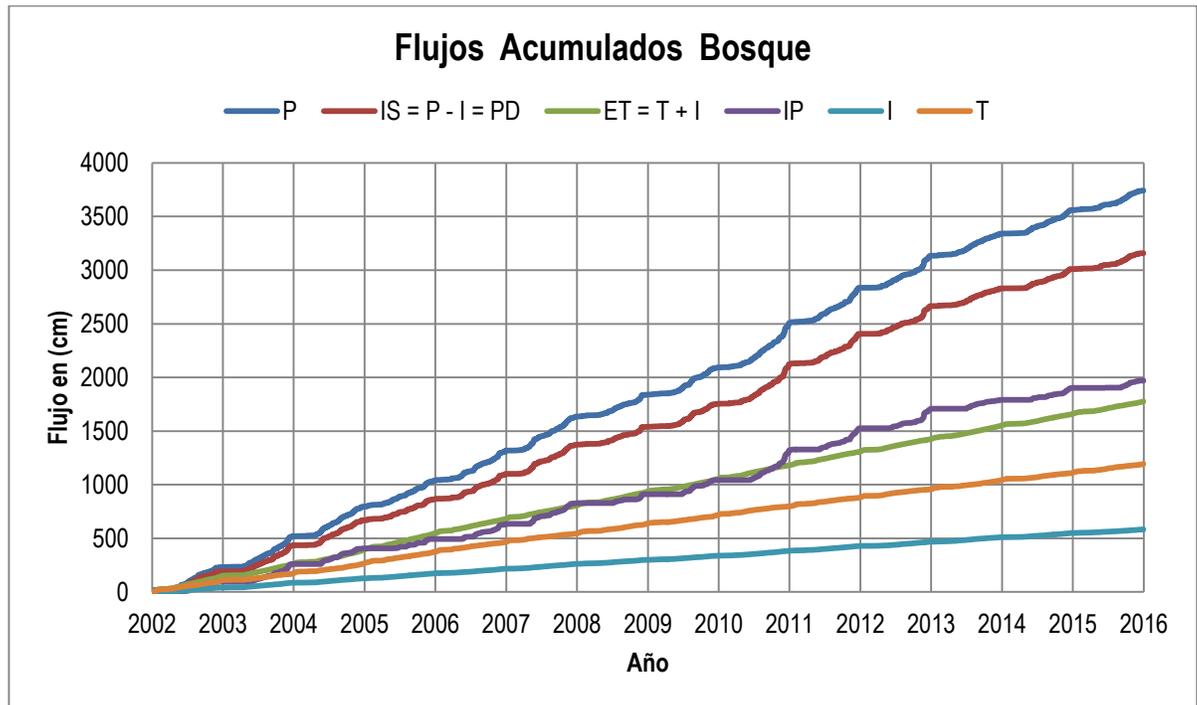




Figura 24. Los flujos acumulados de la Precipitación (P), Infiltración Superficial (IS), Evapotranspiración (ET), Infiltración Profunda (IP), Intercepción (I) y Transpiración (T) en el bosque durante 2002–2015



En contraste con el potrero, la ET en el Bosque es igual a la transpiración más la intercepción 16% de la precipitación.

Los cambios en los componentes del balance hidrológico son muy similares de un año a otro. Por tal motivo, se investigaron con detalle los del balance hidrológico de un año. Se usó el año 2009 porque es un año promedio y se poseen los valores de los componentes, basados en mediciones en el campo por Ogden et al. (2013).



Figura 25. La evapotranspiración para el potrero durante 2009

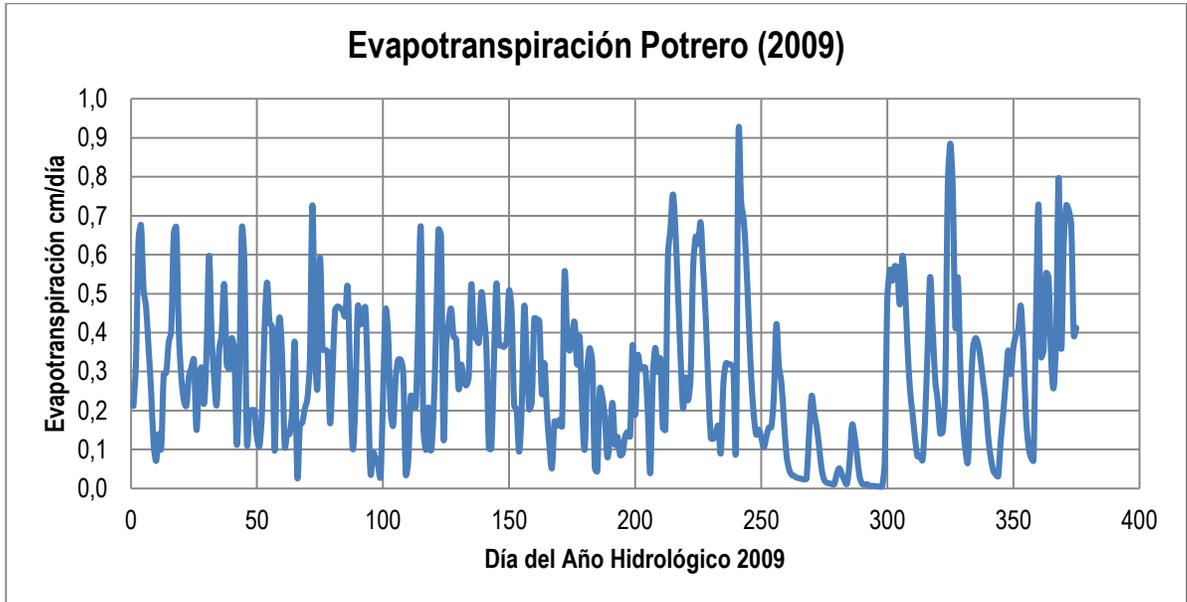


Figura 26. La evapotranspiración para el Bosque durante 2009

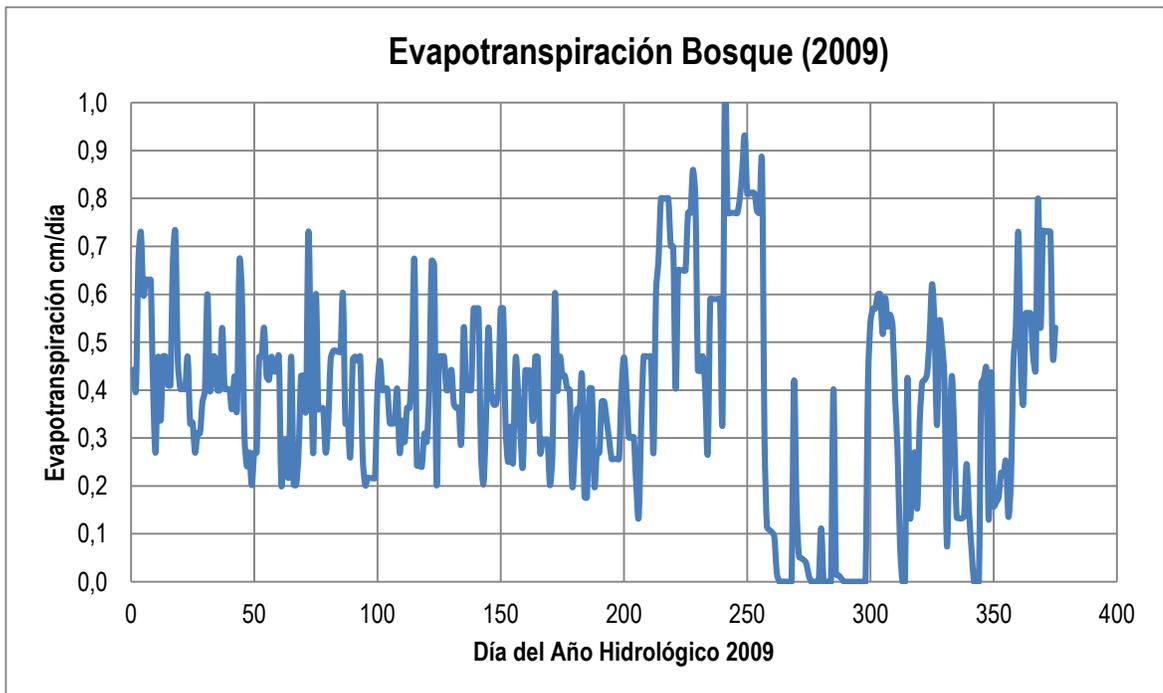
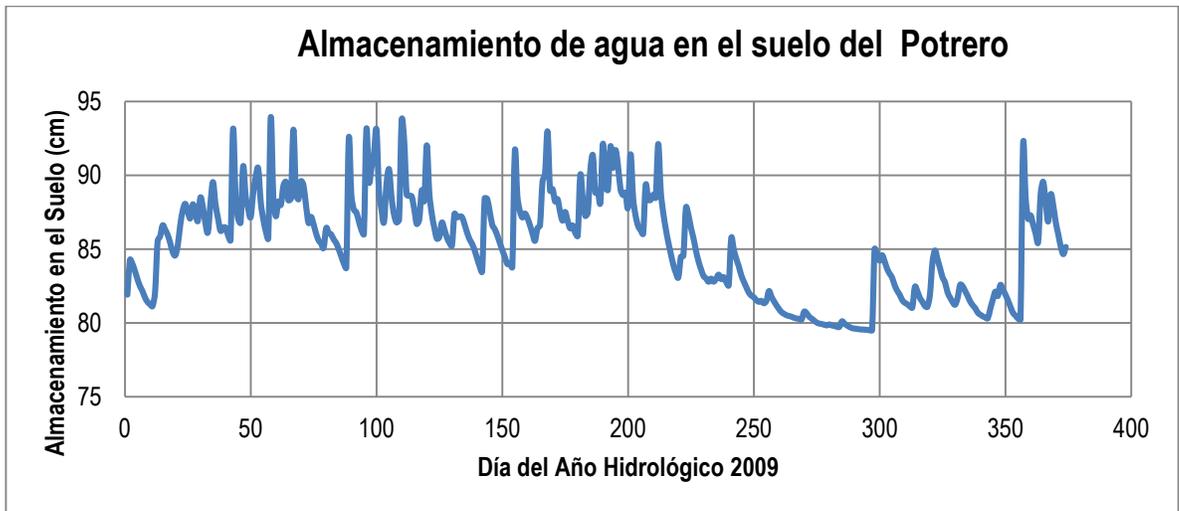




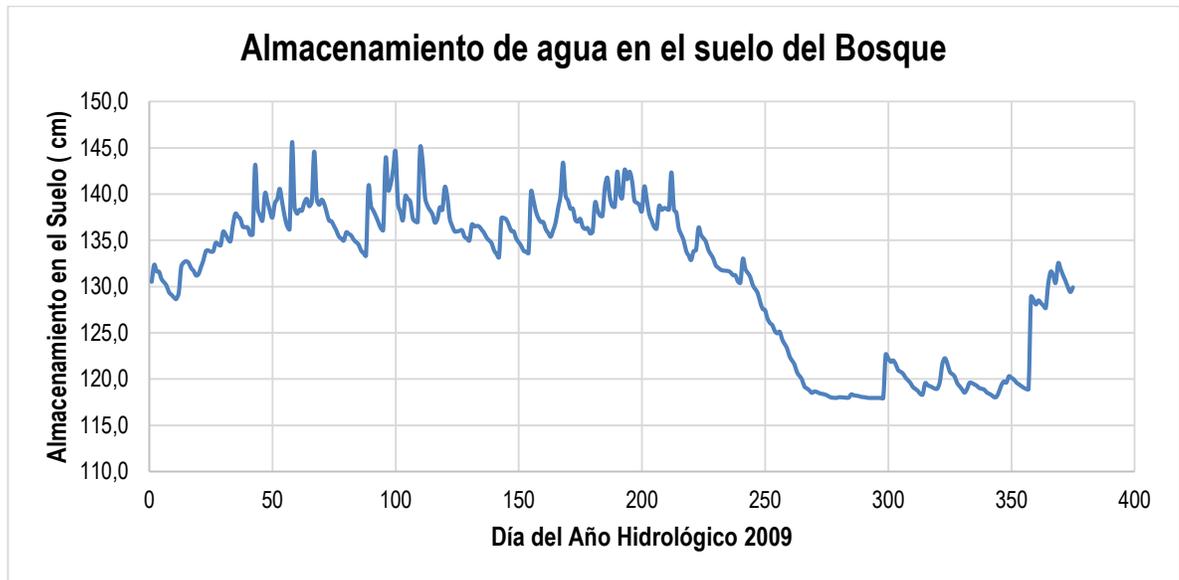
Figura 27. Almacenamiento de agua en el suelo de la zona de las raíces para el potrero durante 2009



El almacenamiento de agua en el suelo de la zona de las raíces para el potrero durante 2009 varía entre 79 y 94 cm. Los valores más bajos se encuentran durante el periodo seco (250-360) mientras que valores promedio de 87 cm son típicos para el periodo húmedo..



Figura 28. Almacenamiento de agua en el suelo de la zona de las raíces para el Bosque durante 2009



El almacenamiento de agua en el suelo de la zona de las raíces para el bosque durante 2009 varía entre 118 y 145 cm. Los valores más bajos se encuentran durante el periodo seco (250-360) mientras que valores alrededor de 137 cm son típicos para el periodo húmedo.



Figura 29. La infiltración superficial/precipitación directa durante 2009 en el potrero

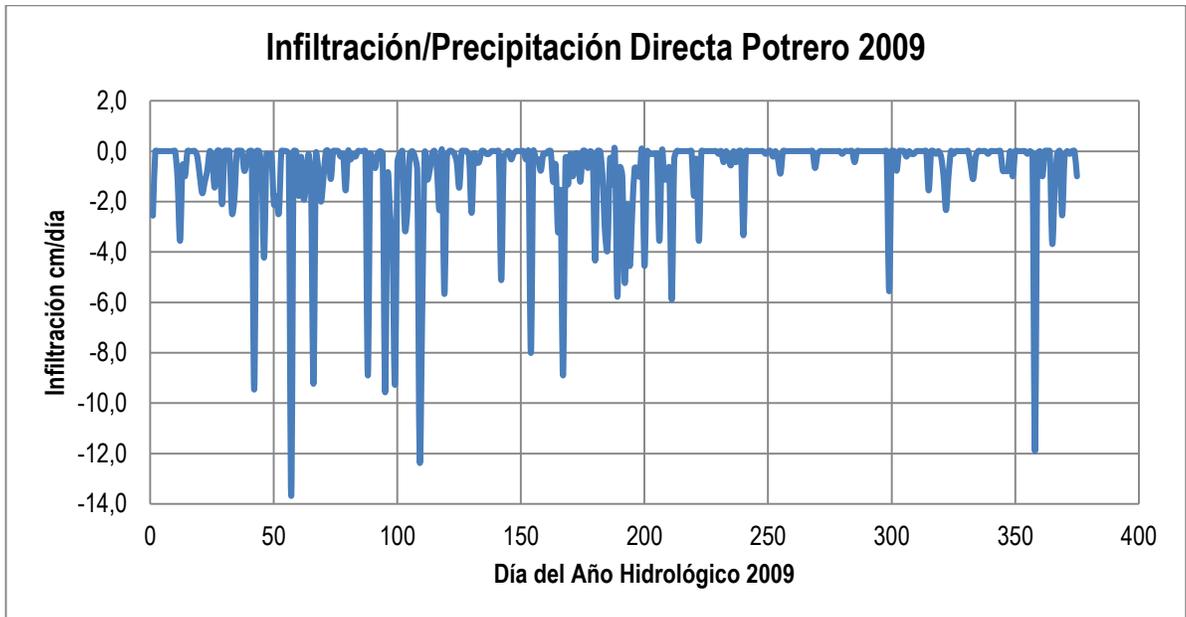


Figura 30. La infiltración superficial/precipitación directa durante 2009 en el bosque

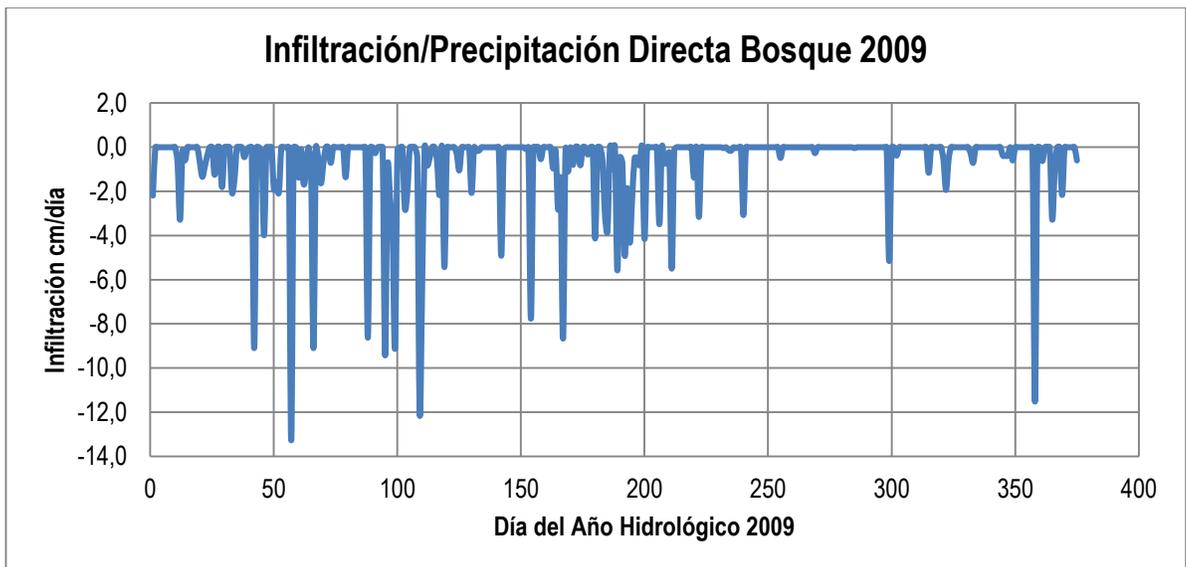




Figura 31. La infiltración profunda (IP) en el potrero durante 2009

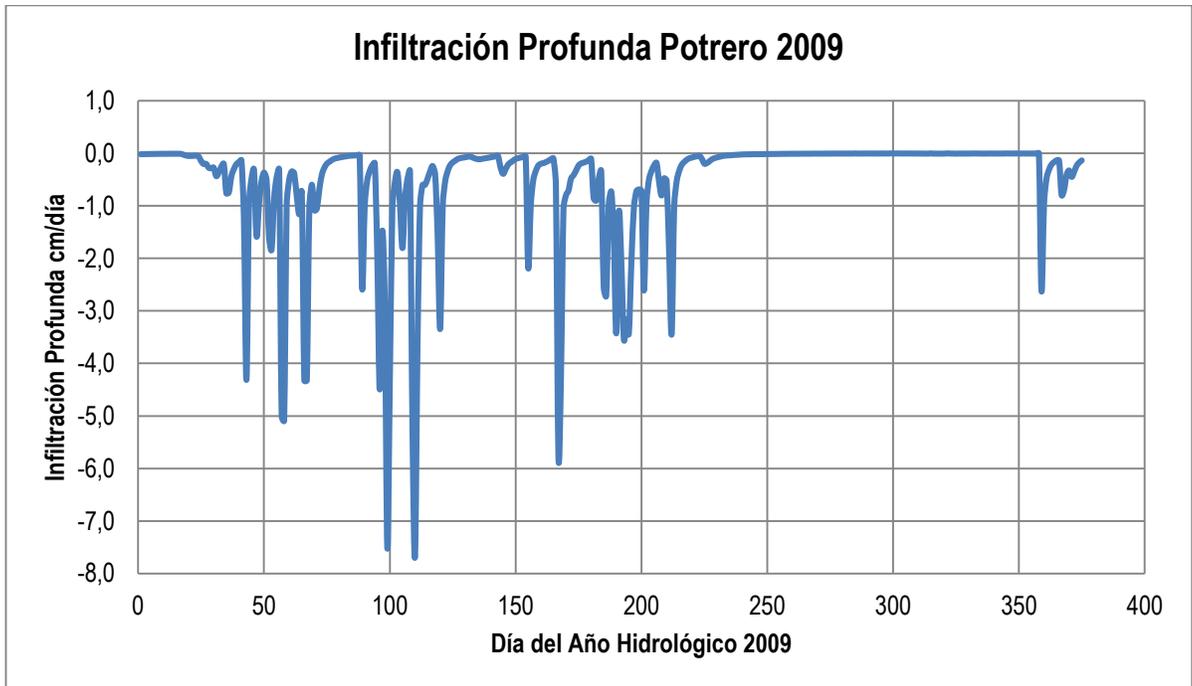


Figura 32. La infiltración profunda (IP) en el bosque durante 2009

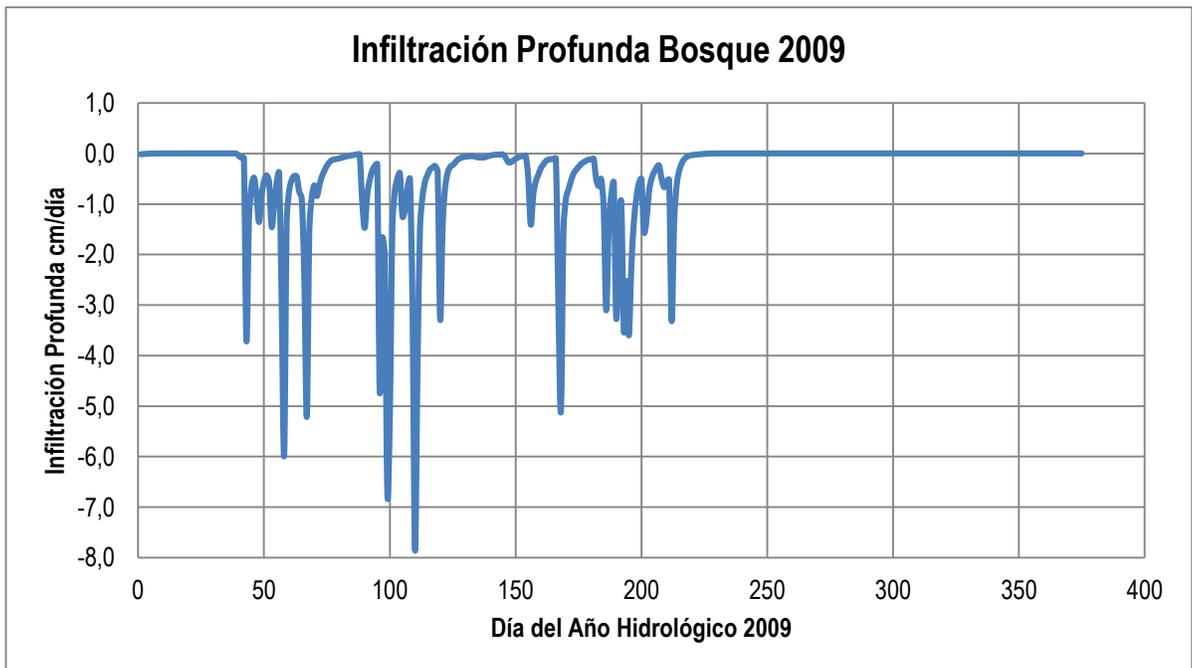




Figura 33. Los flujos acumulados de la Precipitación (P), Evapotranspiración (ET) e Infiltración Profunda (IP) en el potrero durante el año hidrológico 2009

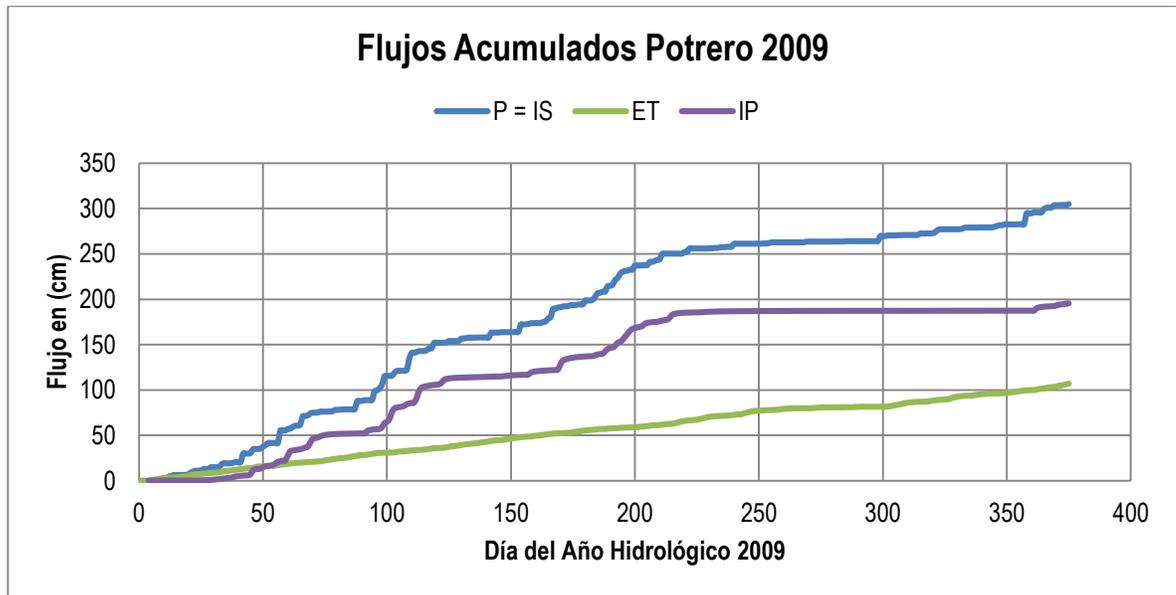
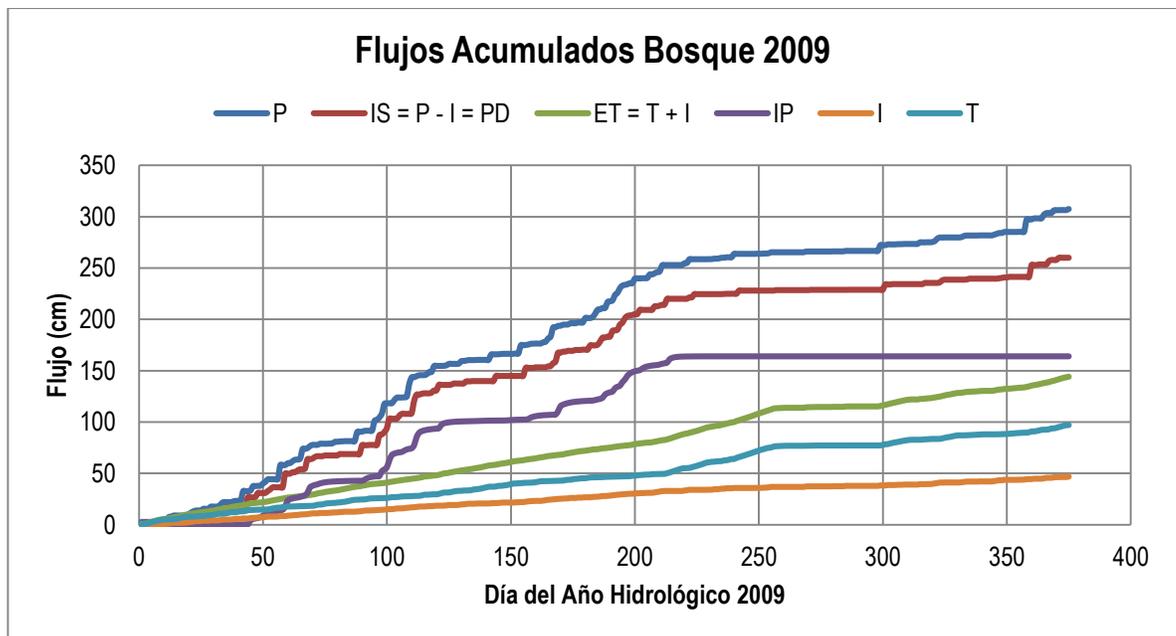


Figura 34. Los flujos acumulados de la Precipitación (P), Infiltración Superficial (IS), Evapotranspiración (ET), Infiltración Profunda (IP), Intercepción (I) y Transpiración (T) en el bosque durante el año hidrológico 2009





UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

9 CONCLUSIONES

La validación de los resultados de las simulaciones con HYDRUS-1D frente a los valores medidos en campo por Ogden, et al. (2013) durante el año hidrológico 2009 evidencian que el método de esta investigación es aplicable para el estudio de la dinámica entre la infiltración y la evapotranspiración en la Subcuenca Hidrográfica del Río Agua Salud.

Usando datos meteorológicos diarios durante 2002 - 2015 el modelo validado mostró que la evapotranspiración de bosque en el periodo húmedo (mayo–diciembre) es igual a la evapotranspiración de referencia (ETr) mientras que la evapotranspiración de potrero es alrededor de 80% de la ETr. Durante el periodo seco (enero–abril) la evapotranspiración de bosque y potrero fué alrededor de 40% y 20% de la ETr. La evapotranspiración promedio anual de bosque y potrero es 127 cm y 93 cm, respectivamente, lo que indica que una cobertura de bosque evapora 27% más que la cobertura de potrero. Este resultado está de acuerdo con los datos de la literatura.

El modelo validado durante el periodo 2002 – 2015 demostró que el promedio de la infiltración profunda de HYDRUS-1D para el bosque es menor que para el potrero. Para las condiciones en Agua Salud los valores de la infiltración profunda de bosque y potrero son más altos que las sumas de caudal y el cambio del almacenamiento de agua subterránea medidos en campo. La diferencia varía entre 41 cm o 33% en el bosque y 23 cm o 14% en el potrero y puede ser explicado por flujos subterráneos profundos o fuera de la cuenca.

Durante el periodo húmedo el modelo estimó una infiltración profunda de 140 cm en el bosque y 170 cm en el potrero. Esta diferencia de 30 cm o 21% entre las dos coberturas es significativa. Sin embargo no se puede confirmar una diferencia específica durante el periodo seco. En realidad la infiltración profunda fue ligeramente menos en el bosque; este resultado no soporta la hipótesis de efecto esponja. Más investigaciones son necesarias en Agua Salud para confirmar el comportamiento de la infiltración profunda bajo las dos coberturas de bosque y potrero.



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

10 RECOMENDACIONES

El modelo modelo Hydrus-1D indiscutiblemente se puede usar para el análisis del balance hídrico de diferentes coberturas vegetales en la cuenca del Canal de Panamá ya que arrojó estimaciones buenas de la evapotranspiración y de infiltración profunda. No obstante, algunos elementos hacen falta para realizar un análisis completo.

Este trabajo indica que el flujo de agua subterránea podría ser un componente relevante del balance hídrico. Se hace necesario medirlo en el campo, sin embargo, esta actividad no es fácil debido a la topografía y geología que presenta Agua Salud.

Se debe considerar que solamente la simulación con modelos tridimensionales con alta resolución espacial (10-30 m) y temporal (día, hora, minuto) pueden hacer un análisis completo del balance hídrico en Agua Salud. El Dr. Ogden está desarrollando tal modelo y Agua Salud podría ser un sitio de validación para dicho modelo avanzado.



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

11 BIBLIOGRAFÍA

ALLEN, et al. (2011). Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC, *Hydrologic Processes*, 25, 4011–4027.

ARI (1996). Aspectos geomorfológicos y erosión. (En Línea). Disponible en: <https://micanaldepanama.com/wp-content/uploads/2012/01/resumen-ejecutivo.pdf>. (Consultado el 13 de Marzo de 2016).

BRONER, et al. (1991). Evaluation of a modified atmometer for estimating reference ET, *Irrig. Sci.*, 12, 21–26.

BRUIJNZEEL, L, et al. “Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?”. (En línea). Disponible en: http://www.asb.cgiar.org/pdfwebdocs/AGEE_special_Bruijnzeel_Hydrological_functions.pdf. (Consultado el 23 Julio de 2015).

CALDER, et al. (2001). Scoping Study to Indicate the Direction and Magnitude of the Hydrological Impacts Resulting From Land Use Change on the Panama Canal Watershed. Newcastle Upon Tyne, U.K., Centre for Land Use and Water Resources Research, 45 pp.

Chen, F., and P. J. Robinson (2009). Estimating reference crop evapotranspiration with ETgages, *J. Irrig. Drain. Eng. Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(3), 335-342.

CLARK, K, et al. “The hydrological regime of a forested tropical Andean catchment”. (En línea). Disponible en: <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/18/5377/2014/hess-18-5377-2014.pdf>. (Consultado el 25 Julio de 2015).

CONGRESO FORESTAL MUNDIAL FAO (2°: 1997: Europa) Memorias del XI Congreso Forestal Mundial. Departamento de Montes, Wunelfe, 2008.



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

CONVENCIÓN SITIOS RAMSAR, 2005. Concepto de Recursos Hídricos. (En línea). Disponible en: <http://www.inecc.gob.mx/cuencas-conceptos>. (Consultado el 26 de julio de 2015).

CROAT TB. (1978). Flora of Barro Colorado Island. Stanford, California, U.S.A.: Stanford University Press. 943 p.

CUSTODIO, et al. Concepto de Infiltración. (En línea). Disponible en: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/rh01/rh01.pdf>. (Consultado el 28 de Julio de 2015).

DOWNER C, et al. (2006). Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis (GSSHA) User's Manual; Version 1.43 for Watershed Modeling System 6.1. ERDC/CHL SR-06-1.Rep., U.S. Army Corps of Engineers.

GALEANA P, et al. (2009). Análisis dimensional de la cobertura vegetal-uso de suelo en la Cuenca del Río Magdalena. *Rev. Cien. For. Mex.* (En línea). Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140535862009000100007&lnges&nrm=iso. ISSN 1405-3586. (Consultado el 28 de Julio de 2015).

GHIMIRE, C, et al. "Negative trade-off between changes in vegetation water use and infiltration recovery after reforestation degraded pasture land in the Nepalese Lesser Himalaya". (En línea). Disponible en internet: <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/18/4933/2014/hess-18-4933-2014.html>. (Consultado el 23 Julio de 2015).

GOTTLE, Albert y SÈNE El-hadji. Las Funciones Ambientales de los Bosques están descritas y ampliamente abordadas en "Funciones Protectoras y ambientales de los Bosques". (En línea). Disponible en: <http://www.aciamericas.coop/IMG/pdf/nt04.pdf>. (Consultado el 22 de Julio de 2015).

GRAY, et al. (1973). Concepto de Evaporación. (En línea). Disponible en: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20361/Capitulo3.pdf>. (Consultado el 28 de Julio de 2015).



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

HARMON, et al. (2005). The geological development of Panama, in *The Rio Chagres, Panama: A Multidisciplinary Profile of a Tropical Watershed*, edited by R. S. Harmon, pp. 45–64, Springer, Dordrecht, Netherlands.

HASSLER SK, et al. (2011). Recovery of saturated hydraulic conductivity under secondary succession on former pasture in the humid tropics. *For Ecol Manage* 261: 1634–1642.

HENDRICKX, et al. (2005). Estimation of regional actual evapotranspiration in the Panama Canal watershed, in *The Rio Chagres: A multidisciplinary profile of a tropical watershed*, edited by R. S. Harmon, pp. 315-324, Springer, Dordrecht, The Netherlands.

HENDRICKX, J. M. H., et al. (2016). Benchmarking optical/thermal satellite imagery for estimating evapotranspiration and soil moisture in decision support tools *Journal American Water Resources Association*, 52(1), 89-119.

HERAS, Rafael. Concepto de Balance Hídrico. (En línea). Disponible en: <http://ing.unne.edu.ar/pub/infi.pdf>. (Consultado el 26 de julio 2015).

HODNETT, M. G. et al. (1995). Seasonal soil water storage changes beneath central Amazonian rainforest and pasture, *J. Hydrol.*, 170(1-4), 233-254.

HORTON. Significado de Capacidad de infiltración. (En línea). Disponible en: <http://ing.unne.edu.ar/pub/infi.pdf>. (Consultado el 29 de Julio 2015).

INSTITUTO SMITHSONIAN DE INVESTIGACIONES TROPICALES- PANAMÁ. Especies arbóreas en el Proyecto Agua Salud. (En Línea). Disponible en: http://www.stri.si.edu/espanol/acerca_stri/noticias/noticias/articulo.php?id=1577. (Consultado el 14 de Enero de 2016).

INSTITUTO SMITHSONIAN DE INVESTIGACIONES TROPICALES DE PANAMÁ. Significado del Efecto Esponja. (En línea). Disponible en: <http://www.efeverde.com/noticias/cientificos-comprueban-en-panama-el-efecto-esponja-en-bosques-tropicales/>. (Consultado el 28 de Julio 2015).



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

Knox, J. W., J. A. Rodriguez-Diaz, and T. M. Hess (2011). Estimating Evapotranspiration by Using Atmometers for Irrigation Scheduling in a Humid Environment, *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 137(11), 685-691.

LEIGH, EG. (1999). *Tropical Forest Ecology. A View from Barro Colorado Island*. OxfordUK: Oxford University Press. 264 p.

LLERENA, C. Concepto de Cuenca Hidrológica. (En línea). Disponible en: http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf. (Consultado el 27 de Julio de 2015).

NEUMANN L, et al. (2011). Soil carbon dynamics under young tropical secondary forests on former pastures—A case study from Panama. *For Ecol Manage* 261: 1625–1633.

OGDEN, F. L., T. D. Crouch, R. F. Stallard, and J. S. Hall (2013). Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama, *Water Resour. Res.*, 49(12), 8443-8462.

OGDEN, F. L., and R. F. Stallard (2013). Land use effects on ecosystem service provisioning in tropical watersheds, still an important unsolved problem, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(52), E5037-E5037.

ORDOÑEZ. Concepto de Cuenca Hidrográfica. (En línea). Disponible en: http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf. (Consultado el 27 de Julio de 2015).

PEREIRA, et al. Concepto de Evapotranspiración. (En línea). Disponible en: http://www.crim.unam.mx/drupal/crimArchivos/Colec_Dig/2011/Ursula_Oswald/10_Chavez_Ramirez.pdf. (Consultado el 28 de Julio de 2015).

RECURSOS HÍDRICOS DE PANAMÁ. Mapa de la Precipitación media de la República de Panamá.

(En línea). Disponible en: <http://www.libertadciudadana.org/archivos/Biblioteca%20Virtual/Documentos%20Informes%20Indige>



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

[nas/Nacionales/Salud%20y%20Pobreza/Recurso%20Hidricos%20Panama%202011.pdf](#).

(Consultado el 01 de Agosto de 2015).

REVISTA INFORMATIVA DE LA AUTORIDAD DEL CANAL DE PANAMÁ (EL FARO). Significado de La Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá (CHCP). (En línea). Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Manejo_de_recursos_h%C3%ADdricos_en_la_Cuenca_Hidrogr%C3%A1fica_del_Canal_de_Panam%C3%A1. (Consultado el 27 de Julio de 2015).

Schellekens, J., Scatena, F., Bruijnzeel, L., & Wickel, A. (1999). Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico. *Journal of Hydrology*, 225, 168-184.

SCOTT, Jefferson et al. "The ecology and ecosystem services of native trees: Implications for reforestation and land restoration in Mesoamerica". (En línea). Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112710007115>. (Consultado el 24 de Julio de 2015).

SERVICIO NACIONAL DE ESTUDIOS TERRITORIALES – SERVICIO HIDROLÓGICO NACIONAL (2005). Balance hídrico integrado y dinámico en el Salvador, componente evaluación de recursos hídricos. (En línea). Disponible en: <http://www.snet.gob.sv/Documentos/balanceHidrico.pdf>. (Consultado el 22 de Marzo de 2016).

SHAW (1996). Concepto de Intercepción. (En línea). Disponible en: <http://mingaonline.uach.cl/pdf/bosque/v21n1/art05.pdf>. (Consultado el 21 de Marzo de 2016).

SIAGUA. Características del Clima de Panamá. (En línea). Disponible en: <http://www.siagua.org/pais/panama>. (Consultado el 30 de Julio de 2015).

Šimůnek J., Van Genuchten M. T. y Šejna M., 2009b, The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.08. University of California Riverside, Riverside, California, USA: Department of Environmental Sciences.



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

SIMUNEK, J., and J. W. Hopmans (2009). Modeling compensated root water and nutrient uptake, *ECOMOD Ecological Modelling*, 220(4), 505-521.

SITUACIÓN ACTUAL DE LA GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN PANAMÁ.
<http://www.pnuma.org/agua-miaac/CODIA%20HIDROGEOLOGIA/MATERIAL%20ADICIONAL/PONENCIAS%20HIDROGEOLOGIA/PARTICIPANTES/Panama/Hidrogeologia%20en%20Panama.pdf>. Panamá, 2010.

STALLARD, R. F. (1995). Relating chemical and physical erosion, in *Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals, Reviews in Mineralogy*, 31, edited by A. F. White and S. L. Brantley, pp. 543–564, Mineral. Soc. of Am, Washington, D. C

THORNTHWAITE. (1948). Concepto de Evapotranspiración Potencial y Real. (En línea). Disponible en: <https://fferrer.webs.ull.es/Bibliog/Biblio/Evapotranspiracion.pdf>. (Consultado el 21 de Marzo de 2016).

TOMASELLA, et al. (1996). Funciones de pedotransferencia en suelos tropicales. (En línea). Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Javier_Tomasella/publication/251455080_Pedotransfer_functions_for_tropical_soils/links/00b7d5242bd19c8734000000.pdf. (Consultado el 27 de Marzo de 2016).

TOMASELLA, et al. (1996), Chapter 5 Soil hydraulic properties and van Genuchten parameters for an oxisol under pasture in central Amazonia, in *Amazonian deforestation and climate*, edited by J. H. C. Gash, C. A. Nobre, J. M. Roberts and R. L. Victoria, pp. 101-124, John Wiley.

TOMMY, et al. (1988). Mapa Geomorfológico contenido en el Atlas Nacional de la República de Panamá. (En Línea). Disponible en: http://www.hidromet.com.pa/documentos/Nota_Explicativa_Hidrogeologico.pdf. (Consultado el 15 de Marzo de 2016).

TREY D.; Stallard, Robert F.; and Hall, Jefferson S. (2013). "Effect of Land Cover and Use on Dry Season River Runoff, Runoff Efficiency, and Peak Storm Runoff in the Seasonal Tropics of Central Panama." *WATER RESOURCES RESEARCH* 49.12, 8443-8462.



**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

TURNER B, et al. (2010). Soil organic phosphorus in lowland tropical rain forests. *Biogeochemistry* 103: 297–315.

VAN BREUGEL, et al. (2011). Estimating carbon stock in secondary forests: Decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. *For Ecol Manage* 262: 1648–1657.

VAN BREUGEL, et al. (2013). Succession of Ephemeral Secondary Forests and Their Limited Role for the Conservation of Floristic Diversity in a Human-Modified Tropical Landscape. (En línea). Disponible en: <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0082433>. (Consultado el 20 de Febrero de 2016).

VAN GENUCHTEN. (1980). Parameter estimation for unsaturated flow and transport models. (En línea). Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169487902071>. (Consultado el 23 de Febrero de 2016).

Wallace, J., & McJannet, D. (2006). On interception modelling of a lowland coastal rainforest in northern Queensland, Australia. [Article]. *Journal of Hydrology*, 329, 477-488. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.03.003.

WOHL, E., et al. (2012). The hydrology of the humid tropics, *Nature Clim. Change*, 2, 655–662, doi:610.1038/nclimate1556.



ANEXOS

Anexo1. Mapa Cobertura Vegetal presente en el área de estudio.

