

**PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO**

Comportamiento hidrológico de sistemas de producción ganadera convencional y silvopastoril en la zona de recarga hídrica de la subcuenca del Río Jabonal, cuenca del Río Barranca, Costa Rica

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza como requisito para optar por el grado de:

***Magister Scientiae* en Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas**

Por

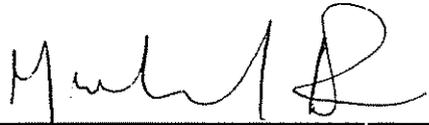
JOSÉ NEY RÍOS RAMÍREZ

Turrialba, Costa Rica, 2006

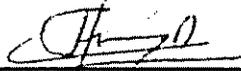
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE, y aprobada por el Comité Consejero del estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

Magister Scientiae en Manejo de Cuencas Hidrográficas

FIRMANTES:



Muhammad Ibrahim Ph. D
Consejero Principal



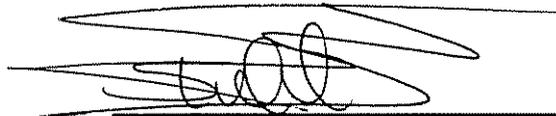
Francisco Jiménez Dr. Sc
Miembro del Comité Consejero



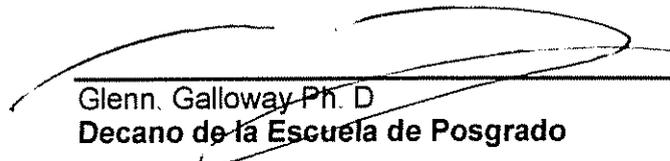
Freddy Sancho, M. Sc.
Miembro del Comité Consejero



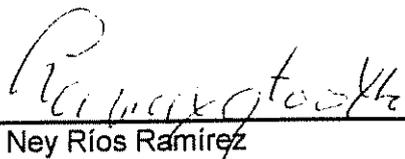
Hernán Jair Andrade, M. Sc.
Miembro del Comité Consejero



Sebastián Salazar Salvatierra
Miembro del Comité Consejero



Glenn Galloway Ph. D
Decano de la Escuela de Posgrado



José Ney Ríos Ramírez
Candidato

Dedicatoria

A mi Bendita Madre Devi Kundalini.

A mis padres Juan y Delicia

A mi esposa Ángela y a Delicia, Judith y Zenith nuestras hijas

Agradecimientos

Al Dr Muhammad Ibrahim, profesor consejero, por su valioso apoyo y orientación recibida durante el desarrollo del trabajo de investigación, asimismo por sus valiosos consejos, comprensión y paciencia. Muchas gracias por su valiosa ayuda.

Al coordinador de la maestría de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas Dr Francisco Jiménez por sus valiosos consejos, apoyo y orientación académica.

A los miembros de mi comité asesor: Francisco Jiménez; Freddy Sancho; Hernán J. Andrade y Sebastián Salazar, por los consejos y la ayuda brindada en el desarrollo de esta tesis.

Al Personal del Proyecto GEF Silvopastoril en Esparza, muchas gracias por su apoyo.

Al Sr. Rolando Ramírez y familia por su amistad y valiosa ayuda.

A mis amigos del CATIE por su amistad, con los cuales he compartido alegrías y penas.

A todo el personal administrativo del CATIE por su apoyo.

A la Fundación Ford, por la darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría, en especial al personal de la zona Peruano-Chilena; espero algún día retribuir dicha ayuda.

Biografía

El autor nació en la provincia de Jaén, Cajamarca - Perú y se graduó como Ingeniero Zootecnista en la Universidad Nacional de Cajamarca en el año de 1998 y tiene diplomados en Administración, Operación y Mantenimiento en Agua y Saneamiento de Sistemas de Agua Potable y Saneamiento Rural y Supervisión de Procesos Educativos en Agua y Saneamiento y Saneamiento Rural.

Hasta la fecha a desempeñado los siguientes actividades : responsable del área de capacitación integral y proyectista agropecuario para la zona de Jaén, San Ignacio, Bagua y Condorcanqui en la empresa R – CIS Ingenieros - Perú; en la elaboración de expedientes técnicos pecuarios para CARITAS –Jaén; Técnico vacunador ganadero en la zona de frontera nor-oriental; en la Promoción y Fomento Agropecuario en la zona del Alto Marañón con comunidades Aguarunas y Huambizas con el Proyecto Especial Jaén- San Ignacio – Bagua (PEJSIB) y con el Programa Nacional de Asistencia Alimentaria (PRONAA); supervisor del área de operaciones en Yanacocha y Consultor para establecimiento de metodologías de estimación de parámetros hidrológicos en sistemas ganaderos en Matiguas – Nicaragua.

Contenido

Dedicatoria	3
Agradecimientos	4
Biografía	5
Contenido	6
Resumen	8
Summary	10
ÍNDICE DE CUADROS	12
ÍNDICE DE FIGURAS	15
I. INTRODUCCIÓN	17
1.1. Objetivo general	18
1.2. Objetivos específicos	18
1.3. Hipótesis	18
II. MARCO CONCEPTUAL	19
2.1 Contexto actual de los sistemas silvopastoriles en América Tropical	19
2.2 Los sistemas silvopastoriles: una opción de manejo	20
2.3 Procesos hidrológicos en una cuenca hidrográfica	22
2.3.1. El ciclo hidrológico	22
2.3.2. Balance hídrico	24
2.3.2.1. Ecuación general del balance hídrico	26
2.3.2.2. Componentes del balance hídrico y su medición	27
A. La precipitación	27
a. Precipitación incidente o precipitación bruta (P_i)	28
b. Precipitación neta	28
c. Interceptación (I)	28
B. Capacidad de retención de aguas y sus variaciones	29
C. Evapotranspiración	35
D. Drenaje o percolación	36
E. Escorrentía	36
a. Escorrentía directa	36
b. Escorrentía básica	37
2.4 Uso del suelo y sus efectos en la cantidad del agua	38
2.5 Conceptos básicos	44
III. MATERIALES Y MÉTODOS	46
3.1. Descripción del área de estudio	46
A. Ubicación	46
B. Datos e índices representativos de la cuenca	46
3.1.1 Suelos	49
3.1.2 Clima	50
3.2. Población en estudio y variables evaluadas	51
3.3. Análisis estadístico	53
3.4. Metodologías	54
3.4.1.1. Estimación de la escorrentía superficial	54
3.4.1.1.1. Mediciones y cálculos	57
3.4.1.2. Estimación de la capacidad de infiltración	61
3.4.1.2.1. Mediciones y cálculos	62
3.4.1.3. Estimación de la conductividad hidráulica (K)	63

3.4.1.4.	Estimación de agua “útil”	66
3.4.1.5.	Estimación de humedad volumétrica y lámina de agua.....	67
3.4.5.1.1.	Mediciones y cálculos.....	68
3.4.5.1.2.	Datos necesarios:	68
3.4.1.6.	Estimación del balance hídrico	69
3.4.1.6.1.	Mediciones y cálculos.....	69
3.4.1.7.	Estimación de variables complementarias.....	70
3.4.1.7.1.	Densidad aparente.....	70
3.4.1.7.2.	Textura	70
3.4.1.7.3.	Caracterización vegetal.....	71
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
4.1.	Caracterización de los sistemas evaluados	73
A.	Pastura nativa sobrepastoreada	73
B.	Pastura nativa con árboles.....	74
C.	Pastura mejorada con árboles.....	76
D.	Bosque secundario intervenido	77
4.2.	Características físicas del Suelo	80
4.3.	Escorrentía superficial.....	80
4.4.	Capacidad de infiltración.....	84
4.5.	Conductividad hidráulica (K)	88
4.6.	Agua útil en el suelo	89
4.7.	Humedad volumétrica (Hv) y lámina de Agua.....	90
4.8.	Balance hídrico.....	91
4.9.	Influencia de la vegetación sobre los parámetros hidrológicos.....	92
V.	CONCLUSIONES.....	96
VI.	RECOMENDACIONES	97
VII.	LITERATURA CITADA.....	98
VIII.	ANEXOS.....	105

Ríos, N. 2006. Comportamiento hidrológico de sistemas de producción ganadera convencional y silvopastoril en la zona de recarga hídrica de la subcuenca del Río Jabonal, cuenca del Río Barranca, Costa Rica. Tesis, Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 116 p

Palabras clave: Sistemas silvopastoriles, Comportamiento Hidrológico, Escorrentía Superficial, Infiltración, Conductividad Hidráulica, Humedad Gravimétrica, Humedad Volumétrica, Retención de Humedad, Balance Hídrico y Caracterización Vegetal.

Resumen

La conversión de sistemas agropecuarios ganaderos tradicionales a sistemas intensivos es una tendencia que se viene dando en los últimos años en muchas regiones de Mesoamérica y Sudamérica. Los sistemas silvopastoriles son una alternativa de manejo sostenible de sistemas ganaderos por lo que conocer el impacto que tienen sobre el recurso hídrico, en especial en zonas de recarga, es de mucha importancia. El objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento hidrológico de los sistemas ganaderos convencionales y sistemas silvopastoriles en zonas de recarga hídrica de la subcuenca del Río Jabonal. La investigación se realizó en fincas que forman parte del proyecto CATIE – GEF – Banco Mundial “Enfoques Silvopastoriles para el Manejo Integrado de Ecosistemas”, ubicadas en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica. El estudio se realizó durante la época lluviosa, de mayo a noviembre del año 2005. Los sistemas que se evaluaron son: pasturas nativas sobrepastoreadas, pasturas nativas con árboles, pasturas mejoradas con árboles y un bosque secundario intervenido. Las variables hidrológicas evaluadas fueron la escorrentía superficial, infiltración, conductividad hidráulica y capacidad de retención de humedad; mediante muestreos en cada uno de los sistemas. La escorrentía fue evaluada mediante la instalación de parcelas de escorrentía con dimensiones 5 x 10 m ubicadas en cada sistema (3 parcelas por sistema); la capacidad de infiltración fue estimada mediante el método de anillos concéntricos, mediante la realización de tres pruebas simultáneas en cada uno de los sistemas; la conductividad hidráulica y la capacidad de retención de humedad (0,33, 1 y 15 bares) se midieron mediante el uso de muestras inalteradas de suelo (9 submuestras por cada sistema); de igual forma fue estimada la densidad aparente y la textura de los suelos. Fue realizada también la caracterización del suelo y la cobertura vegetal de cada uno de los sistemas. El sistema que presentó los mayores

valores de escorrentía fue la pastura nativa sobrepastoreada(28%); seguida por la pastura nativa con árboles (27%); mientras que la pastura mejorada con árboles (15%) y el bosque secundario intervenido (7%) presentaron los valores más bajos. El umbral de escorrentía fue el siguiente: 2,5 mm en las pasturas nativas sobrepastoreadas, 2,7 mm en la pastura nativa con árboles, 3,2 mm en las pasturas mejoradas con árboles y 12,6 mm en el bosque secundario intervenido. Respecto a la capacidad de infiltración en las pasturas nativas sobrepastoreadas ($0,07 \text{ cm h}^{-1}$) se presentó el valor más bajo respecto a las pasturas nativas con árboles ($0,19 \text{ cm h}^{-1}$), a las pasturas mejoradas con árboles ($0,23 \text{ cm h}^{-1}$) y al bosque secundario intervenido ($3,54 \text{ cm h}^{-1}$). La humedad volumétrica del suelo a una profundidad de 15 cm fue de 0,664 mm las pasturas nativas sobrepastoreadas, 0,73 mm en la pastura nativa con árboles, 0,70 mm en la pastura mejorada con árboles y de 0,73 mm en el bosque secundario intervenido. En conclusión, los sistemas silvopastoriles mostraron brindar mejores beneficios hidrológicos en la zona de recarga que las pasturas sobrepastoreadas, ya que disminuyeron la escorrentía superficial, incrementaron la infiltración y favorecieron a una mayor conservación de agua en el suelo.

Rios, J. 2006. Hydrologic behaviour of livestock production systems conventional and silvopastoral in the recharge zone of the subwatershed of Jabonal River, watershed of Barranca River, Costa Rica. Thesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 116 p.

Key words: Silvopastoral systems, hydrologic behaviour, runoff, infiltration, hydraulic conductivity, gravimetric soil moisture, retention soil moisture, volumetric soil moisture, hydrological balance, vegetal characterization.

Summary

The conversion of conventional livestock production systems to other more intensive production systems is a tendency in many regions of Mesoamerica, and South America. Silvopastoral systems are one strategy of sustainable livestock management for what know the hydrological behaviour in recharge zone is very important. The main objective of this research was to evaluate the hydrological performance of livestock production systems conventional and silvopastoral in the recharge zone of Jabonal River, Costa Rica. The research was developed in several livestock farms that participate in the CATIE – GEF Project “Silvopastoral Systems Approach to Ecosystems Management”. This study was developed from May to November 2005 (wet season). Four systems were evaluated; native overgrazed grasslands without trees, native grasslands with trees, improved grasslands with trees, secondary regeneration forest “Tacotal”. The variables measured by sample scheme were; runoff, infiltration rate, hydraulic conductivity, and retention soil moisture. To measure runoff, three runoff plots (5 x 10 m) were installed in each system. Infiltration capacity was measured with the double ring infiltration methodology. Hydraulic conductivity were measured in unaltered soil samples (9 sub-samples for each system) and retention soil moisture was measured at three different pressures (0.33, 1 and 15 bars). The same number of sub-samples was taken to measure bulk density, and soil texture. In addition, soil and vegetal characterization were realized in each system. Runoff presented the following values; native overgrazed grasslands without trees (28%), native pasture with trees (27%), improved grassland with trees (15%), and secondary regeneration forest (7%). Runoff Threshold were 2.5 mm in overgrazed grasslands without trees, 2.7 mm in native pasture with trees, 3.2 mm in improved grassland with trees, and 12.6 mm in secondary regeneration forest. Infiltration rate showed the next values; 0.07 cm h⁻¹ in

native overgrazed grasslands, 0.19 cm h^{-1} in native pasture with trees, 0.23 cm h^{-1} in improved grassland with trees, and 3.45 cm h^{-1} in secondary regeneration forest. Volumetric soil moisture at 15 cm deep presented the follow values; 0.66 mm in native overgrazed grasslands, 0.73 mm in native pasture with trees, 0.70 mm in improved grassland with trees, and 0.73 mm in secondary regeneration forest. In conclusion, silvopastoral systems (native pasture with trees, improved grassland with trees) showed better hydrological benefits than the native overgrazed grasslands, because they reduced runoff, improve infiltration rate, and improved the soil moisture content.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Promedio valores y rangos para variables hidrológicas en bosques tropicales húmedos.....	25
Cuadro 2. Características de métodos volumétricos para monitorear el agua en el suelo	32
Cuadro 3. Características de métodos tensiométricos para monitorear el agua en el suelo	33
Cuadro 4. Variables hidrológicas y metodologías usadas para su medición.	38
Cuadro 5. Datos e índices representativos de la subcuenca del Río Jabonal, cuenca del Río Barranca, Costa Rica, 2005.	47
Cuadro 6. Sistemas de uso de suelos evaluados en la subcuenca del Río Jabonal, cuenca del Río Barranca, Costa Rica, 2005.	52
Cuadro 7. Variables evaluadas	52
Cuadro 8. Ejemplo de medidas necesarias para el cálculo de infiltración .	62
Cuadro 9. Medidas necesarias para el cálculo de la conductividad hidráulica (K).....	64
Cuadro 10. Ejemplo de cálculo de la conductividad hidráulica	65
Cuadro 11. Ejemplo del cálculo del balance hídrico	69
Cuadro 12. Características de los horizontes del suelo de la pastura nativa sobrepastoreada en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.	74
Cuadro 13. Características de los horizontes del suelo de la pastura nativa con árboles en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005. .	75
Cuadro 14. Características de los horizontes del suelo de la pastura mejorada con árboles en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.	77
Cuadro 15. Características de los horizontes del suelo del bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.	78
Cuadro 16. Densidad aparente (g cm^{-3}) promedio y textura en los diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.....	80

Cuadro 17. Capacidad de infiltración promedio por sistema en sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.	85
Cuadro 18. Capacidad de retención de humedad a 0,33, 1,0 y 15 bares y Agua útil en los sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005. ...	89
Cuadro 19. Humedad volumétrica promedio en los diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.	90
Cuadro 20. Almacenamiento promedio de agua (mm) a capacidad de campo en los diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.	90
Cuadro 21. Balance hídrico en mm durante un periodo de 67 días en los diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005. ...	91
Cuadro 22. Balance hídrico en porcentaje (%) durante un periodo de 67 días en los diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.	92
Cuadro 23. Matriz de variables evaluadas en los sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido evaluados en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.	93
Cuadro 24. Matriz de coeficientes de correlación y sus respectivas probabilidades de las variables evaluadas en los sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido evaluados en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.	94
Cuadro 25. Formato para toma de datos de escorrentía	105
Cuadro 26. Formato para la toma de datos de infiltración.	105
Cuadro 27. Datos meteorológicos durante periodo de estudio	106
Cuadro 28. Escorrentía superficial promedio (%) durante 50 eventos de lluvia en diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.	107
Cuadro 29. Balance hídrico (mm) durante un periodo de 67 días en pasturas nativas sobre pastoreadas en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005	109

Cuadro 30 Balance hídrico (mm) durante un periodo de 67 días en pasturas nativas con árboles en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.....	111
Cuadro 31 Balance hídrico (mm) durante un periodo de 67 días en pasturas mejoradas con árboles en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.....	113
Cuadro 32 Balance hídrico (mm) durante un periodo de 67 días en el bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.....	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Fases del ciclo hidrológico.....	22
Figura 2.	Métodos para estimar condición de agua en el suelo.....	30
Figura 3.	Componentes del ciclo hidrológico en bht.	37
Figura 4.	Mapa de ubicación de la subcuenca del Río Jabonal.....	48
Figura 5.	Perfil longitudinal del cauce del río principal de la subcuenca del Río Jabonal, Cuenca del Río Barranca, Costa Rica, 2005.....	49
Figura 6.	Fotografía del perfil del suelo en el sistema de pasturas nativas sobre pastoreadas a una profundidad de 1,50 m, en la subcuenca del Río Jabonal, Cuenca del Río Barranca, Costa Rica, 2005.	50
Figura 7.	Fotografía de la estación meteorológica instalada en el sitio experimental ubicada en la subcuenca del Río Jabonal, Cuenca del Río Barranca, Costa Rica, 2005.	51
Figura 8.	Parcela de escorrentía: diseño y dimensiones.....	55
Figura 9.	Parcela de escorrentía: sistema colector y drenaje.....	55
Figura 10.	Tipo de pluviómetro colocado sobre las parcelas de escorrentía.....	56
Figura 11.	Sistemas evaluados y parcelas de escorrentía.....	56
Figura 12.	Anillos concéntricos para estimar infiltración.....	61
Figura 13.	Fases para estimación de conductividad hidráulica.....	63
Figura 14.	Variables para el cálculo de la conductividad hidráulica.....	65
Figura 15.	Toma de muestras inalteradas del suelo tomadas para la estimación del contenido de humedad.....	66
Figura 16.	Esquema de la metodología para determinación de la abundancia y riqueza vegetal.....	71
Figura 17.	Esquema de la metodología para la determinación de cobertura de malezas y pastos.....	72
Figura 18.	Cobertura vegetal de la pastura nativa sobrepastoreada evaluada en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.....	73
Figura 19.	Estructura vertical de la pastura nativa sobrepastoreada evaluada en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.....	73

Figura 20	Cobertura vegetal de la pastura nativa con árboles evaluada en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.....	74
Figura 21	Estructura vertical de la pastura nativa con árboles evaluada en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.....	75
Figura 22	Cobertura vegetal de la pastura mejorada con árboles evaluada en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.....	76
Figura 23	Estructura vertical de la pastura mejorada con árboles evaluada en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.....	76
Figura 24	Cobertura vegetal del bosque secundario intervenido evaluado en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.....	77
Figura 25	Estructura vertical del bosque secundario intervenido evaluado en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.....	78
Figura 26.	Umbral promedio de escorrentía superficial (mm) en los diferentes sistemas en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.	81
Figura 27.	Escorrentía superficial promedio (%) y su desviación estándar durante 50 eventos de lluvia en diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.	82
Figura 28.	Curvas de escorrentía superficial promedio generada de 50 eventos de lluvia en diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005. ..	83
Figura 29.	Velocidad de infiltración en los sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.....	86
Figura 30.	Conductividad hidráulica promedio en los diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.	88
Figura 31.	Capacidad de retención de humedad a 0,33, 1,0 y 15 bares en los sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.C.....	89
Figura 32.	Curvas de infiltración en mmh-1 en los diferentes sistemas de producción animal en la subcuenca el Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.....	107
Figura 33.	Curvas de infiltración del bosque secundario intervenido en la subcuenca el Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.....	108

I. INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas son zonas geográficamente delimitadas en las cuales se desarrollan actividades, ambientales, agrícolas, económicas y sociales, cuyos elementos naturales principales y básicos como el agua, el suelo, la vegetación y el clima deben ser conocidos con la finalidad de poder entender los diferentes procesos biofísicos que en ella se desarrollan. En esta cadena de actividades, el agua cumple el papel de recurso integrador, por lo que es de suma importancia conocer los impactos y procesos hidrológicos de los cambios de uso de la tierra, su valorización económica y el entorno social en que se desarrollan.

En los últimos años, se han producido cambios rápidos en las formas de aprovechamiento de los recursos naturales, afectando la calidad y cantidad de agua, lo que implican una fase de transición de una época en que se pensaba que el agua era un recurso inagotable a un futuro en el que su disponibilidad y utilización estará condicionada por la escasez creciente en muchas partes del mundo, concordando con el principio de Dublín que enuncia que “el agua dulce es un recurso vulnerable y finito, esencial para mantener la vida, el desarrollo y el medio ambiente”

El sector pecuario, como parte del sistema agrícola no escapa a estos cambios, los que se dan debido al incremento poblacional y su constante demanda alimenticia; este escenario presenta consecuencias ambientales tanto positivas (por ejemplo el mejoramiento de la fertilidad del suelo mediante la aplicación de estiércol) como negativas (como la contaminación de medios acuáticos por la eliminación inadecuada de las aguas servidas de las plantas de procesamiento), a diferentes niveles: local, regional e internacional

Los sistemas silvopastoriles son una alternativa de manejo de sistemas ganaderos, debido a que tienen la capacidad de brindar mejores condiciones a los suelos en zonas de recarga y por consiguiente influenciar en los caudales de nacientes y quebradas, ya que la presencia de árboles afecta la dinámica del agua de varias formas: actuando como barreras, las cuales controlan la escorrentía; como cobertura, la cual reduce el impacto de las gotas de lluvia y como mejoradores del suelo, incrementando la infiltración y la retención de agua.

La estimación de los parámetros hidrológicos en sistemas silvopastoriles y sistemas tradicionales es de mucha relevancia debido a que permite conocer el impacto que tienen estos sistemas en la conservación de sistemas acuáticos

1.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento hidrológico de los sistemas ganaderos convencionales y sistemas silvopastoriles en zonas de recarga hídrica de la subcuenca del Río Jabonal.

1.2. Objetivos específicos

- a. Estimar escorrentía superficial, capacidad de infiltración, conductividad hidráulica y retención de humedad en sistemas ganaderos (pasturas nativas sobre pastoreadas, pasturas nativas con árboles, pasturas mejoradas con árboles) y un bosque secundario intervenido.
- b. Calcular el balance hídrico de los sistemas ganaderos (pasturas nativas sobre pastoreadas, pasturas nativas con árboles, pasturas mejoradas con árboles) y el bosque secundario intervenido.
- c. Estimar el efecto de la cobertura vegetal de los sistemas en las variables hidrológicas.

1.3. Hipótesis

- a. La escorrentía superficial se reduce y la capacidad de infiltración se incrementa con SSP que con sistemas ganaderos convencionales.
- b. Los SSP contribuyen a mejorar la infiltración de agua en la zona de recarga en las cuencas hidrográficas.

II. MARCO CONCEPTUAL

2.1 Contexto actual de los sistemas silvopastoriles en América Tropical

La cobertura vegetal, como componente del sistema cuenca y las interrelaciones con los componentes biofísicos y socioeconómicos, dan lugar a cambios que afectan los componentes del ciclo hidrológico (Lluval y Uhl 1990; Vahrson 1990; Chávez y Leopoldo 1991; Leopoldo *et al* 1995; Barrantes *et al* 1997; Alves *et al* 1999). Por otro lado, los investigadores sobre ganadería en América Latina, durante mucho tiempo, han argumentado que los cambios tecnológicos que mejoran la productividad en la crianza del ganado, reducirán la presión sobre los bosques (Serrao y Toledo 1993; Mattos y Uhl 1994; Arima y Uhl 1997).

Investigaciones muestran claramente que la ganadería y los bosques no sólo deben vivir en armonía, sino que es la única forma en que ambos sistemas de explotación sean rentables y contribuyan a la sostenibilidad de los bosques (Solano 1994; Aguirre e Ibrahim 1999), lo que contribuiría a conservar las reservas de agua.

Kaimowitz (1996), indica que el cambio más importante en el uso de suelo en uso de tierra en América Latina tropical en los últimos 30 años a sido la conversión de bosque a pastura. Entre 1981 y 1990, la región perdió 75 millones de hectáreas de bosque, la mayoría fueron convertidas a pasturas (FAO 1993).

Uno de los principales problemas de los sistemas de producción animal son las pasturas degradadas. Una pastura degradada se define como un área utilizada en la ganadería generalmente con una cobertura de gramíneas o ciperáceas, con grados de enmalezamiento, de compactación del suelo, erosión, tales que su productividad biológica y económica son inadecuadas (Argel 1992). Las pasturas degradadas provocan disturbios ambientales y económicos (Szott *et al* 2000).

Cada año, América Latina pierde cerca de cinco millones de hectáreas de bosque natural por año (FAO 2001). La mayoría de esas tierras son destinadas a pasturas (Steinfeld *et al* 1998; Bilsborrow y Carr 2001), determinándose que la expansión de los pastos, es la característica principal que diferencia los modelos de deforestación en la región respecto a otras regiones del mundo (Rudel *et al.* 2000).

En América Central, muchas laderas se han erosionado a causa el sobrepastoreo (Pezo *et al* 1992); esta situación ha provocado que más del 50% de las tierras bajo pasturas se encuentren en un estado de degradación (Szoot *et al* 2000). Los árboles de uso múltiple pueden jugar un rol importante en la restauración ecológica de éstas, mientras contribuyen con la sostenibilidad económica de los sistemas de producción ganadera (Szott *et al* 1999).

En los sistemas de pastoreo intensivo es necesaria la inclusión del componente arbóreo, ya que estudios conducidos por Ahmed *et al* (1987) y Martínez *et al* (1992) señalan que los efectos de la compactación a causa de los sistemas intensivos en monocultivo, están asociados a reducciones en la tasa de infiltración y crecimiento de las plantas e incrementan las probabilidades de erosión (Villanueva 2001).

En Costa Rica, desde 1960 el área cubierta de pastos para ganadería de carne se incrementó al 26% del total de la superficie del país, la tasa de cobertura boscosa que mantenía una reducción promedio anual de 2% entre 1960 y 1980, se duplicó entre 1980 y 1990 (Dengo *et al* 1999). La mayoría de explotaciones ganaderas especializadas en leche de Centroamérica, operan en terrenos escarpados y en muchos casos la misma intensificación de los sistemas exige utilizar una alta carga animal; fenómeno que incide en una menor cobertura vegetal dentro del área destinada para las pasturas. Esta situación hace aumentar el deterioro del suelo, agua y biodiversidad a nivel de cuencas hidrográficas (Villanueva 2001).

2.2 Los sistemas silvopastoriles: una opción de manejo

Un sistema silvopastoril (SSP) es una opción de producción pecuaria que involucra la presencia de las leñosas perennes (árboles o arbustos), interactuando con los componentes tradicionales (forrajeras, herbáceas y animales), bajo un sistema de manejo integral y tendiente a incrementar la productividad y el beneficio neto del sistema en el largo plazo (Pezo e Ibrahim 1996). Entre los sistemas silvopastoriles más comunes están: cercas vivas, bancos de proteína y/o energía, leñosas perennes como barreras vivas en áreas de pendiente, cultivo en callejones con leguminosas arbóreas o arbustivas con forrajeras herbáceas, pastoreo bajo maderables o frutales con forrajeras, cortinas rompevientos y pastoreo en charrales, tacotales o matorrales (Pezo e Ibrahim 1996).

La introducción de especies leñosas en los sistemas de producción ganadera surge como una estrategia para reducir los impactos ambientales negativos de los sistemas tradicionales (Pezo e Ibrahim 1996). El 90% de las fincas ganaderas en Costa Rica tienen árboles dispersos en potreros para proveer sombra a los animales y generar otros beneficios. Asimismo más de un 75% tienen cercas vivas para separar los pastizales (Guevara *et al* 1994; Harvey y Haber 1999). Los sistemas de producción bovina bajo enfoque silvopastoril ofrecen mayores potencialidades que muchos sistemas agrícolas al manejo de los recursos naturales (Murgueitio 2000).

Los sistemas silvopastoriles reúnen una serie de atributos, que los vuelven atractivos para los productores, tales como: producen forrajes y otros productos de valor como frutas y madera, mitigan el efecto del calor y del frío en los animales, reciclan nutrientes al suelo, controlan la erosión, ofrecen sostenibilidad a las pasturas, favorecen la vida silvestre, conservan por más tiempo la humedad del suelo propiciando con ello el crecimiento de la vegetación acompañante (Libreros 1996; Giraldo 1996 ; Somarriba 1997; Carvalho 1997; Cruz *et al* 1999).

El manejo adecuado de los pastos, el establecimiento de sistemas silvopastoriles (SSP) y especialmente el manejo durante la época seca en las laderas, se convierten en los grandes desafíos para lograr una ganadería rentable y congruente. Esto con la finalidad de brindar servicios de mayor calidad y cantidad de agua en las cuencas, debido a que las prácticas de uso de la tierra tienen impactos importantes, tanto en la disponibilidad como en la calidad de los recursos hídricos (Kiersch 2000).

Quizá el consecuencia más importante de los sistemas silvopastoriles sea el efecto de los árboles sobre el balance hídrico del sistema (Wilson y Ludlow 1991), ya que cuando leñosas y las pasturas comparten el mismo espacio, como son los sistemas de plantaciones o de árboles dispersos en potreros; la menor temperatura en el estrato herbáceo bajo la copa de los árboles provoca una disminución en la tasa de transpiración a través de los estomas (Baruch y Fisher 1991).

Wilson y Wild 1991 indican que estos efectos (baja temperatura, menor pérdida de humedad y evaporación en el suelo y la vegetación) permiten una baja temperatura del suelo, lo cual resulta en menores pérdidas de agua por evaporación, los que pueden retrasar la incidencia del estrés hídrico característico del período seco (Reynolds 1995).

Este nuevo enfoque de uso sostenible de los recursos naturales fue considerado en los avances de la convención de cambio climático de Kyoto, año donde se valoró como alternativa prioritaria el desarrollo de la ganadería con enfoque silvopastoril con capacidad de generación de beneficios ambientales, la restauración de suelos y conservación de agua, secuestro de carbono y conservación de la biodiversidad (Camero *et al* 2000; Murgueitio 2000).

2.3 Procesos hidrológicos en una cuenca hidrográfica

Los términos de “protección de cuencas”, “función de protección de cuencas” y beneficios de la protección de cuencas” no tienen una definición exacta. Una definición más precisa con base en revisiones bibliográficas podría ser “beneficios hidrológicos” (Mouraille *et al* 1996).

2.3.1. El ciclo hidrológico

Uno de los grandes ciclos en la naturaleza es el del agua (figura 1), la que se da en forma constante entre la atmósfera y la tierra, pasando por los ecosistemas (vegetación, animales y suelo) y por la corteza terrestre a los océanos para luego regresar a la atmósfera (Fassbender 1993). Todos estos cambios, movimientos y diferentes formas que afecta el agua en la naturaleza constituye el ciclo hidrológico (Leibscher, 1985).

El ciclo del agua en la naturaleza se debe a flujos positivos y negativos, los positivos o de ingreso de agua al sistema vienen a ser : precipitación, agua almacenada, condensación, escurrimiento superficial, escurrimiento subterráneo, infiltración y agua freática-efecto capilar; y flujos negativos o egresos de agua en el sistema como: escurrimiento superficial, escurrimiento subterráneo, evapotranspiración y percolación (Gavande 1972).

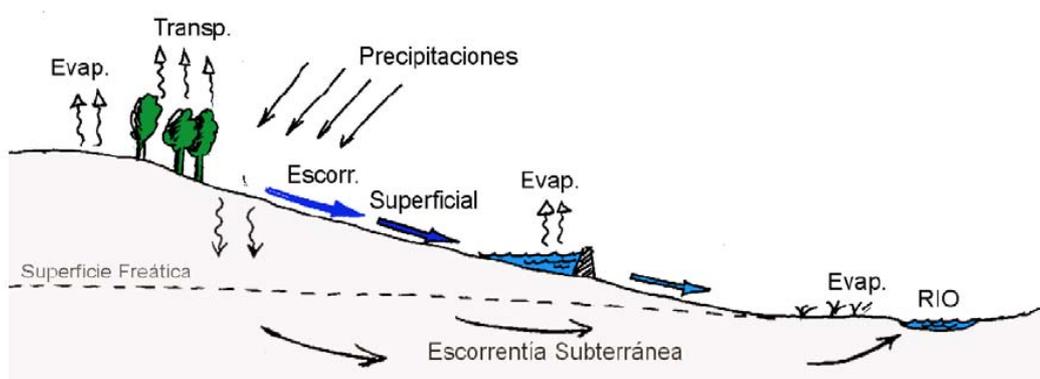


Figura 1. Fases del ciclo hidrológico

La fuente principal de agua que alimenta el ciclo hidrológico de una cuenca es la precipitación (Walling 1980); la excepción se da en el caso de la precipitación horizontal, que es humedad capturada por la vegetación en bosques nubosos o en otras áreas sujetas a la exposición de la neblina o nubes bajas. Una porción de la lluvia que llega es primero “interceptada” por las copas de los árboles del bosque y luego evaporada a la atmósfera. Además la transpiración del bosque resulta en humedad para el suelo, siendo llevada desde las raíces hasta las copas y luego evaporada.

Estos dos procesos, interceptación y transpiración, forman la “pérdida” de humedad relacionada con cualquier tipo de cobertura vegetativa. La precipitación neta, por otro lado, está compuesta por la lluvia que no es “interceptada”, precipitación directa y lluvia interceptada, pero que continuamente se escurre a través de las copas (goteo de copas), y que luego corre hacia abajo por los troncos y el fuste (escurrimiento de fuste) (Mouraille *et al* 1996).

Cuando la precipitación neta alcanza el piso boscoso se encontrará con la capa de material orgánico o con suelo sin cobertura herbácea viva. Bruijnzeel (1990) reporta que la evaporación de estas superficies no es significativa; y que los suelos desnudos varían de un 0 a 21 % del área total del terreno en los bosques húmedos tropicales, con una tendencia menor hacia valores más bajos en bosques montanos. Por lo tanto diremos que es la capa del suelo con material orgánico y no las copas de los árboles lo que protege a las partículas del suelo de ser removidas por el golpe de las gotas de la lluvia (Hudson 1981; Stocking 1988; Bruijnzeel 1990; Calder 1992).

El agua que llega al piso del bosque converge a un canal al igual que el flujo superficial. Mientras que la capacidad de infiltración no sea excedida por la precipitación, el agua se va a filtrar hacia abajo hasta que alcance una capa impermeable y comience a trasladarse lateralmente hacia el canal de agua. En algunos casos el agua podría filtrarse hacia afuera de la cuenca sin entrar a la corriente de agua. El agua que se mueve relativamente lenta a través de la capa subterránea y dentro de los canales, forma el flujo base que viene a ser el nivel mínimo de agua no vinculado a un evento específico de lluvia. La tasa de flujos máximos (incremento en el flujo de agua en respuesta a un evento de lluvia) va a ser dependiente de la hidrológica de las pendientes. Bruijnzeel 1990, resume la investigación de estos flujos indicando que en los bosques naturales el exceso de

los flujos superficiales es normalmente menor que el 1 % de la lluvia, mientras que se ha reportado la saturación de flujos superficiales arriba de 47% de la corriente de agua, como la capa impermeable que llega a la tierra, evidenciándose claramente que la forma geológica de un área determinará los patrones hidrológicos en la pendientes.

El cuadro 1 provee un excelente un excelente resumen de investigaciones dirigida a la cuantificación de las variables hidrológicas

2.3.2. Balance hídrico

Se considera que el balance de agua es la diferencia existente entre el ingreso y el egreso de agua a un sistema. Cuando se trata de ecosistemas deben considerarse la vegetación y el suelo (evapotranspiración), pudiendo usarse diferentes fórmulas (Grima y Fassbender 1981).

El concepto de balance hídrico es una representación teórica de los intercambios de agua entre las plantas, el suelo y la atmósfera, permitiéndonos hacer una cuantificación del recurso hídrico a diferente escala ya sea parcela, finca, cuenca o región y las modificaciones del mismo por influencia de las técnicas de manejo de la agricultura y de las actividades del hombre en general (Jiménez 2003).

Cuadro 1. Promedio valores y rangos para variables hidrológicas en bosques tropicales húmedos

Variable Hidrológica	Bosque de Tierras Bajas	Bosques Montanos	Bosques Nubosos
Intercepción ¹	13% de lluvia (4.5-22%; n=14)	18% de lluvia(10-24%; n=6)	10% valores negativos
Transpiración	1045 mm año ⁻¹ (885-1285mm año ⁻¹ ;n= 9)	rango de 510-830 mm año ⁻¹ (n=5)	rango de 75- 510 mm año ⁻¹ (n =4)
Evapotranspiración	1430 mm año ⁻¹ (1311-1498mm año ⁻¹ ; n=11)	1225 mm año ⁻¹ (1155-1295 mm año ⁻¹ ; n=5)	rango 308-392 mm año ⁻¹ (n=3) ³
Precipitación Neta Promedio ²	85% de lluvia (n=3)	81% de lluvia (n=6)	
Escurrimiento de Fuste	1-10% en bosques montanos bajos		
Precipitación Horizontal	La captura de cientos de mm año ⁻¹ de precipitación horizontal por parte del bosque nubosos con valores típicos de lluvia entre 4 - 18% y máximos sobre el 100%		

Notas¹: probablemente sobrestimado; ² probablemente subestimado; ³ las estimaciones de la precipitación horizontal están disponibles y deben incluirse en el cálculo de la evapotranspiración para llegar a totales de 570 mm año⁻¹ y 775 mm año⁻¹.

Fuente: Bruijnzeel y Proctor (1993) y Bruijnzeel (1990).

El balance hídrico de un área determinada, nos permite establecer las pérdidas y ganancias de agua que se dan, cuya aplicación es de mucha importancia en diferentes áreas como:

- El diagnóstico hídrico de un sistema de producción (como los sistemas agroforestales).
- El seguimiento hídrico de un sistema Agroforestal a través de su ciclo vegetativo.
- Estimar la pérdida de suelo (erosión) y nutrientes en el proceso escurrimiento superficial.
- Comparar la diferencia en el uso de agua por las diferentes combinaciones árbol – cultivo.
- La planificación y evaluación de los recursos hídricos de una cuenca, una región, etc. Así como las modificaciones por la influencia e las actividades humanas.

2.3.2.1. Ecuación general del balance hídrico

El estudio del balance hídrico se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, conocido también como ecuación de continuidad; la que establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier periodo de tiempo, las diferencias entre las entradas y salidas estarán condicionadas por la variación del volumen de agua almacenada (Jiménez 2003).

De la totalidad de agua aportada al suelo ya sea mediante la precipitación (Pp) o el riego (R) no se pierde nada; y el agua puede:

- Ser evaporada desde el suelo o el dosel (agua interceptada) fenómeno conocido como vaporación, ser transpirada por las plantas; el conjunto de estos dos procesos es conocidos como evapotranspiración (ET).
- Infiltrarse hacia las capas profundas del suelo, fuera del alcance de las raíces de las plantas; proceso que se conoce como drenaje o percolación (P).
- Ser escurrida sobre la superficie del suelo y alimentar los flujos de agua naturales como los ríos y lagos, o artificiales como embalses. Este proceso es conocido como escurrimiento (E).

- Ser almacenada por el suelo y recargar la reserva de agua del mismo (ΔH).

La fórmula del balance hídrico se puede escribir en los términos siguientes:

$$Pp + R = ET + D + E \pm \Delta H$$

Donde:

Pp	=	Precipitación
R	=	Riego
ET	=	Evapotranspiración
D	=	Drenaje
E	=	Escurrimiento superficial
ΔH	=	Diferencial de humedad en el suelo

2.3.2.2. Componentes del balance hídrico y su medición

A. La precipitación

La precipitación es generalmente la única fuente de humedad que tiene el suelo, por eso es conveniente que su medición sea precisa ya que de ello depende, en gran medida, la exactitud de todos los cálculos siguientes del balance hídrico (Jiménez 2003). El agua precipitada puede tener los siguientes caminos: ser evaporada o evapotranspirada, escurrir superficialmente o construir la escorrentía subterránea o percolación.

Parte del agua de las lluvias que cae en un bosque es retenida temporalmente por las ramas y hojas de los árboles o arbustos, retornando a la atmósfera como vapor de agua, el resto alcanza el piso del suelo pasando directamente por los espacios vacíos de las copas de los árboles o escurre por los troncos (Soriano y Shimomichi 1991).

En la evaluación de la precipitación para efectos de balance hídrico de sistemas agroforestales se deben considerar varios términos:

a. Precipitación incidente o precipitación bruta (P_i)

Es la lluvia que ingresa al sistema proveniente de las nubes. El instrumento que se usa para su medición puede ser el pluviómetro, el que nos permite obtener la cantidad de lluvia caída, y el pluviógrafo que nos ayuda a conocer la cantidad de lluvia caída, la intensidad, la duración y la frecuencia de eventos. La precipitación puede ser medida en centímetros o en pulgadas, dependiendo del instrumento o equipo pero, se expresa generalmente en milímetros.

b. Precipitación neta

Es la lluvia que llega al suelo ya sea en forma directa (gotas que no fueron interceptadas por la cobertura vegetal), que gotea desde el dosel de la cobertura, o que alcanza el suelo a través de la escorrentía por los tallos. Para la medición de lluvia directa y que gotea desde el dosel se utilizan pluviómetros lineales, con el fin de reducir la variabilidad espacial (Jiménez 2003).

Los estudios que indican que el escurrimiento de copas es mayor que la precipitación directa, están basados en indicaciones de que la caída de las gotas de provenientes de la superficie de las hojas es normalmente más grande que las gotas de la lluvia (Hudson 1981; Hamilton y Pearce 1987; Bruijnzeel 1990;). Estas gotas pueden alcanzar una velocidad extrema al momento de llegar al suelo del bosque, ocasionando que su potencial de erosividad, en términos de energía cinética, pueda ser mayor que el de la precipitación directa.

La medición del agua que llega suelo proveniente de la escorrentía a través de los tallos se puede realizar ajustando a los troncos de los árboles canaletas plásticas, de hule o metálicas, ya sea de manera circular o helicoidal.

c. Interceptación (I)

El proceso de retención parcial del agua por la vegetación y su posterior evaporación es llamado interceptación (Soriano y Shimomichi 1991).

Es la parte de la lluvia que es retenida en el dosel de la cobertura vegetal y gran parte es evaporada; se puede expresar en términos absolutos o relativos: la interceptación absoluta se expresa generalmente en milímetros y se ajusta a un valor determinado por la capacidad de almacenamiento de la cobertura, dependiendo de

la estructura y densidad de la vegetación y principalmente de su índice de área foliar (IAF). La interceptación relativa se expresa como un porcentaje de la precipitación incidente, depende de las características del evento de lluvia y disminuye con la cantidad de lluvia por evento. La precipitación absoluta se calcula como la diferencia entre la precipitación incidente y la precipitación neta, es decir $I = P_i - P_n$ (Jiménez 2003).

Calder (1992), advierte que el efecto de la interceptación del dosel y el subsecuente escurrimiento de copas va a depender de la intensidad de la tormenta (en eventos de lluvia moderada el escurrimiento de copas puede afectar el tamaño de las gotas haciéndolas más grandes, conduciendo al aumento de la energía cinética, mientras que en el caso de la mayoría de lluvias intensas el dosel del bosque puede de hecho reducirán tamaño de las gotas); teniendo cada especie su propio tamaño de gota característico.

Por lo consiguiente, el tipo de lluvia, la altura del dosel y las especies de árboles determinarán si las copas de los árboles realmente “protegen” el suelo de la erosión o si pueden ocasionar un mayor potencial de erosión.

B. Capacidad de retención de aguas y sus variaciones

El movimiento, contenido y disponibilidad del agua en el suelo está determinado principalmente por las propiedades físicas y químicas de éste, en especial la textura, la estructura, porosidad, profundidad y contenido de materia orgánica. En los cálculos del balance hídrico es necesario determinar la cantidad de agua que pueda ser almacenada por el suelo (capacidad de retención) y las variaciones de reserva hídrica en el sistema, en función de aportes y salidas del agua (Jiménez 2003).

Según Carpena (2004), el contenido de agua en el suelo puede ser determinado mediante métodos directos o indirectos. El método directo es usualmente referidos como método gravimétrico, que es cuando expresamos contenido de agua como peso de agua sobre peso de suelo seco (por ejemplo la proporción de la masa de agua presente en una muestra a la masa de una muestra de suelo después haber sido secado en horno (100 – 110 °C hasta tener peso constante). De otra manera, los métodos volumétricos (cuadro 3), dan el contenido de agua como volumen de agua en un volumen de suelo sin perturbar (por ejemplo volumen de agua relacionado a el volumen de una muestra secada al horno. Estos

métodos directos son exactos, baratos, destructivos y lentos (dos días mínimos), consumen tiempo y no permiten hacer repeticiones en el mismo sitio.

Los métodos indirectos (TDR, tensiómetros, entre otros), estiman la humedad del suelo por una relación calibrada con algún otro variable medida. La conveniencia de cada método depende en varios problemas como: costo, exactitud, tiempo de respuesta instalación, manejo y duración. Dependiendo de la cantidad medida, las técnicas indirectas son primero clasificadas dentro de métodos volumétricos y tensiométricos. Mientras lo anterior da humedad volumétrica del suelo, la última succión de suelo para producción o potencial de agua (por ejemplo: tensión ejercida por capilaridad). Ambas cantidades son relacionadas a través de la curva específica de las características agua suelo para un suelo dado (Carpena 2004).

Esto es importante para recordar que cada tipo de suelo (textura/estructura) tiene una curva diferente; por lo tanto ellas no pueden ser relacionadas de la misma manera para todos los tipos de suelo.

En la figura 2 se indican los métodos usados para determinar el contenido de agua en el suelo.

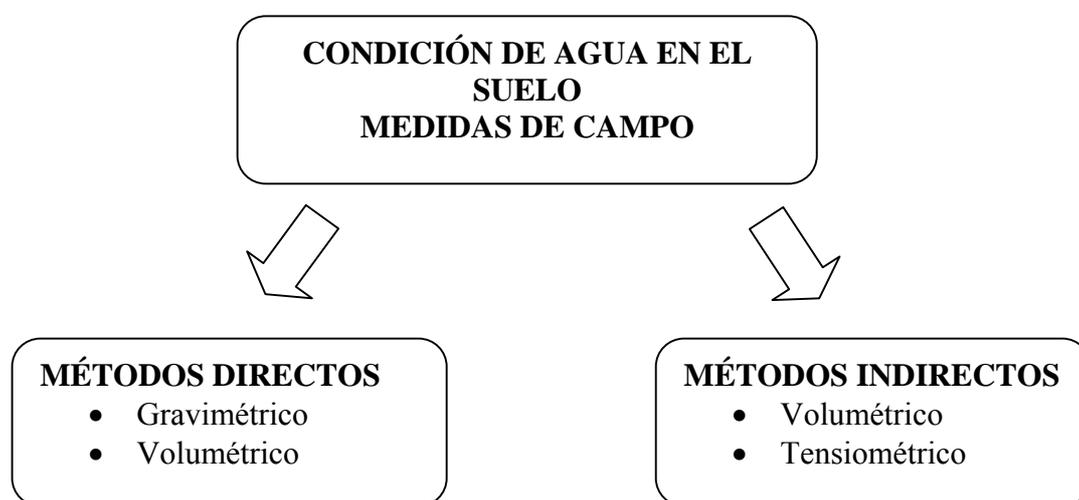


Figura 2. Métodos para estimar condición de agua en el suelo

Dependiendo de las propiedades físicas y objetivo de la medida de la humedad, algunos instrumentos son más efectivos que otros. Debe ser considerado que aunque la humedad volumétrica es una cantidad intuitiva, en suelos de textura fina el agua es fuertemente retenida por las partículas sólidas y por consiguiente no

pueden estar disponibles para la absorción de la planta y otros procesos como flujos. Asimismo, la frecuencia de muestreo deseada es un factor importante ya que el tiempo de respuesta de sensores diferentes varían sobre un amplio rango. Además, las propiedades físicas (textura, dilatación/contracción) pueden influenciar lo adecuado del método seleccionado. De otra manera, dependiendo del tipo de suelo y condiciones hidrológicas (precipitación y evapotranspiración), algunos instrumentos pueden tener requerimientos de mantenimiento más altos que otros.

Las técnicas más prácticas para monitorear agua del suelo son indirectas (Poder *et al.* 1998; Robinson *et al.* 1999).

El cuadro 2 y el cuadro 3 nos indican las características de los métodos volumétricos y tensiométricos, respectivamente, para el monitoreo de agua en el suelo.

Cuadro 2. Características de métodos volumétricos para monitorear el agua en el suelo

	MÉTODO					
	Moderación neutrón	TDR	FD (Capacitance y FDR)	ADR	Transmisión fase	TDT
Rango de Lectura	0 – 0,0170 m³	0,0014 – 0,0142 m³ - Saturación con calibración específica del suelo.	0 - Saturación	0 - Saturación	0,0014 – 0,0142 m³	0,0014 – 0,0142 m³ o 0,0014 – 0,0198 m³ Dependiendo del instrumento.
Exactitud (con calibración específica de suelo)	±0,1416 m³	±0,0003 m³	±0,0003 m³	±0,0003 – 0,0014 m³	±0,0003 m³	±0,0014 m³
Volumen de medida	Esfera (15,24 – 40,64 centímetros de radio)	alrededor de 3,05 centímetros de radio alrededor de la longitud de onda	Esfera (alrededor de 4,06 centímetros efectivo de radio)	Cilíndrico (alrededor de 3,05 centímetros)	Cilíndrico (15,14 – 18,93 litros)	Cilíndrico (0,76 -6,06 litros) de 5,08 centímetros de radio
Método de Instalación	Tubo de acceso	Enterrado permanente in el sitio o insertado para lectura manual	Enterrado permanente in el sitio o tubo de acceso de PVC	Enterrado permanente in el sitio o insertado para lectura manual	Enterrado permanente in el sitio.	Enterrado permanente in el sitio.
Capacidad de Registro	No	Dependiendo del instrumento	Si	Si	Si	Si
Afectado por salinidad	No	Niveles altos	Mínimo	No	> 3 dS/m	En niveles altos
Tipos de suelo no recomendado	Ninguno	Orgánico, denso, salino o suelos muy arcillosos	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Orgánico, denso, salino o suelos muy arcillosos (dependiendo del instrumento)
Mantenimiento de campo	No	No	No	No	No	No
Riesgo de seguridad	Si	No	No	No	No	No
Aplicación	Irrigación, investigación, consultas	Irrigación, investigación, consultas	Irrigación, investigación	Irrigación, investigación	Irrigación	Irrigación
Costos (incluido lector/registo/interface si es requerida	\$ 10.000 – 15.000	\$400 – 23.000	\$100 – 3.500	\$500 - 700	\$ 200 - 400	\$ 400 – 1.300

Fuente: Rafael Muñoz- Carpena 2004

Cuadro 3. Características de métodos tensiométricos para monitorear el agua en el suelo

	MÉTODO				
	Tensiómetro	Bloque de yeso	GMS (Sensor de matriz regular)	Disipación de calor	Sicrómetro de suelo
Rango de Lectura	0 – 0,80 bar	0,3 – 2,0 bar	0,1 – 2,0 bar	0,1 - 10 bar	0,5 - 30 bar
Exactitud (con calibración específica de suelo)	±0,01 bar	±0,01 bar	±0,01 bar	7 % de desviación absoluta	±0,2 bar
Volumen de medida	Esfera (> 10,16 centímetros de radio)	Esfera (> 10,16 centímetros de radio)	Esfera (alrededor de 2,03 centímetros de radio)		Esfera (> 10,16 centímetros de radio)
Método de Instalación	Insertado permanentemente dentro de agujero barrenado				
Capacidad de Registro	Solo cuando se usa traductores	Si	Si	Si	Si
Afectado por salinidad	No	> 6 dS/m	> 6 dS/m	No	Si, para cerámico tipo copa (usar tipo pantalla).
Tipos de suelo no recomendado	Arenoso o suelos toscos	Arenoso o suelos tosco, evitar suelos hinchados	Arenoso o suelos tosco, evitar suelos hinchados	Tosco	Arenoso o suelos tosco, evitar suelos hinchados
Mantenimiento de campo	Si	No	Medio	No	No
Riesgo de seguridad	No	No	No	No	No
Aplicación	Irrigación, investigación	Irrigación	Irrigación	Irrigación, investigación	Investigación
Costos (incluido lector/registro/interface si es requerida)	\$ 75 -250	\$400 - 700	\$200 - 500	\$300 - 500	\$ 500 – 1.000

Fuente: Rafael Muñoz- Carpena 2004

La humedad del suelo vista como la cantidad de agua en el suelo, puede ser expresada en forma gravimétrica, volumétrica y como lámina de agua (que es la expresión del agua en forma lineal: mm, cm o m) (Henríquez y Cabalceta 1999).

La humedad gravimétrica es la forma más sencilla de medir el agua en el suelo y se refiere a la masa del agua en relación a la masa del suelo seco; puede ser expresada en porcentaje o en fracciones que van de 0 a 1; se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$H_g = \frac{M(\text{agua})}{M(\text{suelo})} \times 100$$

Donde:

H_g es la humedad gravimétrica (%)

M es igual a la masa de suelo seco a 110°C.

La humedad volumétrica se refiere al volumen de agua con relación al volumen total del suelo, es muy utilizada para el cálculo del espacio aéreo y de la lámina de agua; y está dada por la siguiente fórmula:

$$H_v = \frac{\text{Volumen del agua en el suelo}}{\text{Volumen total de suelo}} \times 100$$

$$H_v = H_g \times d_a$$

Donde:

H_v = humedad volumétrica (%).

H_g = humedad gravimétrica (%).

D_a = densidad aparente (g/cm³).

Con ayuda de la humedad volumétrica es posible referir la cantidad de agua en el suelo como una "lámina" de agua contenida a una profundidad determinada; la lámina de agua se expresa a en cm. o bien en mm para ser asociada a datos de precipitación o de riego; y es calculada de la siguiente forma:

$$\text{Lámina de agua} = \% H_v \times \text{profundidad del suelo}$$

C. Evapotranspiración

La evapotranspiración es una etapa permanente del ciclo hidrológico. Generalmente, la evaporación de una superficie natural representa la cantidad de agua disipada a la atmósfera a partir de esa superficie mediante el proceso de vaporación. Cuando una superficie vegetal es considerada se prefiere hablar de evapotranspiración (ET), debido a que la cantidad de agua perdida es la suma de la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas (Jiménez 2003).

La medición de la evapotranspiración real de los sistemas heterogéneos y con presencia de árboles, como es el caso de los sistemas agroforestales, no es simple. Jiménez (2003) indica que debido a que con frecuencia la evapotranspiración representa un porcentaje pequeño de la precipitación diaria (principalmente en zonas tropicales húmedas), no se recomienda estimar este componente por diferencia en la ecuación del balance hídrico, ya que a veces el error en la medición de otros componentes puede ser mayor que el valor de la evapotranspiración.

Dentro de los factores meteorológicos que afectan la evapotranspiración tenemos a: la radiación solar, temperatura del aire, presión del vapor y el viento (Villón 2002). Existen métodos basados en mediciones micrometeorológicas como el balance de energía y el método aerodinámico para calcular la evapotranspiración real en coberturas vegetales, siendo el costo del equipo necesario es elevado.

Para estimar la evapotranspiración real (ETR), se puede partir de la evapotranspiración de referencia (ET_o) calculada preferiblemente con el método de Penman – Monteith, luego calcular la evapotranspiración máxima (ETM) y después aplicar modelos de agotamiento del agua en el suelo. La ETM se calcula como el producto de la evaporación de referencia (ET_o) por el coeficiente de la cobertura o coeficiente del cultivo (K_c), es decir **ETM = ET x K_c** (Jiménez 2003).

Existen varias formas de estimar la evapotranspiración, la que puede ser calculada por varias fórmulas basados en la información disponible.

D. Drenaje o percolación

Las partículas de suelo están rodeadas de poros de diferentes tamaños, donde se deposita el agua y el aire. Al aplicarse suficiente agua a un suelo, sea por medio natural o artificial, todos los poros se llenan de agua; en ese momento en el suelo existe dos tipos de agua: la gravitacional o libre (agua disponible) y la higroscópica (agua no disponible). El agua gravitacional o percolación es aquella que drena libremente del suelo debido la fuerza de la gravedad esta requiere un límite por encima de la capacidad de campo (Jiménez 2003).

Uno de los métodos más comunes para estimar la percolación es considerando la capacidad de retención o almacenamiento de agua del suelo; debido a que cuando la precipitación neta sumada a la reserva de agua existente en el suelo es mayor que la capacidad de retención, el exceso se “pierde” por percolación fuera del alcance de las raíces. Ante la existencia de escurrimiento superficial, esta debe ser estimada, restárselo a la precipitación neta y luego efectuar los cálculos mencionados (Jiménez 2003). La percolación tiene una influencia directa sobre la presencia y profundidad de la capa freática del suelo.

E. Escorrentía

Se refiere al agua de lluvia o de riego que escurre superficialmente por el suelo. Este término del balance hídrico es difícil de estimar, debido a que el escurrimiento depende de: la intensidad de lluvias, del tipo del suelo y su estado superficial, de la cobertura del suelo y de la pendiente (Jiménez 2003).

La escorrentía está compuesta por la escorrentía superficial y la escorrentía subterránea (flujo base). La dificultad de determinar la escorrentía subterránea obliga a aproximar el término escorrentía con la escorrentía superficial. Una opción de medición directa de la escorrentía es utilizando parcelas de escorrentía.

a. Escorrentía directa

Es la que llega a los cauces superficiales en un período de tiempo corto tras la precipitación, que engloba la escorrentía superficial y la subsuperficial, que son imposibles de distinguir; una gran parte de lo que parece escorrentía superficial, por el aumento de los caudales que siguen a las precipitaciones, ha estado infiltrada subsuperficialmente.

b. Escorrentía básica

Es la que alimenta los cauces superficiales en los estiajes, durante los periodos sin precipitación, que engloba a la escorrentía subterránea y la superficial diferida.

Los componentes del balance hídrico en los ecosistemas van a estar influenciados por las características y condiciones de la cobertura vegetal y el suelo. La figura 3 muestra la dinámica de los componentes hidrológicos bajo una cobertura vegetal; mientras en el cuadro 5 menciona algunas metodologías comunes para estimarlas.

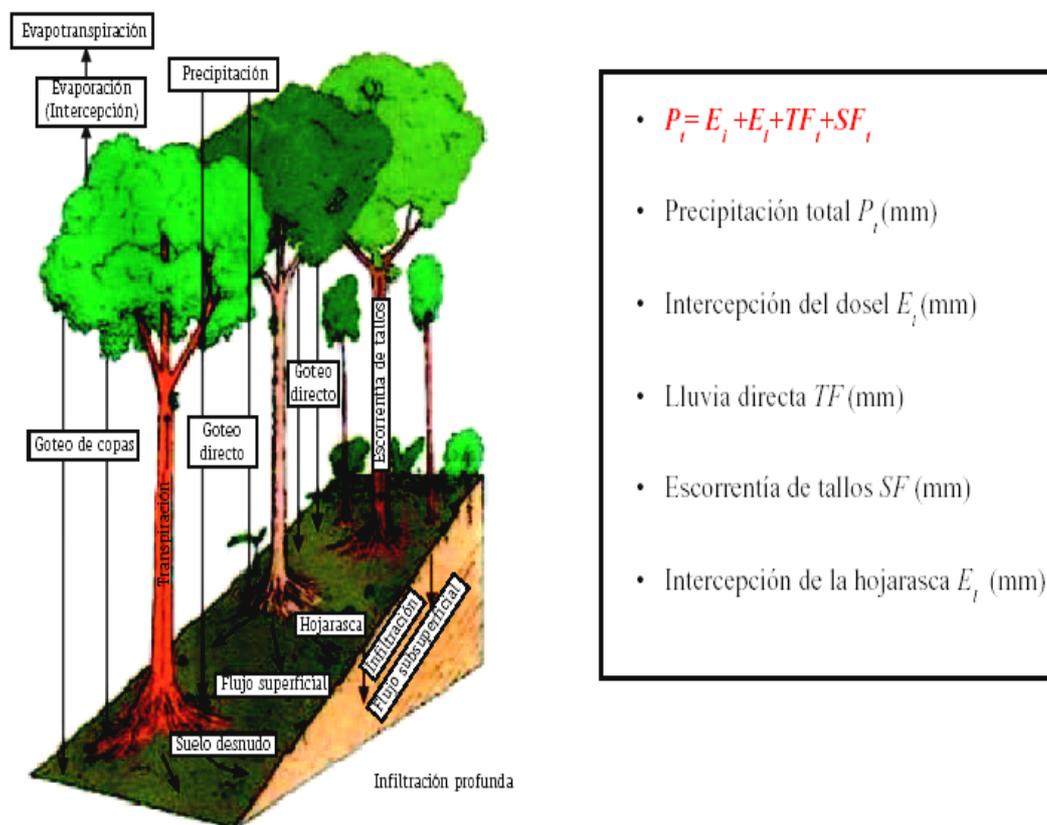


Figura 3. Componentes del ciclo hidrológico en bht.

Fuente: Bruijnzeel 1990

Cuadro 4. Variables hidrológicas y metodologías usadas para su medición

Variable	Metodología Usadas	
Precipitación	Pluviómetros y pluviógrafos	Datos recogidos y analizados para el período
Escorrentía	Parcelas de escorrentía	A través de sub parcelas instaladas en cada sistema
Infiltración	Anillos concéntricos	Pruebas realizadas en campo
Conductividad hidráulica	Pruebas de laboratorio (Ley de Darcy)	Muestras de suelo inalteradas.
Evapotranspiración	Por los métodos de:: Thornthwait, Jensen-Haise, Panney Cliddle, Turc, Penman, entre otros	Se debe aplicar un método viable y con menor error estadístico y de acuerdo a la información y equipo que se dispone
Humedad en suelo	Métodos directos o indirectos.	Se determinará las diferencias de humedad a diferentes profundidades de acuerdo al sistema a evaluar.
Caudal	Vertederos Molinete	Muy costoso y no aplicable para un estudio de poco tiempo (mínimo por 2 años). Relativamente económicos y prácticos

Fuente: Elaboración propia

2.4 Uso del suelo y sus efectos en la cantidad del agua

Es importante conocer la producción de agua a nivel de cuenca; esto requiere de una visión integral y de estrategias de medición innovadoras. Asimismo es generalmente aceptado que la cantidad total de agua en las corrientes está inversamente relacionada con el nivel de cobertura vegetal.

Bruijnzeel (1997) y Bosch y Hewlett (1982) indican que la reducción de cobertura de bosques resulta en un incremento en el rendimiento hídrico anual, y no en una disminución como generalmente se piensa y que el restablecimiento de la cobertura de bosques trae como consecuencia una disminución en el rendimiento hídrico.

Estudios realizados por Hamilton y Pearce (1986), sugieren que el pensamiento común que hay acerca del bosque, que este actúa como una esponja (absorbiendo agua en la estación lluviosa para descargarla durante la estación seca), no tiene una base científica y de hecho es contraria a la realidad. Según Hamilton y King (1983), un grupo de expertos que se reunieron en 1981 reportaron que un estudio realizado en Queensland, Australia, mostró que después de realizar

una tala comenzó a fluir una quebrada todo el año, lo que contradice la observación citada comúnmente que la deforestación conduce a que se sequen cuerpos de agua durante la época seca; los autores explican que la diferencia se encuentra en el tipo de deforestación.

La mayor parte de los estudios empíricos de cantidad total de agua y flujo estacionales se refieren a impactos de la extracción de madera y su regeneración subsecuente; y no a la conversión de tierras boscosas a otros usos como la ganadería y actividades agrícolas que resultan en la compactación del suelo (Mouraille *et al* 1996), en estos últimos casos una disminución en los flujos de la época seca es una posibilidad (Hamilton y King 1983). Debiéndose este cambio a como un intercambio entre los efectos netos de los cambios en la evapotranspiración y en la infiltración bajo los diferentes usos (Bruinjeel 1990).

Una revisión y análisis estadístico de 94 estudios de cuencas, realizado por Bosch y Hewlett (1982), indicó una relación muy consistente entre deforestación y aumento de escorrentía, así como reforestación y disminución de escorrentía. Los resultados del estudio indicaron la siguiente relación inversa entre un diez por ciento de cobertura (de la especie señalada) y la entrega de agua anual:

- 40 mm de cambio para cobertura de coníferas y eucalipto.
- 25 mm de cambio para especies latifoliadas decíduas.
- 10 mm de cambio para arbustos de pastizales.

Es decir, con la reducción de la cobertura en bosques decíduos en un 20 % podría esperarse un aumento de la cantidad del agua en 50 mm (y viceversa). La mayoría de los estudios revisados por Bosch y Hewlett (1982), fueron sobre zonas templadas y presentan datos para el primer año (después de la tala). Sin embargo el estudio no evalúa los impactos de largo plazo en cantidad de agua a causa de los cambios en la cobertura del bosque o en la conversión del mismo.

Una explotación forestal cuidadosa y selectiva tiene un efecto mínimo o nulo sobre el caudal. El caudal después del desarrollo de la nueva cubierta vegetal podría ser más alto, el mismo o inferior al valor original, dependiendo del tipo de vegetación. Lamentablemente, la deforestación en los trópicos muy a menudo va seguida por un cambio de uso de la tierra que disminuye el flujo base durante las

épocas secas, ya que la capacidad de infiltración disminuye a un nivel tan bajo que la mayoría del agua proveniente de la lluvia escurre superficialmente (Bruijnzeel 1990).

Los estudios llevados a cabo por Bruijnzeel (1990) demuestran que en el trópico húmedo la remoción de cobertura boscosa puede resultar en un gran incremento inicial en el flujo de las corrientes en el trópico húmedo. La magnitud del cambio dependerá principalmente de la cantidad de lluvia recibida después del tratamiento, y será proporcional a la magnitud de la tala y al cuidado ejercido en la extracción de la madera. De acuerdo con Bruijnzeel (1990) los estudios sugieren cuatro conclusiones respecto a los impactos del uso de la tierra en la cantidad de agua:

1. Áreas dejadas para regeneración natural se ven afectadas por una reducción en las ganancias iniciales en las quebradas, sugiriéndose, por un estudio realizado, un lapso de tiempo de más de diez años para alcanzar los niveles originales.
2. Después de la conversión a plantaciones de pino, la corriente de agua vuelve a su nivel inicial.
3. Posterior a la conversión a cultivos anuales, pastizales y plantaciones de té, los niveles de la corriente continúan arriba de los niveles originales.
4. Después de reforestar pastizales con pino y eucaliptos la corriente de agua se mantuvo bajo los niveles originales; provocando la poda de los eucaliptos a los diez años y una mayor reducción durante dos años.

Resultados de varias investigaciones en cuencas experimentales alrededor del mundo incluyendo el trópico húmedo, particularmente las realizadas para probar la hipótesis de que la cobertura vegetal afecta la producción de agua muestran una evidencia incontestable de que terrenos cubiertos por bosque producen menos agua que los mismos terrenos en barbechos, pasto o cultivos pequeños (Hewmett 1970; Bosch y Hewlett 1982; Hamilton 1985).

En sus trabajos, Turcios 1994, demostró que un área de pastos "produce" entre 10,000 y 12000 milímetros de agua por hectárea⁻¹ año⁻¹. En el suelo, el nivel freático podría elevarse como resultado del descenso en la evapotranspiración, por ejemplo después de una explotación forestal o de la conversión del bosque a pastos. La recarga también se podría incrementar por una subida en la tasa de infiltración, por ejemplo mediante la reforestación de áreas degradadas (Tejwani 1993).

Si la capacidad de infiltración se reduce substancialmente, esto puede conducir a una escasez de agua en la estación seca, incluso en las regiones donde el agua es generalmente abundante, como en el caso de cultivos itinerantes (FAO 1999). Asimismo, la recarga de acuíferos, se puede reducir como resultado de la plantación de especies arbóreas de raíz profunda, como el eucalipto (Calder 1998).

El efecto del cambio en el uso de la tierra sobre el caudal en la estación seca depende de los procesos concurrentes, pero fundamentalmente en los cambios en la evapotranspiración (ET) y de la capacidad de infiltración. El impacto neto es normalmente muy específico de las condiciones locales (Calder 1998).

Según Stadtmuller (1994), los efectos y funciones hidrológicas más importantes de los bosques naturales tropicales y los impactos sobre el régimen hídrico son :

- Interceptan montos considerables de la precipitación bruta, por lo que el insumo de agua (precipitación neta) es menor que otras coberturas vegetales.
- Muestran altas tasa de evaporación lo que significa una pérdida de agua.
- Los suelos forestales en el trópico húmedo en general muestran altas tasas de infiltración y poca escorrentía superficial, a pesar de los altos montos e intensidades de la precipitación y
- Muy eficientes en proteger el suelo contra la erosión superficial a pesar del alto potencial erosivo de la lluvia.

En zonas húmedas tropicales, la diferencia en precipitación es de aproximadamente 10% con una variación entre 110 y 835 mm en el primer año después de la conversión y un promedio de 200 a 300 mm, comparando el bosque con una cobertura de pasto bien manejada (Bruijnzeel 1990).

La vegetación afecta la cantidad de agua que puede ser almacenada en el suelo, por medio de la influencia que la materia orgánica tiene sobre la capacidad de almacenamiento de las partículas y la profundidad del suelo. El agua requerida por la vegetación puede ser una gran porción del agua de almacenamiento en el acuífero, que es la fuente de la mayoría de los caudales de las cuencas durante periodos secos (Mojica 1974).

Un cambio en la cubierta del suelo, de especies de menor a mayor evapotranspiración (ET) conducirá a un descenso en el caudal anual. De una revisión de 94 cuencas de recepción experimental, Bosch y Hewlett (1982) concluyeron que el establecimiento de una cubierta forestal en un terreno con núcleos de vegetación aislados reduce la escorrentía superficial de agua. Los bosques de coníferas, las especies madereras caducifolias, el monte bajo y las praderas tienen (en este orden) una influencia decreciente en la escorrentía superficial.

El reemplazo de los bosques en las orillas de las quebradas por pasturas tiene diversos efectos perjudiciales, con la eliminación de la sombra que los árboles dan a las quebradas se incrementará la temperatura del agua, aumenta la evapotranspiración; asimismo estimula el crecimiento de algas y se cambia la estructura trófica del ambiente; se disminuye o suspende el aporte de la hojarasca y otro material vegetal que brinda refugio a organismos acuáticos, el hábitat de la quebrada tiende a perder su complejidad estructural y por lo tanto su diversidad de hábitats disminuye (Chará 2003).

El manejo de la cobertura forestal puede realizarse con el objetivo de aumentar la producción de agua mediante la tala selectiva de árboles, de tal manera que la reducción de la interceptación y transpiración de los árboles remanentes sea mayor que el aumento de interceptación y transpiración de la vegetación del suelo más la evaporación del mismo (Lull 1970).

Sin embargo, la práctica nos demuestra lo contrario, ya que es el bosque quien garantiza mejor y a más bajo costo una adecuada protección del suelo. Por tal motivo, un cambio de una cubierta vegetal de mayor a menor ET incrementará la escorrentía superficial media: una reducción en la cubierta forestal incrementa el aporte de agua (Bosch y Hewlett 1982; Calder 1998). El impacto, sin embargo, depende mucho de las prácticas de manejo y de los usos de la tierra alternativos.

Referente a la recarga de acuíferos subterráneos, los procesos mediante los cuales los cambios en el uso de la tierra impactarán la recarga del subsuelo o mantenimiento del nivel freático, son similares al caso del flujo base de la época seca, el cual es producto de los niveles de humedad del suelo; la cual probablemente aumentaría en una conversión del bosque a vegetaciones más bajas debido a la reducción de la evapotranspiración (Mouraille *et al* 1996).

El nivel freático podría bajar como consecuencia de un descenso en la infiltración del suelo, dado por técnicas de cultivo “no conservativas” y de la compactación (Tejwani 1993). El sobrepastoreo podría conducir también a una reducción en la infiltración y en la recarga de acuíferos (Chomitz y Kumari 1996).

Hamilton y King (1993), sugieren los siguientes efectos de conversión del bosque a otros usos sobre la recarga del subsuelo:

- El nivel freático aumenta después de la tala de áreas boscosas.
- Se plantea generalmente que la conversión de bosques nativos a plantaciones exóticas tiene un bajo impacto en la recarga, pero hay ejemplos que evidencian lo contrario.
- El nivel freático generalmente sube cuando hay un pastoreo al predominar un efecto de evapotranspiración más bajo, no obstante algunos estudios han demostrado que la compactación severa del suelo puede conducir a una disminución en la recarga del acuífero.
- La conversión a cultivos anuales, eventualmente, puede llevar a una compactación de suelo extrema que a su vez ocasiona una reducción en el nivel freático; sin embargo, existe poca evidencia al respecto.
- La reforestación conduce a una disminución en el nivel freático, particularmente en la época seca.

Por lo expuesto, los impactos del cambio del uso de la tierra sobre las aguas subterráneas dependerán del efecto neto de los cambios en los niveles de evapotranspiración de los diferentes tipos de vegetación y las oportunidades de infiltración bajo uso de la tierra resultante; y el problema de las consecuencias de la deforestación para el régimen hídrico no es tanto la remoción de los árboles, sino el sobre uso que sigue después, el cual no corresponde al uso potencial del suelo y no incluye medidas necesarias e indicadas para la conservación de suelos y aguas (Bruijnzeel 1990).

2.5 Conceptos básicos

Pastura sobrepastoreada.- uso de suelo con sobrecarga animal, pudiendo presentar señales de erosión.

Pastura nativas con árboles- pastura dominada por especies nativas, naturalizadas y de baja productividad, donde los árboles existentes tienen más de 5 cm de DAP (diámetro a la altura del pecho) y dos metros de altura.

Pasturas mejoradas con árboles.-pastura dominada por especies mejoradas o introducidas de alto vigor y productividad, donde los árboles existentes tienen más de 5 cm de DAP (diámetro a la altura del pecho) y dos metros de altura.

Bosque secundario (bosque sucesional o barbecho forestal).- Vegetación leñosa de carácter sucesional que se desarrolla sobre tierras cuya vegetación original fue destruida por actividades humanas.

Precipitación incidente.- Precipitación que llega a la parte superior de la vegetación.

Precipitación neta.- Precipitación que llega al suelo por goteo directo, goteo desde el dosel vegetal y escorrentía por los tallos.

Intercepción.- Es el agua proveniente de la lluvia retenida por la vegetación y por la hojarasca que está sobre el suelo y que luego es evaporada. Hay dos formas de expresarla: intercepción absoluta y relativa.

Escorrentía superficial.- Es aquella parte de la lluvia que no es absorbida por el suelo mediante infiltración.

Infiltración.- entrada vertical del agua en perfil del suelo, cuando este no está saturado.

Conductividad hidráulica.- capacidad del suelo saturado de permitir el movimiento del agua a través de sus poros, a diferencia de la infiltración, este movimiento ocurre cuando los poros del suelo se encuentran llenos o saturados de agua.

Capacidad de campo (c).- Cantidad de agua retenida por un suelo previamente saturado al cesar la infiltración libre.

Punto de marchitamiento (f).- Es el valor limite del agua ligada y, por tanto, no absorbible por las raíces.

Agua útil.- Es la cantidad de agua almacenada por el suelo después de un periodo de lluvias, que viene dado por la diferencia $c-f$.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción del área de estudio

A. Ubicación

La investigación se desarrolló en fincas que forman parte del proyecto CATIE-GEF- Banco Mundial “Enfoques Silvopastoriles para el Manejo Integrado de Ecosistemas” ubicadas en la Subcuenca del Río Jabonal, ocupando territorio de los cantones de Montes de Oro y Esparza, pertenecientes a la provincia de Puntarenas, y al cantón de Zapotal en la provincia de Alajuela.

La subcuenca del Río Jabonal (Figura 4), pertenece a la Cuenca del Río Barranca y tiene una extensión aproximada de 4 318 ha, lo que representa un 8,0% del área total de la cuenca del Río Barranca. Presenta un rango de altitudinal que va desde los 300 a 1400 msnm. Su relieve presenta terrenos quebrados, fuertemente ondulados (con zonas escarpadas) y con pendientes entre 30 y 60%; pertenece al área de conservación Arenal- Tilarán y presentan las siguientes zonas de vida. En la Parte Alta: bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB); la Parte Media: bosque muy húmedo premontano (bmh-P) y la Parte Baja: bosque muy húmedo premontano transición a basal (bmh-P6) y bosque húmedo tropical transición a perhúmedo (bh-T2). Asimismo alberga al Refugio Nacional de Vida Silvestre de Peñas Blancas (Mapa de Costa Rica 2004).

B. Datos e índices representativos de la cuenca

Tanto los datos, así como los índices representativos son valores que nos proporcionan información relevante sobre la estructura fisiográfica de una cuenca, los cuales nos permitirán realizar un análisis sobre ella o compararla con otras cuencas. Entre los índices evaluados (cuadro 6) están los siguientes:

Superficie. Es el área que proyectada en un plano horizontal; si el área es mayor a 250 km.² será considerada grande (donde predominan características fisiográficas: pendiente, elevación, cauce, y área) y si es a 205 km.² se considerada pequeña (en la que predominan características físicas: tipo de suelo, vegetación).

Perímetro. Se refiere al borde de la forma de la cuenca proyectada en un plano horizontal. Es de forma muy irregular.

Longitud del cauce principal. Indica la longitud del recorrido que tiene el cauce principal desde su origen hasta su desembocadura.

Elevación media (Em). Indica que el 50% del área de la cuenca está situada por encima de esa altitud y el 50% está situado por debajo de ella.

Factor de Forma (F). Expresa la relación entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud; es decir una cuenca tiene un F mayor que otra indicará que existe la posibilidad de tener una tormenta intensa simultánea sobre toda la cuenca. Por el contrario una cuenca con una F menor tiene menos tendencia a concentrar las intensidades de lluvias de una cuenca de igual área pero con un F mayor.

Índice de Gravelious (K). Expresa la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro equivalente de una circunferencia, si $K = 1$ la cuenca será de forma circular, en cuencas alargadas $K > 1$.

Orden de Corrientes. Es una clasificación que proporciona el grado de bifurcación dentro de la cuenca.

Rectángulo equivalente. Es una representación geométrica que permite representar la cuenca, de su forma heterogénea, con la forma de un rectángulo que tiene la misma área y perímetro, igual distribución de alturas e igual distribución de terreno, en cuanto a sus condiciones de cobertura.

Cuadro 5. Datos e índices representativos de la subcuenca del Río Jabonal, cuenca del Río Barranca, Costa Rica, 2005.

<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
Área de la cuenca	ha km. ²	4.318 43
Perímetro	km.	42
Longitud del cauce principal	km..	36
Elevación media (Em)	m.s.n.m.	950
Índice o factor de forma (F)		0,21
Índice de compacidad (K)		1,79
Orden de corrientes		4
<i>Rectángulo equivalente:</i>		
Lado mayor (L)	km.	18,8
Lado menor (l)	km.	2,3

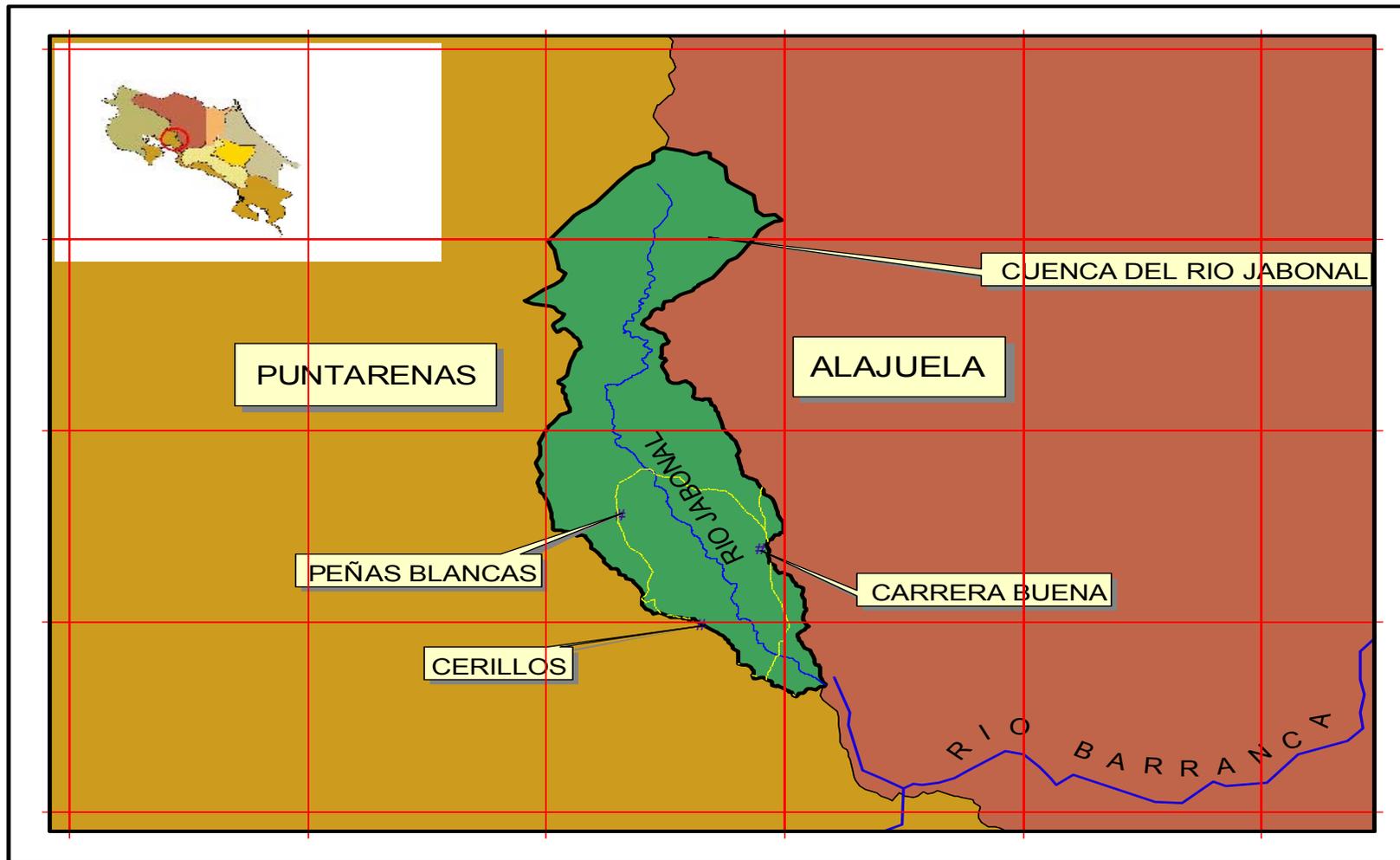


Figura 4. Mapa de ubicación de la subcuenca del Río Jabonal

El perfil longitudinal del curso principal. Es una información relevante que proporciona una idea de las pendientes que tiene el cauce en diferentes tramos de su recorrido (figura 5).

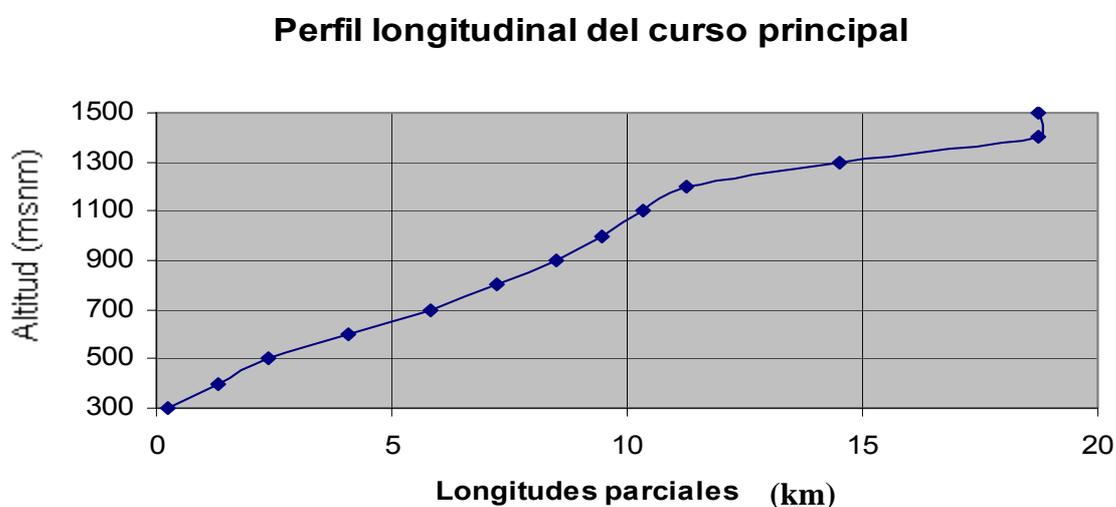


Figura 5. Perfil longitudinal del cauce del río principal de la subcuenca del Río Jabonal, Cuenca del Río Barranca, Costa Rica, 2005.

Donde: m.s.n.m = metros sobre el nivel del mar y km. = Kilómetros

3.1.1 Suelos

En la zona de estudio los suelos predominantes pertenecen al orden de los Inceptisoles, cuyos horizontes van desde los 0 – 1,50 m de profundidad con límites graduales y planos. Presentan en su mayoría cuatro horizontes: A, B, BC y C; los dos primeros se localizan entre 0 a 60 cm de profundidad y los horizontes BC y C de los 60 cm a 1,50 m; observándose la presencia de horizontes enterrados, debido a movimientos de suelo.

Estos suelos tienen los perfiles superiores de una estructura granular, de bloques subangulares finos medios con textura franca en los horizontes superiores. En los horizontes más profundos, la textura es franca-arcillosa en los horizontes intermedios, y franca-arcillosa a franca-arenosa en los perfiles más hondos (figura 6).

Por las características observadas, los suelos son aparentemente jóvenes. Los horizontes A y B presentan raíces muy finas y finas y medias, con poros finos y

medios con alta actividad biológica; mientras que en los horizontes BC y C la actividad biológica disminuye y presentan poros de todos los tamaños.

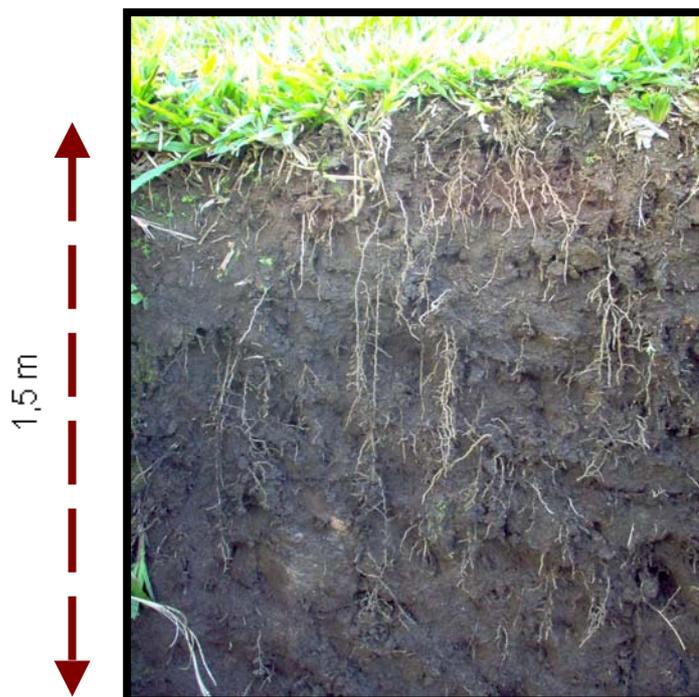


Figura 6. Fotografía del perfil del suelo en el sistema de pasturas nativas sobre pastoreadas a una profundidad de 1,50 m, en la subcuenca del Río Jabonal, Cuenca del Río Barranca, Costa Rica, 2005.

3.1.2 Clima

El clima de la zona presenta una precipitación promedio anual de 2000 mm, presentando dos épocas bien marcadas: la época lluviosa de mayo a diciembre y una época seca de enero a abril. La temperatura promedio de la zona es de 28 °C.

3.1.2.1. Datos meteorológicos

El estudio se realizó durante la época lluviosa y se instaló una estación meteorológica, marca *Davis* modelo *Vantage Pro2 Plus™* (figura 7), y durante el periodo de evaluación se presentaron las siguientes condiciones meteorológicas: temperatura media anual de 22,2 °C con promedios anuales de máxima y mínima de de 26,9 °C y 19,8 °C. La humedad relativa promedio fue de 90,2 % con una variación mensual de $\pm 2\%$. La precipitación durante el período de estudio fue alta presentando una precipitación media anual de 3.230 mm con intensidades de hasta 170 mm/h (el 95 % de las lluvias se presentan en esta época) y vientos fuertes con

dirección predominante sur este. La evapotranspiración diaria fue de 1,4 mm y la evapotranspiración mensual de 43,3 mm.



Figura 7. Fotografía de la estación meteorológica instalada en el sitio experimental ubicada en la subcuenca del Río Jabonal, Cuenca del Río Barranca, Costa Rica, 2005.

3.2. Población en estudio y variables evaluadas

Con la finalidad de conocer los parámetros hidrológicos en sistemas ganaderos se seleccionaron cuatro sistemas de usos definidos por el proyecto “Enfoques Silvopastoriles para el Manejo Integrado de Ecosistemas”. La selección de los sistemas fue bajo dos criterios: que sean representativos de los sistemas principales y conocidas por los finqueros zona; y en segundo lugar, que los sistemas evaluados se encuentren en una zona de recarga con condiciones de suelo y pendiente similares (suelos inceptisoles con pendiente de 35 - 38%),

En el cuadro 6 se presenta la descripción de los sistemas que fueron evaluados.

Cuadro 6. Sistemas de uso de suelos evaluados en la subcuenca del Río Jabonal, cuenca del Río Barranca, Costa Rica, 2005.

Descripción del Sistema	Sistema
Pasturas nativas sobre pastoreadas	PNS
Pasturas nativas con árboles	PNA
Pasturas mejoradas con árboles	PMA
Bosque secundario intervenido	BS

En cada sistema se evaluaron principalmente las siguientes variables hidrológicas:

1. Precipitación
2. Escorrentía superficial
3. Infiltración
4. Conductividad hidráulica
5. Retención de humedad
6. Drenaje

Complementariamente, en cada uno de ellos se levantó y monitoreó la información básica relevante como: tipo, textura del suelo, densidad aparente y caracterización vegetal (cobertura vegetal, porcentaje de sombra, diversidad de especies y estructura vertical). Además, la evapotranspiración se asumió que sería la misma para todos los sistemas a partir de los datos meteorológicos medidos en el sitio de estudio.

Esquema de muestreo.

Las parcelas fueron seleccionadas bajo el “criterio de independencia”, es decir, que no exista influencia entre sistemas, teniendo los mismos un rango de tamaño que va de 0,5 a 0,8 ha. En el cuadro 7 se muestran las variables evaluadas y el número muestras realizadas.

Cuadro 7. Variables evaluadas

Variables a evaluar	Número de muestras en cada sistema				Total
	PNS	PNA	PMA	BS	
Escorrentía superficial	3	3	3	3	12
Infiltración	3	3	3	3	12
Conductividad Hidráulica	3(3)	3(3)	3(3)	3(3)	36
Retención de humedad	3(3)	3(3)	3(3)	3(3)	36

Nota: Datos en paréntesis indican las submuestras

3.3. Análisis estadístico

De acuerdo al esquema de muestro utilizado, los datos se analizaron bajo un análisis de varianza. Para las variables de escorrentía e infiltración se utilizaron tres muestras por sistema, utilizándose el siguiente modelo de análisis:

$$Y_{ij} = \mu + S_i + E_{ij}$$

Donde:

- Y_{ij} : es la variable respuesta
- μ : es la media general
- S_i : es el efecto del i-ésimo sistema
- E_{ij} : es el término de error aleatorio

Dado que se utilizaron cuatro submuestras por parcela de escorrentía para estimar la conductividad hidráulica y la retención de humedad el análisis de varianza utilizado fue el siguiente (Steel y Torrie 1988: p152):

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + E_{(ij)} + Esm_{(ijk)}$$

Donde:

- Y_{ijk} : es la variable respuesta
- μ : es la media general
- S_i : es el efecto del i-ésimo sistema
- E_{ij} : es el término de error aleatorio
- $Esm_{(ijk)}$: es el error debido a la variación de las submuestras dentro de una muestra

Para analizar el efecto de los sistemas, en caso que hubieran diferencias estadísticas significativas se utilizó la prueba de Duncan para determinar entre cuales sistemas hubo diferencias.

3.4. Metodologías

La investigación se desarrolló en las siguientes etapas:

- I. Etapa: Estimación de las variables hidrológicas (escorrentía superficial, capacidad de infiltración, conductividad hidráulica y retención de humedad) y parámetros complementarios (densidad aparente, textura del suelo y estructura vertical de la vegetación) bajo los diferentes tipos de coberturas.
- II. Etapa: Resultados y análisis estadístico.

I Etapa: la estimación de los parámetros hidrológicos bajo las diferentes coberturas se realizó previo reconocimiento de la cuenca, identificando las zonas de recarga hídrica y seleccionando las fincas que presentaron los sistemas a evaluar: pasturas nativas sobre pastoreadas (PNS), pasturas nativas con árboles (PNA), pasturas mejoradas con árboles (PMA) y bosque secundario intervenido (BS).

3.4.1.1. Estimación de la escorrentía superficial

Se establecieron parcelas con dimensiones de 5 m x 10 m, con tres muestras por cada sistema, para un total de 12 parcelas de escorrentía. Las parcelas con respecto a la pendiente del terreno se ubicaron de una manera tal que los 5 m se ubiquen en la parte superior y los 10 metros de acuerdo a la pendiente (figura 8). Siendo construidas con láminas de hierro galvanizado # 24 de 15 cm de alto (5 cm enterradas en el suelo, quedando 10 cm sobre la superficie) con dobleces de 1 cm en la parte superior para evitar accidentes por cortes (figura 8). El perímetro de la parcela fue reforzado con la colocación de estacas cada 30 cm para darle soporte a las láminas y evitar sean dañadas considerablemente, estropeadas o levantadas, por tránsito del ganado y/o personas.

El conducto de drenaje de la parcela de escorrentía tuvo un diámetro de 5,08 centímetros, el que se empalmaba con una tubería del mismo diámetro hasta el recipiente colector; los recipientes colectores (estañones), uno por cada parcela de escorrentía, tenían una capacidad de 204 l. Para evitar la pérdida de agua escurrida durante lluvias mayores a 20 mm, se colocó un recipiente previo a éste con la finalidad de recolectar sólo una fracción del agua escurrida (figura 9). Dicho volumen colectado se usó para los cálculos de la escorrentía total.

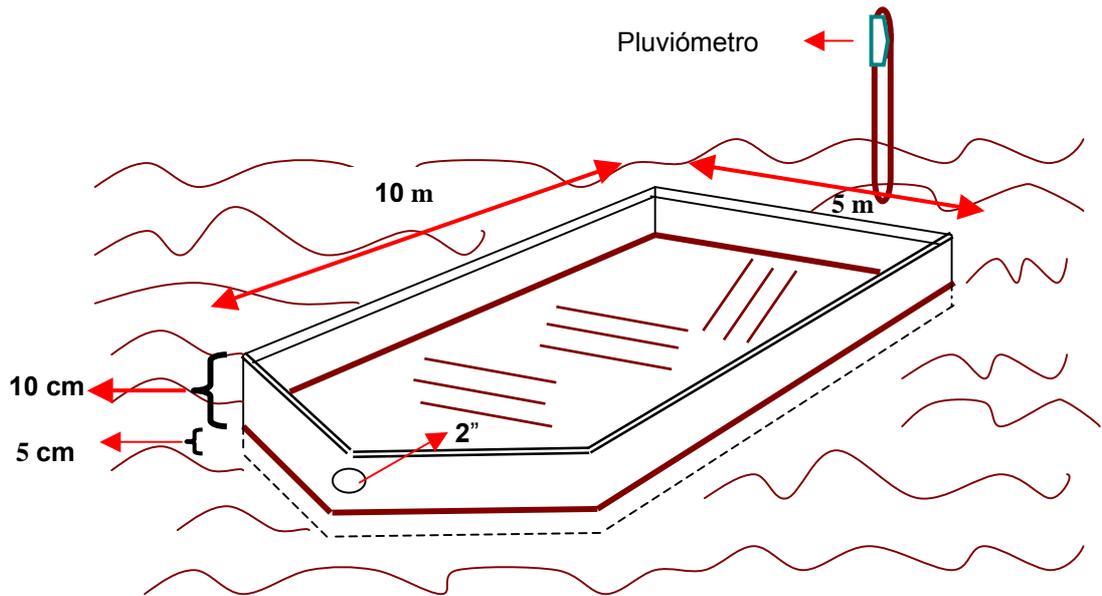


Figura 8. Parcela de escorrentía: diseño y dimensiones

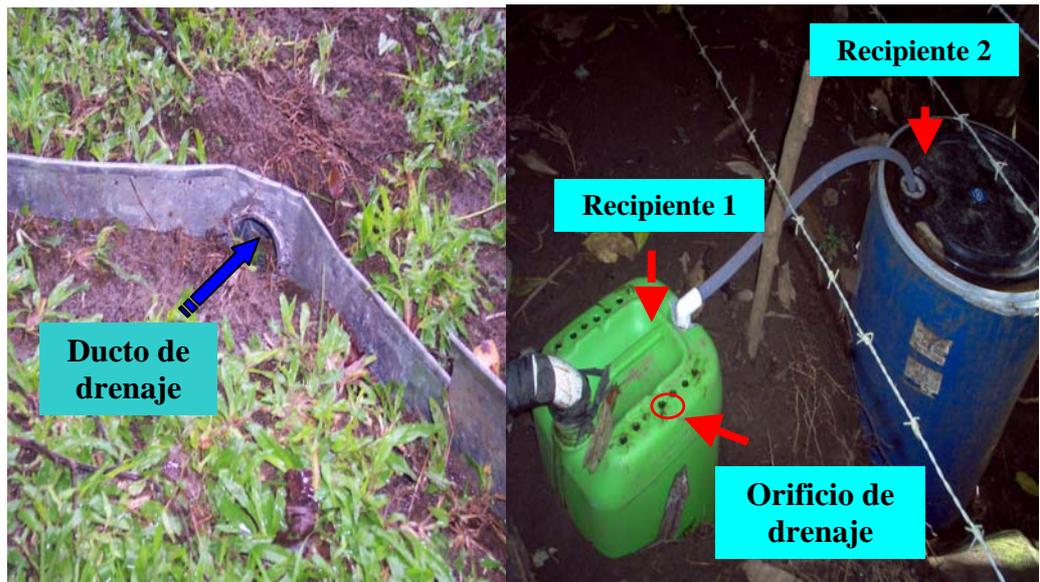


Figura 9. Parcela de escorrentía: sistema colector y drenaje

La precipitación se midió colocando pluviómetros de 127 mm de capacidad, (figura 10) sobre cada parcela de escurrimiento a una altura de 2 m del suelo.

En la Figura 11 se presentan los sistemas que fueron considerados para la evaluación de las variables hidrológicas.



Figura 10. Tipo de pluviómetro colocado sobre las parcelas de escorrentía



Pasturas nativas sobre pastoreadas



Pasturas nativas + árboles



Pasturas Mejoradas + árboles



Bosque secundario intervenido

Figura 11. Sistemas evaluados y parcelas de escorrentía

3.4.1.1.1. Mediciones y cálculos

Las mediciones de escorrentía superficial se registraron por las mañanas (6 a 9 a.m.) durante los meses de septiembre a noviembre del 2005. Para la medición de volumen de agua escurrida de las parcelas de escorrentía se utilizó una regla graduada, midiendo el nivel del agua en el recipiente 2, la que era evacuada después de cada lectura. El recipiente 1 se mantuvo lleno de agua durante todo el periodo de evaluación. Asimismo, se verificó que los recipientes quedaran nivelados para la próxima lectura: en el primero de ellos para asegurar una pérdida de agua equitativa y en el segundo, para realizar la lectura del nivel de agua.

La precipitación se midió leyendo el nivel de agua en el pluviómetro, para su posterior conversión a mm; después de cada lectura el agua del pluviómetro fue vaciada.

1. Cálculo de la precipitación en mm (pp)

Si tenemos que:

$$\frac{1 \text{ litro}}{\text{m}^2} = 1 \text{ mm debido a } \frac{1 \text{ litro}}{\text{m}^2} = \frac{1000 \text{ cm}^3}{10000 \text{ cm}^2} = 0,1 \text{ cm} = 1 \text{ mm}$$

Entonces si 1 pulg = 2,54 cm y sabemos que 0,1 cm = 1 mm

$$\longrightarrow 1 \text{ pulg} = 25,4 \text{ mm}$$

Por lo tanto:

$$\text{Precipitación (mm)} = \text{lectura del pluviómetro (pulg)} \times 25,4$$

2. Cálculo de lluvia incidente en la parcela de escorrentía (I)

Se aplicó la siguiente fórmula: $ACP = A \text{ (m}^2\text{)} \times Pp \text{ (mm)}$

Donde:

ACP = Cantidad de agua (l) que cayó sobre la parcela de escorrentía.

A = Área de la parcela de escorrentía (m²)

Pp = Precipitación incidente en (mm) leída en el Pluviómetro.

3. Cálculo del agua escurrida (lt)

El agua escurrida vendrá a ser el agua de lluvia que cayó sobre la parcela de escorrentía y que llegó a los estañones. Para su cálculo se aplicó la siguiente fórmula:

$$AE = NO \times (Ac \times h) \times 1000$$

Donde:

AE = Agua escurrida en (l)

NO = Número de orificios de drenaje en el recipiente 1 (un total de 15 orificios).

Ac¹ = Área de la circunferencia (m²) del recipiente 2 = $\pi \times r^2$

h = Altura del nivel de agua (m) en el recipiente 2.

1000 = Factor de conversión para pasar el valor a litros.

Nota: En manera conjunta Ac y h, estiman el volumen de agua en el recipiente 2

Cálculo del % de escorrentía

Finalmente, se procedió a calcular el porcentaje de escurrimiento, mediante la siguiente fórmula:

$$\%E = (AE \times 100) / ACP$$

Donde :

%E = Porcentaje de escurrimiento

AE = Agua que escurrió de la parcela de escorrentía (l)

ACP = Agua caída en la parcela de escorrentía (l)

¹ Para un recipiente de 55 cm de diámetro

Ejemplo para el cálculo del % de escurrimiento:

Datos:

Lectura de la precipitación en el pluviómetro= 1,5 pulgadas.
Altura del nivel agua en recipiente 2 = 6 cm

Desarrollo

1. Cálculo de precipitación (mm)

$$\begin{aligned} \text{pp. (mm)} &= 1,5 \times 25,4 \\ \text{pp.} &= \underline{\mathbf{38,1 \text{ mm}}} \end{aligned}$$

2. Cálculo de lluvia incidente en la parcela de escorrentía (lt)

$$\text{ACP} = A \text{ (m}^2\text{)} \times P_p \text{ (mm)} \dots\dots\dots (1)$$

Cálculo del área de la parcela de escorrentía

$$\begin{aligned} A &= \text{Largo} \times \text{ancho de la parcela de escorrentía} \\ A &= 10 \text{ m} \times 5 \text{ m} \\ A &= \underline{\mathbf{50 \text{ m}^2}} \end{aligned}$$

Entonces, reemplazando valores en (1):

$$\begin{aligned} \text{ACP} &= 50 \text{ m}^2 \times 38,1 \text{ mm} \\ \mathbf{ACP} &= \underline{\mathbf{1.905,00 \text{ l}}} \end{aligned}$$

3. Cálculo del agua escurrida (l)

$$\text{AE} = \mathbf{NO} \times \mathbf{Ac} \times \mathbf{h} \times \mathbf{1000} \dots\dots\dots (2)$$

Cálculo del área de circunferencia

$$\begin{aligned} \text{Ac} &= 3,1416 \times (0,275)^2 \\ \text{Ac} &= \underline{\mathbf{0,2375 \text{ m}^2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h &= \underline{\mathbf{0,06 \text{ m}}} \\ \text{NO} &= \underline{\mathbf{15}} \end{aligned}$$

Reemplazando en (2):

$$\text{AE} = 15 \times 0,2375 \times 0,06 \times 1000$$

$$AE = \underline{213,83 \text{ l}}$$

4. Cálculo del % de escurrimiento

$$\text{Si: } \%E = (AE \times 100) / ACP \dots\dots(3)$$

Y conocemos que:

$$AE = 213,83 \text{ l}$$

$$ACP = 1.905,00 \text{ l}$$

Reemplazando los valores en (3) tendremos:

$$\% E = (213,83 \times 100) / 1.905$$

$$\% E = 11,225$$

$$\% E = \underline{11\%}$$

Se calculó el porcentaje de escurrimiento (% E) en 50 eventos para las tres parcelas de escurrimiento de cada sistema, para luego ponderar sus resultados.

3.4.1.2. Estimación de la capacidad de infiltración

Se hizo mediante pruebas de infiltración con anillos concéntricos que consiste en instalar dos cilindros: uno interno de 30 cm de diámetro y 30 cm de altura y uno externo de 50 cm de diámetro con una altura de 20 cm (figura 12). El anillo externo se introdujo en el suelo 5 cm y el interno 10 cm, llenando con agua el anillo externo a una altura constante de 5 cm. Las mediciones se hicieron mediante el uso de una regla graduada a intervalos de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos.

Se colocó una tela sobre la superficie interna del suelo, para proteger la superficie del suelo durante la aplicación del agua para que no se compacte. El nivel del agua de anillo externo, se debe mantener a una altura constante de 5 cm; asimismo se mantuvo una altura mínima de 7,5 cm del nivel de agua del anillo interno.

La prueba de infiltración se hizo en la parte superior, media y baja de cada parcela con la finalidad de obtener un dato representativo de cada uno de los sistemas.



Figura 12. Anillos concéntricos para estimar infiltración

3.4.1.2.1. Mediciones y cálculos

Para realizar el cálculo de la infiltración es necesario la obtención de mediciones básicas; estas mediciones (ver ejemplo en el cuadro 8) se realizaron en suelo húmedo al lado de cada una de las parcelas de escorrentía de cada uno de los sitios representativos en condiciones iguales.

Cuadro 8. Ejemplo de medidas necesarias para el cálculo de infiltración

Hora de lectura	1 = T Tiempo (minutos)	2 = Altura del Agua		3 = Lectura actual - anterior (cm.)	4= I* Lecturas acumuladas	5 = Tiempo actual - anterior (minutos)	6 = Velocidad de Infiltración (mm/hora)	
		Lectura cm	Lectura ajustada*					
			1					2
09:24	0	6,2			0,00	0,00	0,00	
09:25	1	6,5			0,30	0,30	180,000	
09:26	2	6,7			0,20	0,50	120,000	
09:27	3	6,8			0,10	0,60	60,000	
09:28	4	6,9			0,10	0,70	60,000	
09:29	5	7,1			0,20	0,90	120,000	
09:34	10	7,3			0,20	1,10	24,000	
09:44	20	7,5			0,20	1,30	12,000	
10:04	30	7,9			0,40	1,70	24,000	
10:24	45	8,2			0,30	2,00	12,000	
10:39	60	9,2			1,00	3,00	40,000	
11:09	90	9,7			0,50	3,50	10,000	
11:39	120	10,2			0,50	4,00	10,000	

I* = infiltración acumulada

Cálculo de la velocidad de infiltración (VI):

Teniendo los datos necesarios (cuadro 9), para realizar el cálculo de la velocidad de infiltración se usó la siguiente fórmula:

$$VI = (\Delta \text{ de lectura} \times 600) / \Delta \text{ de tiempo}$$

Donde:

VI	=	Velocidad de infiltración en mmh ⁻¹
Δ de lectura	=	Diferencial de lectura en cm (columna 3)
Δ de tiempo	=	Diferencial de tiempo en minutos (columna 5)
600	=	factor de conversión para convertir cmh ⁻¹ a mmh ⁻¹

3.4.1.3. Estimación de la conductividad hidráulica (K)

La conductividad hidráulica es la capacidad del suelo saturado de permitir el movimiento del agua a través de sus poros. Para realizar este cálculo se procedió al desarrollo de actividades en dos fases: La fase de campo y la fase de laboratorio (figura 13). En la fase de campo se recogieron muestras de suelo inalterado al lado de cada una de las parcelas de esorrentía y en cada uno de los sistemas mediante el uso de un barreno y cilindros metálicos con dimensiones: 7,5 cm de diámetro por 7,5 cm de altura y a una profundidad de 15 cm.

En la fase de laboratorio, se limpiaron los cilindros y se les colocó una malla en ambos lados para evitar desprendimiento del suelo, seguidamente se puso un cilindro vacío sobre el cilindro de la muestra sellando la unión con cinta adhesiva; siendo luego fueron dejadas en un recipiente con agua durante aproximadamente 24 h para que se saturen.

Pasadas las 24 h, los cilindros fueron colocados en un soporte metálico, acondicionado para la prueba, el cual tiene una malla de alambre; debajo del soporte se colocó un embudo y un recipiente colector. El cilindro superior fue llenado hasta el borde y se mantuvo constante el nivel del agua. Cuando el agua comenzó a gotear en el recipiente se inició el tiempo de lecturas y se midió el volumen que se recogía cada 15 minutos, hasta que se tenían lecturas constantes dentro $\pm 5\%$ de variación.



Fase de campo



Fase de laboratorio

Figura 13. Fases para estimación de conductividad hidráulica

3.4.1.3.1. Mediciones y cálculos

Luego de la fase de campo, el trabajo para el cálculo de la conductividad hidráulica se realizó fundamentalmente en el laboratorio, en el cuál se obtuvieron medidas necesarias (cuadro 9) para su estimación.

Cuadro 9. Medidas necesarias para el cálculo de la conductividad hidráulica (K)

Sistema	Tiempo (min)	Volumen de H ₂ O (ml)	Altura (cm)	Temperatura (°C).
T1	10:35	160	6,4	27
	10:50	158	6,4	27
	11:05	136	6,4	28
	11:20	121	6,4	28
	11:35	96	6,4	28
	11:50	89	6,4	28
	12:05	94	6,4	28
	12:20	101	6,4	28
	12:35	83	6,4	28
	12:50	84	6,4	28
	13:05	95	6,4	28
	13:20	88	6,4	28
	13:35	77	6,4	28
	3.25			
Promedio		106,31	6,40	27,85

Cálculo la conductividad hidráulica

Con las mediciones obtenidas en el laboratorio, cuadro 9, se procedió al cálculo de la conductividad hidráulica (K) (cuadro 10) mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$K = \frac{Q}{At} \times \frac{l}{h} \quad (\text{cmh}^{-1}) \quad \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

- K = Conductividad hidráulica (cmh⁻¹)
- A = Área de la muestra (cm²)
- l = Longitud de la muestra de suelo (cm)
- h = carga hidráulica: suma de las longitudes de la muestra de suelo más altura del agua (cm)
- t = Intervalo de tiempo (minutos que deben ser convertidos a horas)
- Q = Promedio de los volúmenes recogidos en el intervalo de tiempo (Q en cm³/h)

En la figura 14 se muestran los componentes considerados en la fórmula para el cálculo de la conductividad hidráulica.

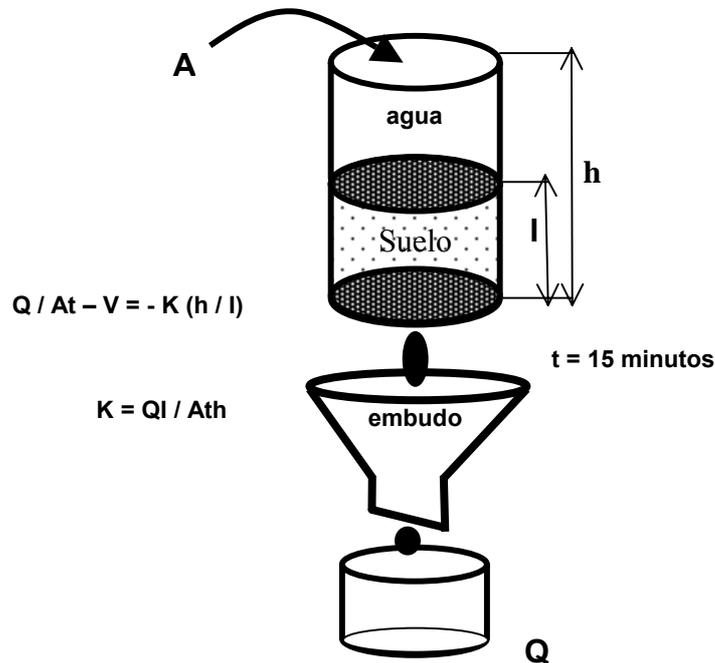


Figura 14. Variables para el cálculo de la conductividad hidráulica

Donde: K = conductividad hidráulica, A = área de la muestra (cm^2), l = longitud de la muestra de suelo (cm), h = carga hidráulica (cm), t = tiempo (h) y Q = promedio de volúmenes (cm^3).

Cuadro 10. Ejemplo de cálculo de la conductividad hidráulica

Sistema 1	A	l	h	t	Q	At	K
Parcela 1	11.63	7.45	13.85	3.25	106.31	37.68	1.52

Donde:

- K = Conductividad hidráulica (cm h^{-1})
- A = Área de la muestra (cm^2)
- l = Longitud de la muestra de suelo (cm)
- h = carga hidráulica: suma de las longitudes de la muestra de suelo más altura del agua (cm)
- = Intervalo de tiempo (minutos que deben ser convertidos a horas)
- Q = Promedio de los volúmenes recogidos en el intervalo de tiempo (Q en cm^3)

3.4.1.4. Estimación de agua “útil”

Para la estimación de agua “útil”, se tomaron 12 muestras con cilindros metálicos (con dimensiones 3,5 cm de diámetro y un 1 cm de altura), para cada uno de los sistemas a una profundidad de 15 cm. En laboratorio, las muestras fueron colocadas en platos porosos y puestas a saturación por 24 horas; a las cuales se calculó la retención de humedad a presiones de 0,33; 1 y 15 bares, siendo utilizados distintos platos para cada una de las presiones.

Posteriormente se les aplicó una succión en los platos, éstos fueron colocados en las ollas de presión correspondientes, conectando el tubo de drenaje; las ollas son cerradas cuidadosamente y se conecta la fuente de presión, un compresor de aire, las muestras se dejaron por 48 h y luego fueron pesadas y luego secadas a 110 °C por 24 h.

Para la estimación del agua útil se restó el contenido de humedad a 0,33 bares el agua retenida a 15 bares.



Figura 15. Toma de muestras inalteradas del suelo tomadas para la estimación del contenido de humedad

3.4.1.5. Estimación de humedad volumétrica y lámina de agua

La estimación de la humedad volumétrica y la lámina de agua fue realizada únicamente para los primeros 15 cm de profundidad del suelo.

Humedad volumétrica

La humedad volumétrica se calculó usando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Hv} = \% \text{ Hg} \times \text{da}$$

Donde:

Hv	=	humedad volumétrica (%)
Hg	=	humedad gravimétrica (%)
da	=	densidad aparente g/cm ⁻³

Lámina de agua. Este parámetro fue calculado para los primeros 15 cm de profundidad del suelo y se expresada en mm. Se calculó usando la siguiente fórmula:

$$\text{Lámina de Agua} = \frac{\text{Hv} \times \text{Ps}}{100} \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

Hv	=	porcentaje de humedad volumétrica (%)
Ps	=	profundidad del suelo (cm o mm)

3.4.5.1.1. Mediciones y cálculos

3.4.5.1.2. Datos necesarios:

$$\begin{aligned} Hg &= 60,4 \text{ (capacidad de retención de agua a 0,33 bares).} \\ da &= 1,10 \text{ g cm}^{-3} \end{aligned}$$

1. Cálculo de la Humedad Volumétrica

Usando la fórmula 5 tendremos lo siguiente:

$$\begin{aligned} \% H_v &= 60,4 \times 1,10 \\ \% H_v &= 66,4 \end{aligned}$$

2. Cálculo de la lámina de Agua

Usando la fórmula 6 tuvimos lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Lámina de Agua} &= 0,664 \times 150 \text{ mm} \\ &= 100 \text{ mm} \end{aligned}$$

3.4.1.6. Estimación del balance hídrico

El balance hídrico se estimó para los primeros 15 cm de profundidad del suelo en todos los sistemas para un periodo de 67 días; y fue realizada mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$P_p = ETR + ESC + P \pm \Delta H \dots\dots\dots (7)$$

Donde:

- Pp = Precipitación (mm)
- ETR = Evapotranspiración real (mm)
- ESC = Escorrentía superficial (mm)
- P = Drenaje (mm)
- ΔH = Variación de la reserva de agua en el suelo (mm)

Para estimar el balance hídrico se asumió que la capacidad máxima de retención de agua del suelo corresponde a la humedad gravimétrica bajo una presión de 0,33 bares. El balance hídrico se estimó para los primeros 15 cm de profundidad el suelo y suponiendo que el agua que no era usada en la evapotranspiración, en la escorrentía superficial, ni en procesos de conservar la reserva de agua en el suelo fue drenada a capas más profundas del suelo.

3.4.1.6.1. Mediciones y cálculos

Reemplazando los datos de precipitación, evapotranspiración, escorrentía y retención máxima de agua de la ecuación 7 se procedió a realizar los cálculos como se indican en el cuadro siguiente.

Cuadro 11. Ejemplo del cálculo del balance hídrico

Día	Pp(mm)	ETR(mm)	ESC(mm)	D(mm)	ΔH (mm)	RMA (mm)
1	112,6				0.0	100
2	3,8	1,2	0,7	1,9	0.0	100
3	8,5	1,2	2,5	4,8	0.0	100
4	13,7	2,2	7,4	4,1	0.0	100
5	27,9	1,5	8,8	17,7	0.0	100
6	4,2	1,5	1,3	1,5	0.0	100
7	0	2,2	0	0	-2,2	97,8
8	0	1,3	0	0	-1,3	96,4
9	56,7	2,7	1,0	39,4	3,6	100,0

Donde : Pp = precipitación, ETR = evapotranspiración, ESC= escorrentía superficial, D= drenaje, ΔH = diferencial de la humedad y RMA= reserva máxima de agua.

3.4.1.7. Estimación de variables complementarias

3.4.1.7.1. Densidad aparente

Para el cálculo de la densidad aparente, se procedió en primer lugar a la toma de 12 muestras recogidas en forma aleatoria en cada uno de los sistemas mediante el uso de cilindros metálicos de 7,5 cm de diámetro por 5 cm de altura; las muestras fueron tomadas a una profundidad de 15 cm. Posteriormente las muestras fueron llevadas al laboratorio para ser secadas a una temperatura de 110 °C por 24 horas. Para tener el dato final de la densidad aparente de los sistemas, se promedió los datos obtenidos en cada uno de ellos.

Para el cálculo de la densidad aparente se usó la siguiente fórmula

$$Da = \frac{Ms}{Vtotal}$$

Donde:

Da = Densidad aparente (gcm⁻³)

Ms = Masa seca de la muestra de suelo (g)

Vtotal = Volumen total de la muestra de suelo (cm³)

Conocer el cálculo de la densidad aparente nos permitió transformar los porcentajes de humedad gravimétrica del suelo en términos de humedad volumétrica y luego poder calcular la lámina de agua.

3.4.1.7.2. Textura

Mediante muestras llevadas al laboratorio y por el método del tamizado se estimó el tamaño de partículas del suelo y su proporción en ella. Luego, haciendo uso del triángulo textural, se procedió a determinar su textura.

3.4.1.7.3. Caracterización vegetal

La estimación de la cobertura vegetal de los sistemas se realizó mediante la estimación de la abundancia y riqueza de especies arbóreas y de la cobertura de maleza y pasto. Se procedió de la siguiente manera:

Estimación de la diversidad vegetal

Se trazó una parcela de 50 m de largo por 20 m de ancho en el área de estudio de cada uno de los sistemas; posteriormente se trazó una línea principal al centro de la parcela (figura 16). Para realizar la caracterización de la diversidad de especies arbóreas se consideraron todos los árboles que se encontraron a medio metro de la línea principal, los que fueron identificados (en principio por sus nombres comunes). Solo se consideraron los árboles que tuvieron un dap (diámetro a la altura del pecho) mayor a 5 cm.

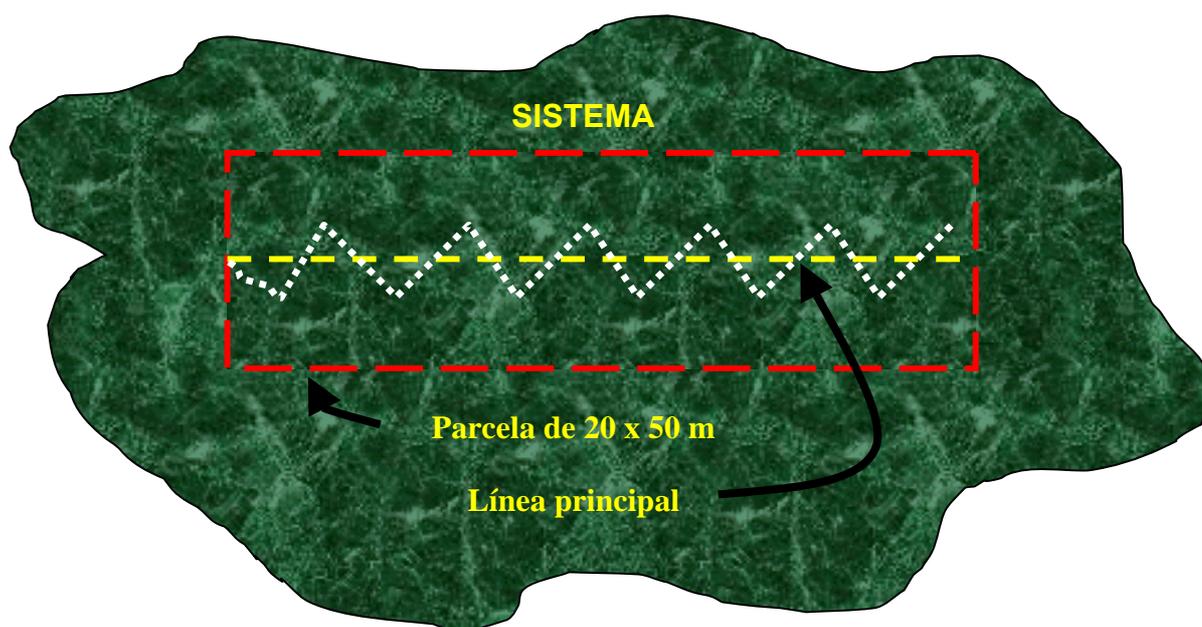


Figura 16. Esquema de la metodología para determinación de la abundancia y riqueza vegetal

Estimación de cobertura de maleza y pastos

Para estimar la cobertura de maleza y pasto se realizó lo siguiente: a la parcela principal (20 x 50 m) se la dividió en subparcelas de dimensiones de 10 x 10 m. De cada subparcela, con ayuda de un marco metálico de 0,50 m x 0,50 m, mediante la observación se estimó el porcentaje de cobertura de pasto, maleza, y suelo sin cobertura herbácea viva.

Asimismo dentro de cada muestra realizada con el marco se midió la altura del pasto y se sacó su promedio. De tal manera que al final se tuvieron 50 datos referente al porcentaje de malezas, pastos y suelo sin cobertura herbácea viva y 10 datos referente a la altura promedio de los pastos.

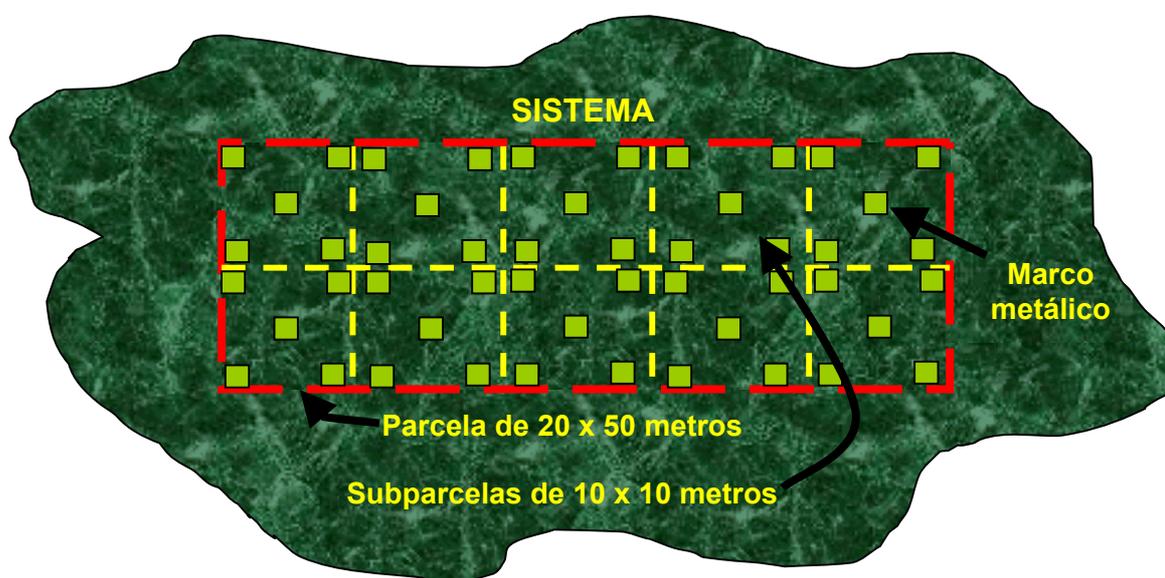


Figura 17. Esquema de la metodología para la determinación de cobertura de malezas y pastos

Determinación de la estructura vertical

La estructura vegetal se estimó considerando cuatro estratos de altura (de 0 a 2 m, de 2 a 9 m, de 9 a 20 m y > 20 m), es decir en cada subparcela se ubicó toda la vegetación referente al estrato y se estimó su porcentaje de cobertura. De la misma manera, en cada subparcela se tomó la lectura de la cobertura de árboles mediante el uso del densímetro. Teniendo al final 10 datos de cobertura de dosel y estructura vertical.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de los sistemas evaluados

A. Pastura nativa sobrepastoreada

Cuenta con un área aproximada de 0,60 ha. y un rango de pendiente entre 30 a 35 %. Fue establecida hace 10 años y no presenta árboles; se encuentra bajo un sistema de pastoreo continuo y presenta signos evidentes de compactación y erosión. Las características de la cobertura vegetal (figura 18) y estructura vertical (figura 19) se presentan a continuación.

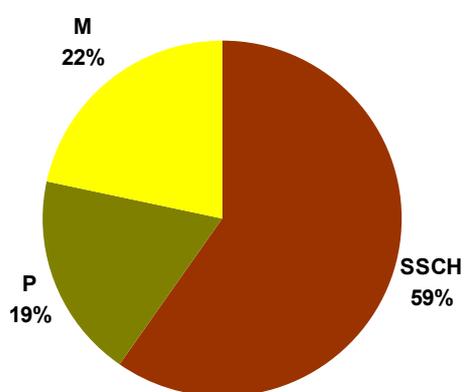


Figura 18 Cobertura vegetal de la pastura nativa sobrepastoreada evaluada en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Donde: SSCH = suelo sin cobertura herbácea viva, P = pasto y M = malezas

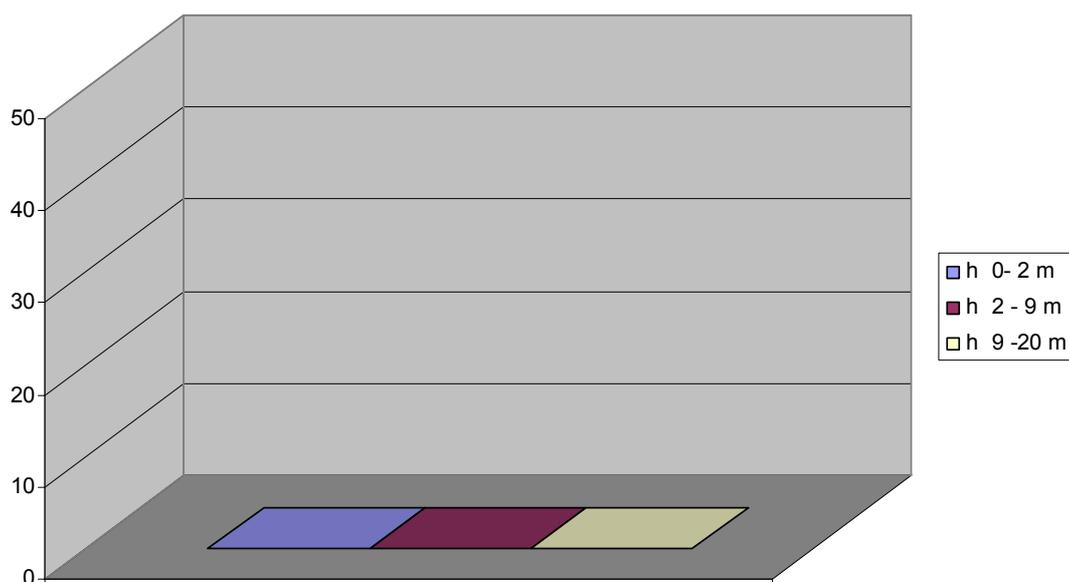


Figura 19 Estructura vertical de la pastura nativa sobrepastoreada evaluada en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Donde: h = altura

En el campo el suelo fue clasificado como un Inceptisol (Typic Humitropepts) y en el siguiente cuadro se presentan algunas características de sus horizontes.

Cuadro 12. Características de los horizontes del suelo de la pastura nativa sobrepastoreada en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Horizonte	Profundidad (m)	Color	Textura
Ah ₁	0 – 0,22	7.5YR3/2	Franco
Ah ₂	0,22 - 0,41	10YR2/2	Franco
Bw	0,41 - 0,70	10YR3/2	Franco
BC	0,70 - 1,00	10YR4/4	Franco
C1	1.00 -1,35	10YR5/4	Franco – Arcilloso
C2	1,35 - 1.50	10YR5/6	Arcilloso – masivo

B. Pastura nativa con árboles

Tiene un área aproximada de 0,70 ha. y un rango de pendiente entre 30 a 35 %. Fue establecida hace 15 años y se encuentra bajo un sistema de pastoreo rotativo. La pastura dominante es la *Brachiaria decumbens*; es un sistema con alta densidad de árboles y presenta una abundancia > a 30 árboles ha⁻¹ y una riqueza igual de 6 especies de árboles. La características de cobertura vegetal (figura 20) y estructura vertical (figura 21) son las siguientes.

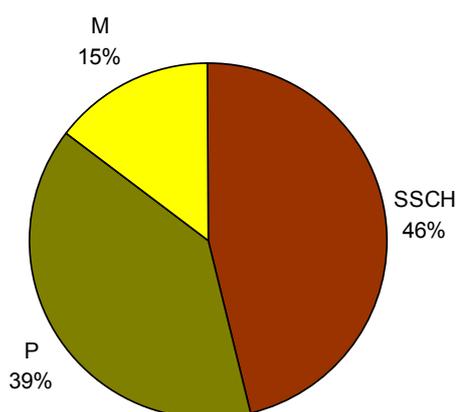


Figura 20 Cobertura vegetal de la pastura nativa con árboles evaluada en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005. Donde: SSCH = suelo sin cobertura herbácea viva, P = pasto y M = malezas

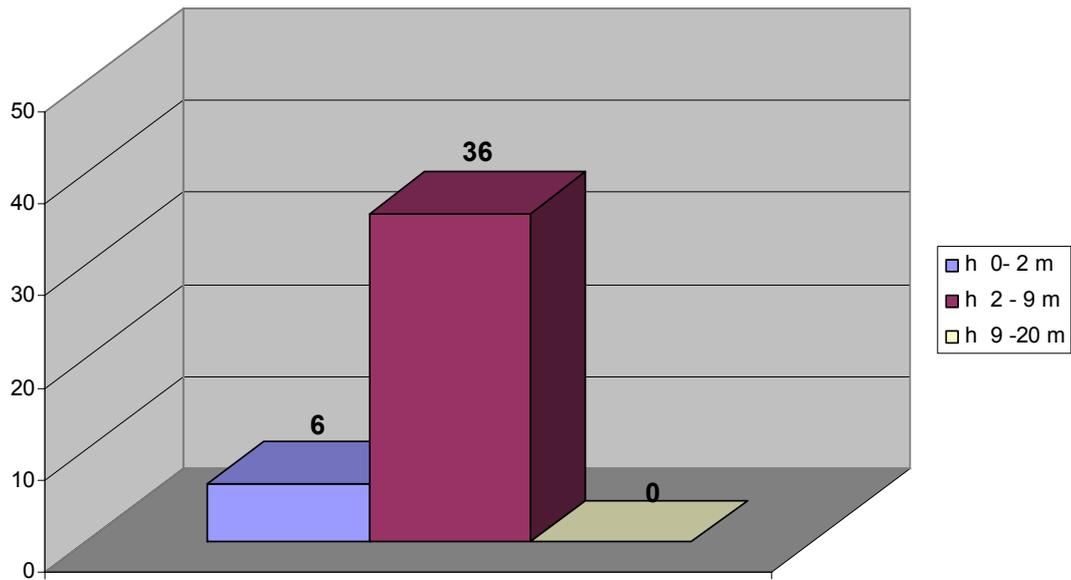


Figura 21 Estructura vertical de la pastura nativa con árboles evaluada en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.
Donde: h = altura

En el campo el suelo se clasificó como un Inceptisol (Typic Eutropets). En el siguiente cuadro se presentan algunas características de sus horizontes.

Cuadro 13. Características de los horizontes del suelo de la pastura nativa con árboles en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Horizonte	Profundidad (m)	Color	Textura
A	0 – 0,28	10YR2/1	Franco – Arcilloso
B _w	0,28 - 0,59	10YR3/2	Arcilloso
BC	0,59 – 0,86	10YR3/5	Arcilloso
C	> 0,86	10YR5/8	Arcilloso

C. Pastura mejorada con árboles

Tiene un área aproximada de 0,50 ha. y un rango de pendiente entre 30 a 35 %. Fue establecida hace 10 años y se encuentra bajo un sistema de pastoreo rotativo. Tiene al *Paspalum atratum* como pasto establecido, presentado una alta densidad de árboles, con una abundancia > a 30 árboles ha⁻¹ y una riqueza igual a 4 especies de árboles. Las características de su cobertura vegetal y estructura vertical se indican en las figuras 22 y 23.

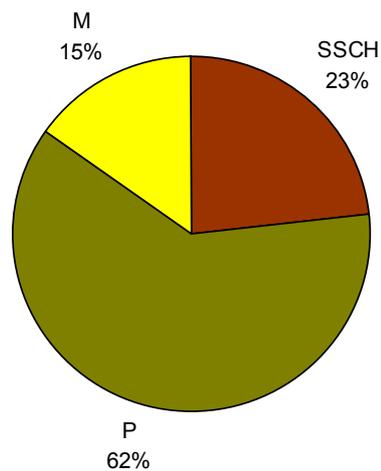


Figura 22 Cobertura vegetal de la pastura mejorada con árboles evaluada en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Donde: SSCH = suelo sin cobertura herbácea viva, P = pasto y M = malezas

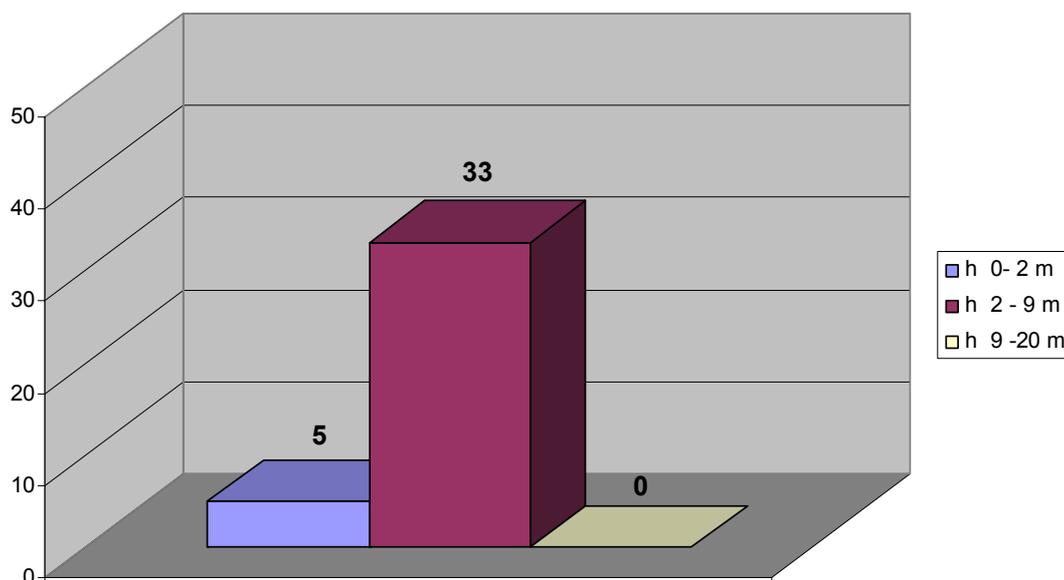


Figura 23 Estructura vertical de la pastura mejorada con árboles evaluada en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Donde: h = altura

Los suelos clasificaron como Inceptisoles (Typic Eutropets). Y en el cuadro 14 se presentan algunas características de sus horizontes.

Cuadro 14. Características de los horizontes del suelo de la pastura mejorada con árboles en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Horizonte	Profundidad (m)	Color	Textura
A	0 – 0,20	10YR3/2	Franco arcilloso
B _w	0,20 - 0,50	10YR4/4	Arcilloso
BC	0,50 – 0,75	10YR5/4	Arcilloso
C	> 0,75	10YR6/6 (Variegado 2.5YR4/6 + 2.5YR4/6)	Arcilloso
2 ^a	1,30 -1,40	10YR3/2	Franco a Franco limoso
2B	> 1,40	10YR4/4	Franco arcilloso

D. Bosque secundario intervenido

Tiene un área aproximada de 0,70 ha. y un rango de pendiente entre 30 a 35 %. Fue establecido hace 30 años y se encuentra bajo regeneración natural y con un manejo selectivo. Es un sistema con alta densidad de árboles, presentando una abundancia > a 50 árboles ha⁻¹ y una riqueza igual a 14 especies de árboles. Las características de su cobertura vegetal y estructura vertical son indicadas en las figuras 24 y 25.

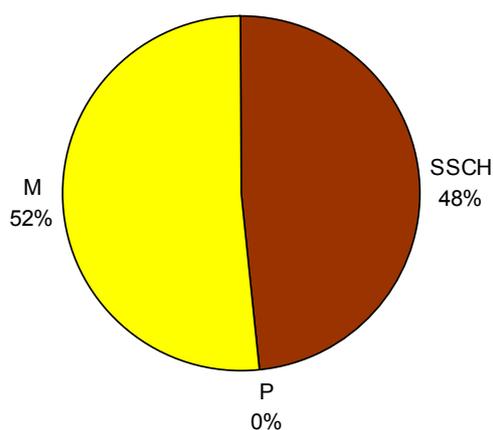


Figura 24 Cobertura vegetal del bosque secundario intervenido evaluado en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.
Donde: SSCH = suelo sin cobertura herbácea viva, P = pasto y M = malezas

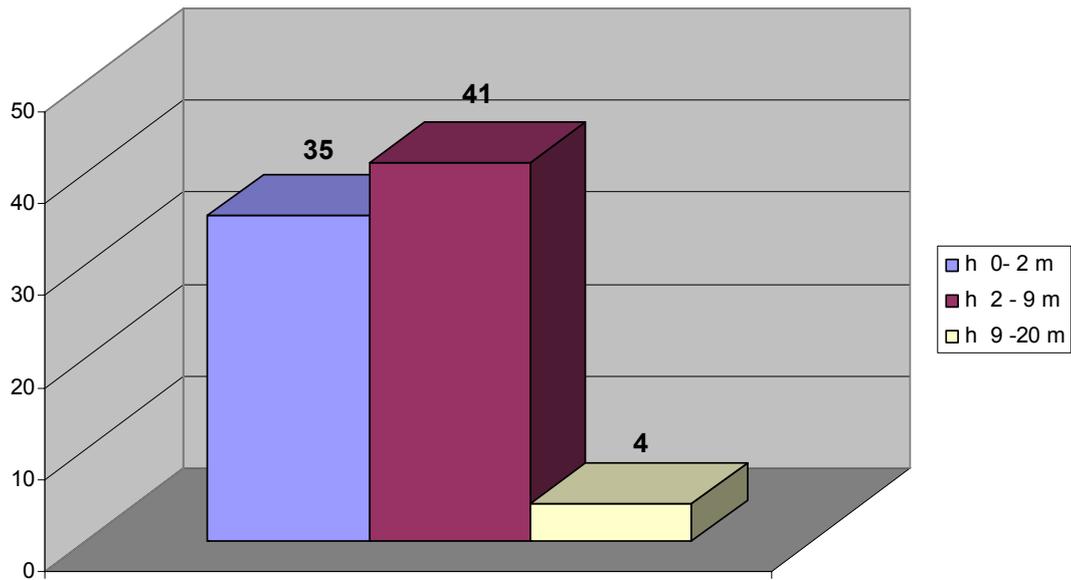


Figura 25 Estructura vertical del bosque secundario intervenido evaluado en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.
Donde: h = altura

Los suelos son del sitio se clasificaron como Inceptisoles (Eutropepts), y en el siguiente cuadro se presentan las características de sus horizontes.

Cuadro 15. Características de los horizontes del suelo del bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Horizonte	Profundidad (m)	Color	Textura
Ah ₁	0 – 0,26	10YR3/2	Franco
Ah ₂	0,26 - 0,50	10YR4/3	Franco arcillo arenoso
B _w	0,50 – 0,90	10YR5/4	Franco arcillo arenoso a franco arenoso
C	> 0,90	10YR6/6	Arenoso

Los resultados muestran que la pastura nativa sobrepastoreada presenta un mayor área de suelo sin cobertura herbácea viva (60%) en comparación con las pasturas nativas con árboles (46%), pasturas mejoradas con árboles (23%) y el bosque secundario intervenido (48%). El bosque secundario intervenido no presenta pastos, ya que su cobertura esta compuesta principalmente por malezas, arbustos y árboles; los cuales si bien no cubren el área con la eficiencia de las pasturas, proveen al suelo de una capa de materia orgánica proveniente de las hojas y ramas.

Tanto las pasturas nativas con árboles, como la pastura mejorada con árboles tuvieron pastos macollados (*Brachiaria decumbens* y *Paspalum notatum* respectivamente), siendo la pastura mejorada con árboles la que presentó la menor área de suelo sin cobertura herbácea viva (23%), esto posiblemente se deba al tipo de crecimiento de cada especie y al manejo que reciben por parte del productor (principalmente el pastoreo).

La cobertura arbórea entre los sistemas fue heterogéneo, así el bosque secundario intervenido (69%) presentó una mayor cobertura que las pasturas nativas con árboles (34%) y a las pasturas mejoradas con árboles (20%). La riqueza y abundancia de especies arbóreas fue desigual entre los sistemas. El bosque secundario intervenido presentó 14 especies y un número total 540 árboles ha⁻¹, seguida de las pasturas nativas con 6 especies y un total de 410 árboles ha⁻¹, y por último las pasturas mejoradas con 4 especies diferentes y con un total de 130 árboles ha⁻¹.

Referente a la estructura vertical, de los sistemas evaluados, la pastura nativa sobrepastoreada no presentó árboles ni arbustos; el bosque secundario intervenido mostró los mayores valores en los tres estratos y el único sistema que presentó una estructura vertical en el estrato de 9 -20 m (4%), la pastura nativa con árboles tuvo el mayor valor en el estrato de 0 – 2 m (6%), respecto a la pastura mejorada con árboles (5%). En el estrato de 2 – 9 m de altura, la pastura nativa presentó un 36 % de cobertura, mientras que la pastura mejorada con árboles 33%.

La pendiente de los sistemas nos indican que se encuentran en condiciones semejantes; sin embargo el manejo que tiene cada sistema es diferente, el cual está regido por las decisiones de los propietarios.

4.2. Características físicas del Suelo

Se determino la textura del suelo de los sistemas en base a la presencia de arena, limo y arcilla en cada uno de ellos; y de un total de 12 muestras de cada uno de los sistemas, analizadas mediante el método del cilindro, se determinó la densidad aparente promedio para cada uno de ellos. Los resultados de estas dos variables se presentan el cuadro 16.

Cuadro 16. Densidad aparente (g cm^{-3}) promedio y textura en los diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Sistema	Da (g cm^{-3})	Granulometría			Textura
		Arena	Limo	Arcilla	
Pastura nativa sobrepastoreada	1,10 ^a	41	38	21	Franco
Pastura nativa con árboles	1,09 ^a	37	36	27	Franco arcilloso
Pastura mejorada con árboles	1,04 ^a	37	36	29	Franco arcilloso
Bosque secundario intervenido	1,11 ^a	43	36	21	Franco

Da = densidad aparente

Los resultados muestran que si bien la densidad aparente entre sistemas fue diferente, no existe una diferencia significativa entre ellas, Lo cual se deba al momento de toma de las muestras, las cuales se realizaron en cuando las pasturas nativas sobrepastoreadas habían recuperado su cobertura vegetal.

La textura del suelo de los sistemas muestra una cierta homogeneidad, sugiriéndonos que son suelos que provienen del mismo material parental o geológico.

4.3. Escorrentía superficial

La mayoría de los valores de precipitación registrados en el área durante el periodo de estudio son altos, lo que indica que fue un año bastante lluvioso (3200 mm). Estos resultados pueden estar influenciados por el fenómeno del niño y la presencia de una temporada “atípica” de huracanes en el año de evaluación (2005).

La máxima precipitación promedio registrada en los pluviómetros, colocados en cada uno de los sistemas, fue de 116 mm con intensidades altas y de corta

duración (hasta 100 mm h⁻¹ registradas por la estación meteorológica). Asimismo se pudo observar la variabilidad de la precipitación entre los sistemas, indicando la presencia de microclimas.

Durante el periodo de estudio se evaluaron 50 eventos de lluvia en las tres parcelas de escorrentía de cada uno de los sistemas. La cantidad de precipitación promedio para producir escorrentía superficial (Umbral de escurrimiento), fue diferente en cada uno de los sistemas y se muestran en la Figura 26.

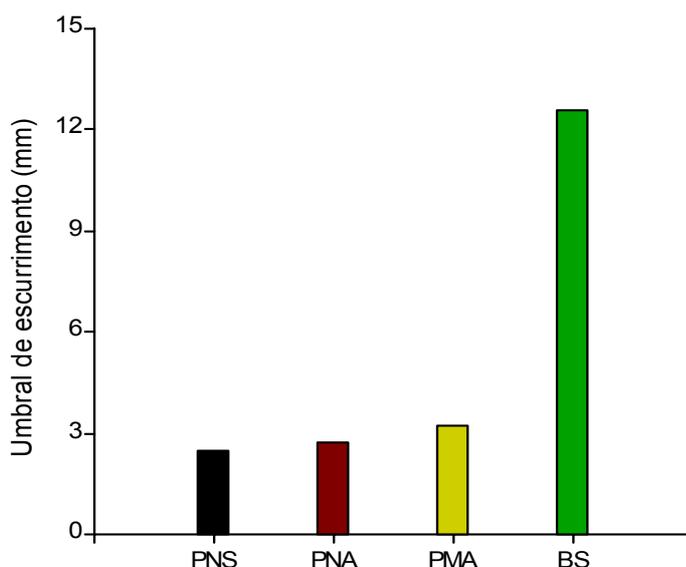


Figura 26. Umbral promedio de escorrentía superficial (mm) en los diferentes sistemas en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Donde: PNS = pastura nativa sobrepastoreada, PNA = pastura nativa con árboles, PMA= pastura mejorada con árboles y BS = bosque secundario intervenido.

Los valores de umbral de escurrimiento muestran que la pastura nativa sobrepastoreada necesitó 2,5 mm de precipitación, la pastura nativa con árboles 2,7 mm, la pastura mejorada con árboles 3,2 mm y el bosque secundario intervenido 12,6 mm para la generación de escorrentía superficial, esto posiblemente se deba a que los tallos, hojas y ramas se comportan como una barrera física, funcionan como una esponja y absorben el impacto de las gotas del agua, retardando de esta manera la escorrentía superficial, especialmente en zonas de ladera (Alegre *et al* 2000).

Estos resultados indican que el bosque secundario intervenido necesita seis veces cantidad de lluvia para generar escorrentía superficial, en comparación con las pasturas nativas sobre pastoreadas; lo que se deba probablemente a que la interceptación de la precipitación es superior en sistemas con mayor cobertura

vegetal, concordando con Ibrahim *et al* (2001) quien dice que bajo condiciones de precipitación normal la interceptación de la lluvia por las copas de los árboles reduce la cantidad de agua que cae al suelo y por que los árboles afectan la dinámica hídrica, incrementando la infiltración y la retención de agua Young (1997),

La escorrentía superficial generada en cada uno de los sistemas se muestra en la figura 27.

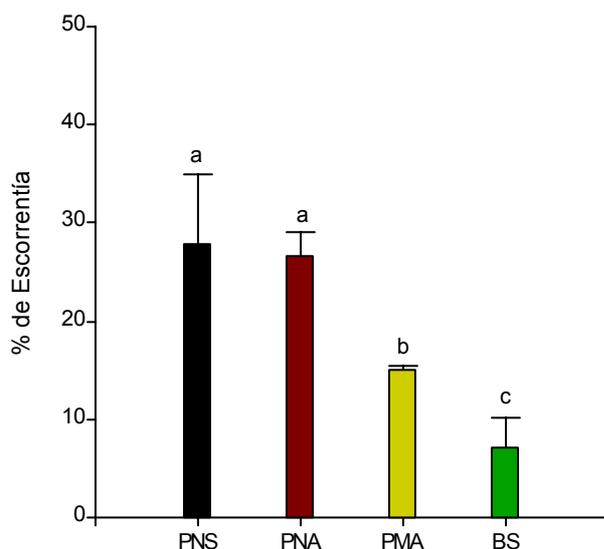


Figura 27. Escorrentía superficial promedio (%) y su desviación estándar durante 50 eventos de lluvia en diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Donde: PNS = pastura nativa sobrepastoreada, PNA = pastura nativa con árboles, PMA= pastura mejorada con árboles y BS = bosque secundario intervenido.

Los resultados muestran que la escorrentía superficial dependió de la cantidad e intensidad de las precipitaciones presentadas; aunque los sistemas estuvieron bajo condiciones semejantes de precipitación (de 1 hasta 116 mm) la escorrentía generada en estos fue diferente, teniendo la pastura nativa sobrepastoreada (28%) una escorrentía superficial cuatro veces mayor al bosque secundario intervenido (7%), dos veces mayor a una pastura mejorada con árboles(15%) y no presentando diferencia significativa con una pastura nativa con árboles(27%).

Los datos obtenidos coinciden con investigaciones realizadas por Hong (1978) y Humphreys (1991), quienes concluyen que la escorrentía superficial está relacionada inversamente con la cobertura vegetal; lo que es explicado por Alegre *et al* (2000), quien sostiene que el desarrollo de los sistemas radiculares de las especies plantadas favorece la infiltración del agua y el aire en el suelo.

Otro factor importante que influyó sobre la escorrentía superficial fue el manejo en cada uno de los sistemas; así por ejemplo, durante y algunos días después de la introducción de animales, tanto en pasturas nativas sobre pastoreadas, pasturas nativas con árboles y pasturas mejoradas con árboles, la escorrentía aumentó por efecto del pisoteo del ganado debido a la compactación y ruptura de la estructura del suelo que producía. Rhoades *et al* 1964 y Rauzi 1966 concluyeron que a una mayor carga animal la compactación y la escorrentía superficial es mayor y la infiltración disminuye.

Sin embargo cuando la pastura nativa sobrepastoreada no fue pastoreada, y se recuperó, la escorrentía superficial disminuyó (hasta un 20%); resultados similares encontró Turcios (1995), quien tuvo resultados que indican que pastos con buena cobertura reducen el grado de escorrentía del agua.

La siguiente figura muestra las curvas de escorrentía superficial calculada para 50 eventos de lluvia en los cuatro sistemas evaluados.

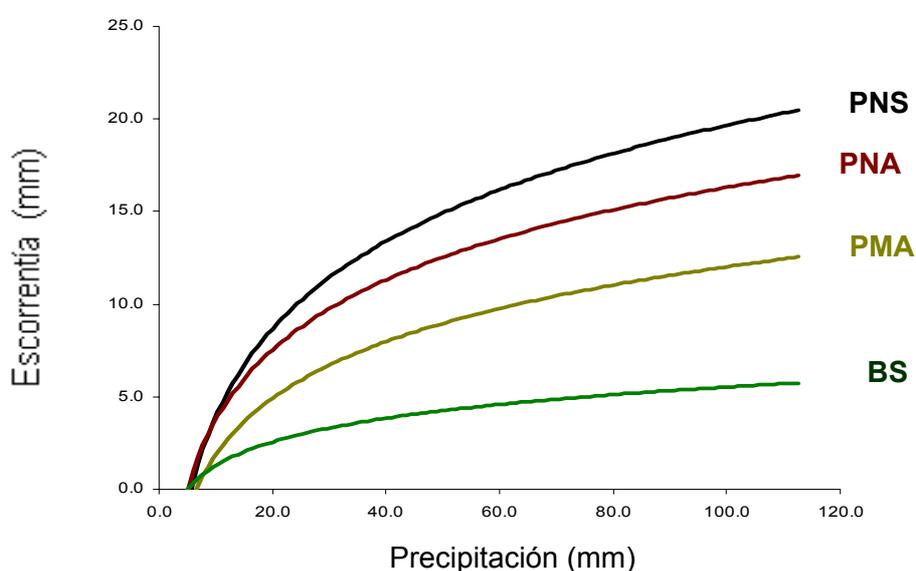


Figura 28. Curvas de escorrentía superficial promedio generada de 50 eventos de lluvia en diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Donde PNS= pastura nativa sobrepastoreada, PNA= pastura nativa con árboles, PMA= pasturas mejoradas con árboles y BS= bosque secundario intervenido.

Las curvas de escorrentía nos muestran la tendencia que tiene cada sistema, indicándonos que los sistemas que generaran menor escurrimiento son los que tienen árboles y una mejor cobertura vegetal (pasturas nativas con árboles, pasturas mejoradas con árboles y el bosque secundario intervenido).

De las curvas de escorrentía superficial generadas se obtuvo sus correspondientes fórmulas de regresión:

- | | | |
|---|---|------------------------------------|
| a. <u>Pasturas nativas sobrepastoreadas:</u> | $Y = 6,83 \ln(X) - 11,80$ | ($R^2 = 0,71$) |
| b. <u>Pasturas Nativas con árboles:</u> | $Y = 7,92 \ln(X) - 14,63$ | ($R^2 = 0,44$) |
| c. <u>Pasturas Mejoradas con árboles:</u> | $Y = 4,39 \ln(X) - 8,05$ | ($R^2 = 0,44$) |
| d. <u>Bosque Secundario Intervenido:</u> | $Y = 1,80 \ln(X) - 2,98$ | ($R^2 = 0,66$) |

Donde:

Y	=	Escorrentía (mm)
X	=	Precipitación (mm)

Así, en un evento de 10 mm, una vez que se ha alcanzado el umbral de escurrimiento, tendremos una escorrentía de:

- 3,9 mm en la pastura nativa sobrepastoreada
- 3,6 mm en la pastura nativa con árboles
- 2,1 mm en una pastura mejorada con árboles
- 1,2 mm en el bosque secundario intervenido.

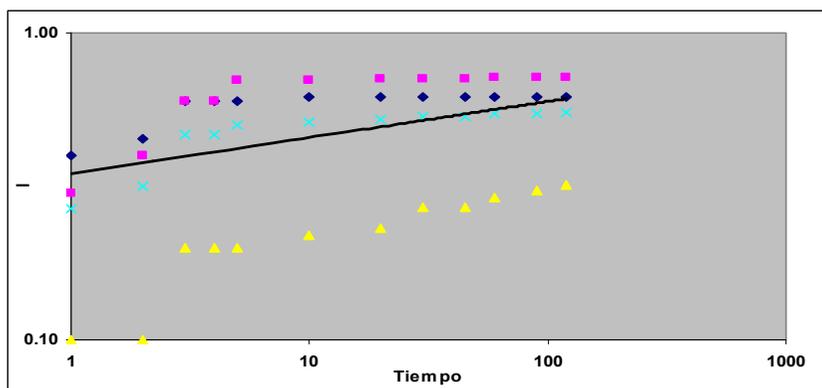
4.4. Capacidad de infiltración

Las pruebas de infiltración fueron realizadas de manera simultánea en cada uno de los sistemas, es decir fueron colocados 3 juegos de anillos concéntricos al mismo tiempo en las pasturas nativas sobre pastoreadas para la toma de datos, y de la misma forma en los siguientes sistemas. Estas pruebas se realizaron en el mismo día para los 4 sistemas.

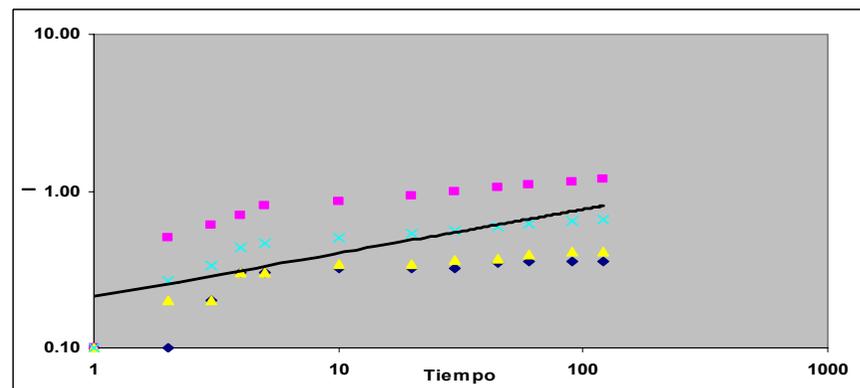
A continuación se presentan los datos obtenidos de la capacidad de infiltración calculada con tres pruebas en cada uno de los sistemas evaluados (cuadro 17), y en la figura 29 se muestran las gráficas respectivas calculadas mediante el uso de la ecuación de Kostyakov ($I = a b t^{b-1}$).

Cuadro 17. Capacidad de infiltración promedio por sistema en sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

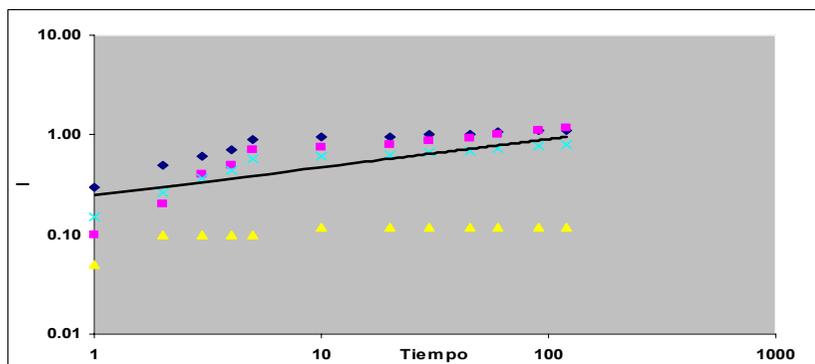
Sistema	Infiltración (cm h⁻¹)	R²
Pastura nativa sobrepastoreada	0,07	0,65
Pastura nativa con árboles	0,19	0,70
Pastura mejorada con árboles	0,23	0,80
Bosque secundario intervenido	3,54	0,87



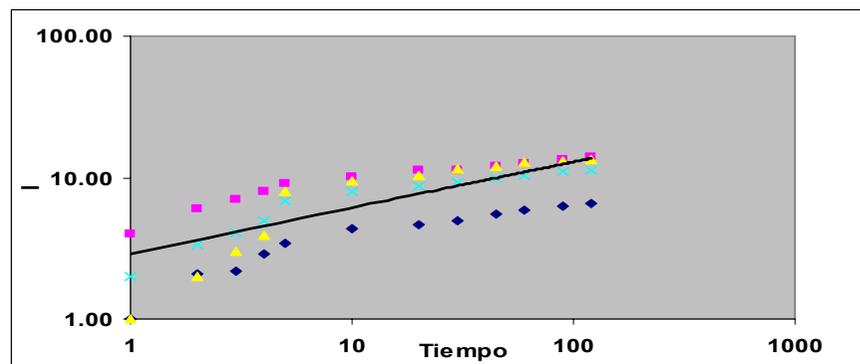
Pastura nativa sobrepastoreada
 $Y = 0,3472X^{0,1179}$ $R^2 = 0,65$



Pastura Nativa con árboles
 $Y = 0,2111X^{0,2795}$ $R^2 = 0,70$



Pastura Mejorada con árboles
 $Y = 0,2456X^{0,2833}$ $R^2 = 0,80$



Bosque secundario intervenido
 $Y = 2,9094X^{0,3235}$ $R^2 = 0,87$

Figura 29. Velocidad de infiltración en los sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Los valores de infiltración obtenidos, medidos con el método de anillos concéntricos, indica que la velocidad de infiltración entre los sistemas es diferente. Así, el bosque secundario intervenido tuvo 3 veces más infiltración que las pasturas nativas sobrepastoreadas, pasturas nativas con árboles y a las pasturas mejoradas con árboles; mientras que en las pasturas con árboles (pasturas nativas y mejoradas con árboles) la infiltración fue mayor que en la pastura nativa sobrepastoreada; resultados similares encontró Suárez de Castro (1980) al comparar la eficiencia de infiltración entre bosque (68,9 %) y pastura (24, 7%).

Si bien es cierto la capacidad de infiltración depende de las características del suelo, como la estructura; es posible que la cobertura vegetal sea una de las variables principales en el proceso de infiltración, ya que fueron los sistemas con mayor cobertura los que presentaron los mejores valores debido al efecto esponja del mulch que se encontraba sobre el suelo; lo que respaldado por Adams (1966), quien concluye que la cobertura del suelo tiene una acción protectora por la interceptación y absorción del impacto directo de la gota de lluvia, previniendo así el sellado de la superficie y preservando la estructura del suelo inmediatamente por debajo de la misma. De esa manera, la infiltración de agua puede ser mantenida a lo largo de la lluvia (Musgrave y Nichols 1942).

La intensidad del pastoreo en los sistemas ganaderos (PNS, PNA y PMA) es un factor que afectaría la capacidad de infiltración debido principalmente a la compactación del suelo por pisoteo del ganado (Takar *et al* 1990), Posiblemente el bajo valor en la capacidad de infiltración que presentan las pasturas nativas sobrepastoreada se deba a que fueron continuamente pastoreadas.

Existen investigaciones que demuestran la influencia de la compactación sobre la infiltración de agua en el suelo; Singh y Gupta (1990) demostraron que la infiltración en áreas de praderas puede ser 50% menor que en parcelas testigo, bajo los bosques de *Cedrus deodara* y *Pinus wallichiana*, en India. “Esa pérdida de la capacidad de infiltración se relacionó con la pérdida de la vegetación del sub bosque y de la capa orgánica, exponiendo al suelo, y con la disminución de la porosidad debido a la compactación, con aumento consecuente de la escorrentía”.

4.5. Conductividad hidráulica (K)

La conductividad hidráulica depende directamente de la estructura y textura de los suelos (Henríquez 1999). En la figura 30 se presentan los datos obtenidos de la conductividad hidráulica promedio y su desviación estándar de los cuatro sistemas evaluados durante el mismo periodo.

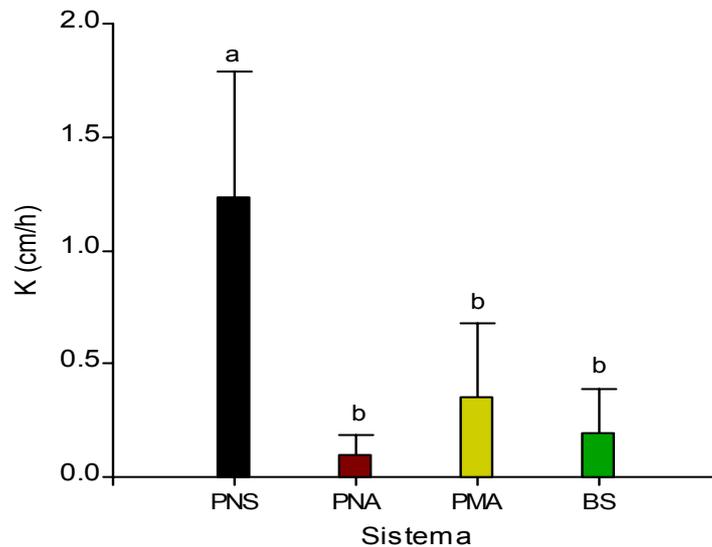


Figura 30. Conductividad hidráulica promedio en los diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Donde: PNS = pasturas nativas sobre pastoreadas, PNA = pasturas nativas con árboles, PMA = pasturas mejoradas con árboles, BS bosque secundario intervenido y ds = desviación estándar.

Los resultados nos muestran que la conductividad hidráulica promedio fue mayor en las pasturas nativas sobrepastoreadas ($1,24 \text{ cm h}^{-1}$), seguida de las pasturas mejoradas con árboles ($0,35 \text{ cm h}^{-1}$), bosque secundario intervenido ($0,20 \text{ cm h}^{-1}$) y la pastura nativa con árboles ($0,10 \text{ cm h}^{-1}$). Posiblemente esta diferencia se deba al mayor espacio poroso en el suelo, debido al sistema radicular, en las pasturas nativas sobrepastoreadas; ya que en el momento del muestreo se encontraba recuperada.

En los otros sistemas ganaderos (pastura nativa con árboles y pasturas mejoradas con árboles) el pisoteo del ganado influyó negativamente sobre la conductividad hidráulica, ya que el sellaje de la superficie inducido por la lluvia o el pisoteo del ganado transforma la superficie de un suelo estructurado en una capa con alta densidad y baja porosidad, disminuyendo la conductividad hidráulica (Moore, 1981; citado por Zhang *et al* 2001; Sadeghian *et al* 1997).

4.6. Agua útil en el suelo

Se calculó el agua útil en el suelo en el horizonte de 0 a 15 cm de profundidad, para lo cual se obtuvieron los datos de la capacidad de retención de humedad del suelo de los sistemas evaluados a 0,33, 1,0 y 15 bares a una profundidad de 0 a 15 cm. en la figura 31 se muestra las curvas de retención de humedad y en el cuadro 18 se muestran los datos correspondientes a la capacidad de almacenamiento de humedad y el agua útil de los sistemas evaluados

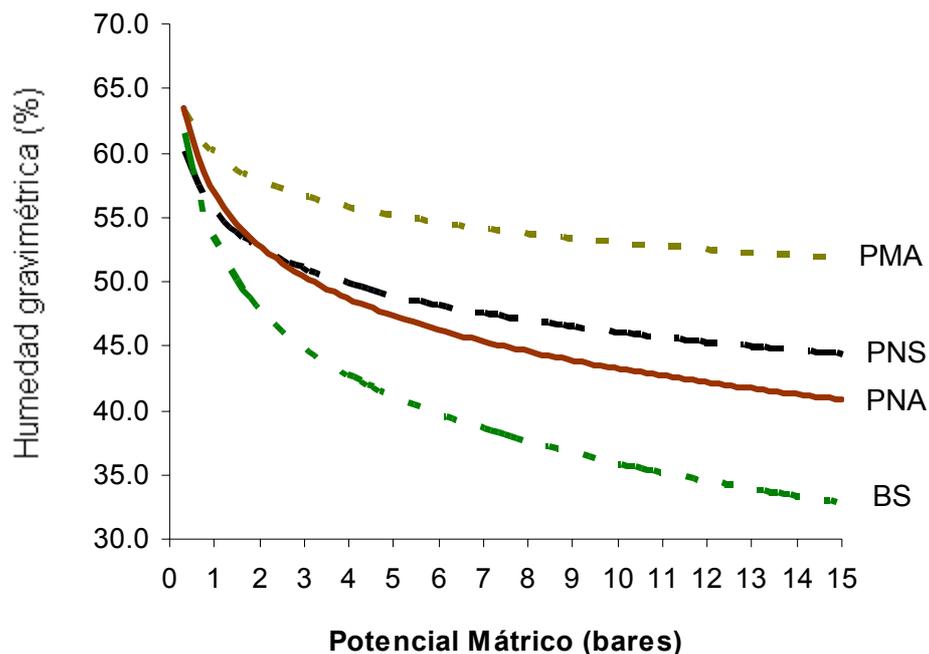


Figura 31. Capacidad de retención de humedad a 0,33, 1,0 y 15 bares en los sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.C

Donde: PNS = pasturas nativas sobre pastoreadas, PNA = pasturas nativas con árboles, PMA = pasturas mejoradas con árboles, BS bosque secundario intervenido y ds = desviación estándar.

Cuadro 18. Capacidad de retención de humedad a 0,33, 1,0 y 15 bares y Agua útil en los sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Sistema	%Humedad			
	0,33 Bares	1,0 Bares	15 Bares	Agua Útil
Pasturas nativas sobre pastoreadas (PNS)	60,4	55,0	44,46	15,94
Pasturas nativas con árboles (PNA)	67,2	51,6	42,38	24,82
Pasturas mejoradas con árboles (PMA)	66,9	54,7	53,26	13,64
Bosque secundario intervenido (BS)	65,6	47,2	34,48	31,12

Los mayores valores de humedad a 0,33 bares son los suelos de textura franco-arcillosa (PNA y PMA) debido a la propiedad que tiene la arcilla de favorecer la retención de agua y es la PNS (60,4%), y el BS (65,6%) los que presentan valores menores debido posiblemente a que son suelo de textura franca. Los valores de agua útil indican que el sistema que dispone de mayor grado de humedad para el beneficio de las plantas es el BS (31%), y el de menor PMA (14 %), lo que se deba a las diferencias en el contenido de arcilla entre sistemas. Es posible que la capa de materia orgánica sobre el suelo (mulch) y el sistema radicular contribuyan en la conservación de agua en el suelo debido a la capacidad de retención de humedad del primero y a que el sistema radicular contribuya a mejorar la textura del suelo.

4.7. Humedad volumétrica (Hv) y lámina de Agua

Asumiendo que la humedad a capacidad de campo corresponde al valor de la retención de la humedad a 0,33 bares, se procedió a calcular la humedad volumétrica para cada uno de los sistemas (Cuadro 19).

Cuadro 19. Humedad volumétrica promedio en los diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Sistema	% Hg	Da (g/cm³)	% Hv
Pastura nativa sobrepastoreada	60,4	1,10	66,4
Pastura nativa con árboles	67,2	1,09	73,2
Pastura mejorada con árboles	66,9	1,04	69,6
Bosque secundario intervenido	65,6	1,11	72,8

Da = densidad aparente, Hg = humedad gravimétrica y Hv = humedad volumétrica

La lámina de agua fue calculada a partir de la humedad volumétrica y se calculó solamente para los primeros 15 cm de profundidad del suelo en cada uno de los sistemas (cuadro 20).

Cuadro 20. Almacenamiento promedio de agua (mm) a capacidad de campo en los diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

SISTEMA	Lámina de agua (mm)
Pastura nativa sobrepastoreada (PNS)	100
Pastura nativa con árboles (PNA)	110
Pastura mejorada con árboles (PMA)	104
Bosque secundario intervenido (BS)	109

La humedad volumétrica fue menor en la PNS (66 %) y mayor en PNA y BS (73%), la pastura mejorada con árboles presento valores intermedio (70%), lo que se tiene incidencia directa sobre la lámina de agua.

Referente a la lámina de agua de los diferentes sistemas, son el BS y PNA con 110 mm quienes presentaron una mayor cantidad de agua, seguida por la PMA (104 mm) y por último la PNS (100 mm). Lo que indica que son los sistemas con árboles quienes contribuyen a conservar la humedad en el suelo ya que presentan menos escorrentía y una mayor infiltración. Esto se ve respaldado al encontrarse nacientes permanentes en los sistemas BS, PNA y PMA; mientras que en la PNS la naciente presente es intermitente y solo proporciona agua durante la época lluviosa ya que en el periodo verano se seca.

De acuerdo con el propietario de la finca, son las nacientes que se encuentran bajo los sistemas con árboles las que son constantes y permanentes, mientras aquellas que son tienen pastos tienden a “perder” el agua rápidamente

4.8. Balance hídrico

Se realizó el cálculo del balance hídrico usando los valores de las variables antes calculadas como la precipitación (pp), la escorrentía superficial (ESC) y lámina de agua (mm) o retención máxima de agua (RMA), la evapotranspiración (ET) fue asumida como la misma en todos los sistemas. Tanto el diferencial de humedad (ΔH), como el drenaje se estimaron por cálculos. En el cuadro 21 y 22 se presenta el balance hídrico para los diferentes sistemas en mm y en %.

Cuadro 21. Balance hídrico² en mm durante un periodo de 67 días en los diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Sistema	Precipitación	ET	ESC	Drenaje	ΔH	RMA
PNS	1377.7	80.1	353.1	944.4	0.0	100.0
PNA	1475.5	80.1	423.0	972.3	0.0	110.0
PMA	1553.3	80.1	217.2	1256.0	0.0	104.0
BS	1540.8	80.1	125.0	1335.6	0.0	109.0

Donde: PNS = pasturas nativas sobre pastoreadas, PNA = pasturas nativas con árboles, PMA = pasturas mejoradas con árboles, BS bosque secundario intervenido, ET = evapotranspiración, ESC = escorrentía superficial, ΔH = diferencial de humedad y RMA = reserva máxima de agua.

² Balance estimado para todo el período de estudio.

Cuadro 22. Balance hídrico en porcentaje (%) durante un periodo de 67 días en los diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Sistema	Pp	ET	ESC	Drenaje
Pastura nativa sobrepastoreada (PNS)	100.0	5.8	25.6	68.6
Pastura nativa con árboles (PNA)	100.0	5.4	28.7	65.9
Pastura mejorada con árboles (PMA)	100.0	5.2	14.0	80.9
Bosque secundario intervenido (BS)	100.0	5.2	8.1	86.7

Donde: Pp= precipitación, ET = evapotranspiración, y ESC = escorrentía superficial..

De acuerdo al balance hídrico realizado podemos decir que el drenaje fue mayor en BS (87%) y en el PMA (81%) y menor en PNS (69 %) y PNA (66 %), estos valores pueden estar sobre estimados ya que se realizó el balance hídrico solo para 15 cm de profundidad y solo para efectos de comparación entre los sistemas, pero hay que tener en cuenta que estos datos pueden estar subestimados, como la ET, ya que se consideró una misma evapotranspiración en todos los sistemas, no siendo esto cierto ya que cada especie y sistema tiene un evapotranspiración diferente.

De los cuatro sistemas, son aquellos con árboles quienes presentan un mejor drenaje y menor escorrentía; lo que concuerda con Wilson y Ludlow 1991 quienes sostienen que son los árboles el principal componente de dichos beneficios.

Al estimar el balance hídrico en los sistemas podemos decir que este (el balance hídrico), se debe específicamente a las acciones e interrelaciones de los componentes del sistema como: suelo, cobertura vegetal y las condiciones de manejo en las que se encuentra, Rodas (1997) dice que es evidente el vínculo hidrológico forestal a nivel de ecosistemas de bosque tropical húmedo de tal manera que los diferentes componentes del ciclo hidrológico, dentro de éste tipo de ecosistemas, guardan una relación estrecha con el estado de conservación o deterioro de los diferentes componentes del bosque.

4.9. Influencia de la vegetación sobre los parámetros hidrológicos

Con la finalidad de conocer el grado de correlación entre la cobertura vegetal y los parámetros hidrológicos evaluados se elaboró una matriz de datos (cuadro 23) para luego determinar sus respectivos coeficientes de correlación (cuadro 24). La matriz elaborada fue en base a los datos obtenidos durante el periodo de investigación.

Cuadro 23 Matriz de variables evaluadas en los sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido evaluados en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005

SISTEMA	CH	SSCH	CA	A	R	ab	Uesc	cc	Hv	Esc	K	Da	I
PNS	40	60	0	0	0	0	2,5	0,604	0,664	24,02	0,60	1,10	0,04
PNS										23,29	1,51	1,14	0,10
PNS										35,97	1,59	1,06	0,07
PNA	54	46	34	119	6	8,17	2,7	0,672	0,732	28,36	0,20	1,13	0,09
PNA										23,62	0,03	1,07	0,41
PNA										27,66	0,06	1,08	0,09
PMA	77	23	20	65	4	2,24	3,2	0,669	0,696	14,80	0,41	1,00	0,25
PMA										14,89	0,01	0,99	0,47
PMA										15,41	0,64	1,14	0,01
BS	52	48	69	378	14	20,58	12,60	0,66	0,73	4,27	0,42	1,03	2,04
BS										6,45	0,10	1,17	2,90
BS										10,42	0,07	1,13	6,92

Donde: PNS = pastura nativa sobrepastoreada; PNA = pastura nativa con árboles; PMA = pastura mejorada con árboles, BS = bosque secundario intervenido, CH = cobertura herbácea (%); SSCH = suelo sin cobertura herbácea viva (%); CA = cobertura de árboles (%); A = número de árboles (abundancia); R = número de especies (riqueza), ab = área basal ($m^2 ha^{-1}$), Uesc = umbral de escorrentía (mm), cc = capacidad de campo (mm) a 0,33 bares y Hv = humedad volumétrica (mm); Esc = escorrentía superficial (%); K = conductividad hidráulica ($cm h^{-1}$); Da = densidad aparente ($g cm^{-3}$) y I = capacidad de infiltración ($cm h^{-1}$).

Cuadro 24 Matriz de coeficientes de correlación y sus respectivas probabilidades de las variables evaluadas en los sistemas de producción ganadera y un bosque secundario intervenido evaluados en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005

	Esc	K)	Da	I	CH	SSCH	CA	A	R	ab	Uesc	cc	Hv
Esc	1	0,14	0,96	0,05	0,21	0,21	0,01	0,01	0,01	0,02	2,30E-03	0,22	0,21
K	0,45	1	0,73	0,28	0,14	0,14	0,03	0,09	0,04	0,08	0,3	1,20E-03	1,60E-03
Da	0,02	0,11	1	0,39	0,19	0,19	0,59	0,51	0,6	0,44	0,5	0,56	0,78
I	-0,58	-0,34	0,27	1	0,74	0,74	0,01	1,50E-03	3,40E-03	2,60E-03	6,90E-04	0,68	0,17
CH	-0,39	-0,45	-0,41	-0,11	1	0	0,81	0,92	0,8	0,75	0,75	0,01	0,5
SSCH	0,39	0,45	0,41	0,11	-1	1	0,81	0,92	0,8	0,75	0,75	0,01	0,5
CA	-0,71	-0,64	0,17	0,75	0,08	-0,08	1	2,80E-08	1,30E-12	1,50E-08	1,20E-04	0,06	6,20E-04
A	-0,75	-0,51	0,21	0,81	-0,03	0,03	0,98	1	1,20E-09	4,10E-10	7,60E-07	0,22	0,01
R	-0,75	-0,61	0,17	0,77	0,08	-0,08	1	0,99	1	1,10E-08	2,90E-05	0,09	1,80E-03
ab	-0,67	-0,53	0,24	0,78	-0,1	0,1	0,98	0,99	0,98	1	1,50E-05	0,21	3,60E-03
Uesc	-0,79	-0,33	0,22	0,84	-0,1	0,1	0,89	0,96	0,92	0,93	1	0,61	0,1
cc	-0,38	-0,82	-0,19	0,13	0,73	-0,73	0,55	0,38	0,51	0,39	0,16	1	1,30E-03
Hv	-0,39	-0,8	0,09	0,42	0,22	-0,22	0,84	0,72	0,8	0,77	0,5	0,81	1

Donde: Esc = escorrentía superficial (%); K = conductividad hidráulica (cm h^{-1}); Da = densidad aparente (g cm^{-3}); I = capacidad de infiltración (cm h^{-1}); CH = cobertura herbácea (%); SSCH = suelo sin cobertura herbácea viva (%); CA = cobertura de árboles (%); A = número de árboles (abundancia); R = número de especies (riqueza), ab = área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$), Uesc = umbral de escorrentía (mm), cc = capacidad de campo (mm) a 0,33 bares; Hv = humedad volumétrica (mm). Letras rojas indican las correlación y las azules la probabilidad.

Los resultados obtenidos demuestran que existe una tendencia de que las variables de cobertura vegetal influyen sobre las variables hidrológicas de escorrentía superficial e infiltración en los sistemas evaluados.

La **escorrentía superficial** presenta una correlación de -0,71 ($p = 0,01$) con la cobertura arbórea y de -0,67 ($p = 0,02$) con el área basal; es decir existe una correlación negativa con estas variables, lo que indica que al incrementarse la cobertura arbórea y el área basal en los sistemas evaluados la escorrentía superficial se vio disminuida. Igualmente presenta una correlación negativa con el umbral de escurrimiento -0,79 ($p = 2,30E-03$) mostrando que a menor umbral de escurrimiento la escorrentía superficial tiende a aumentar.

Asimismo, el **umbral de escorrentía** presenta una correlación de 0,89 ($p = 1,2E-04$) con la cobertura de árboles, lo que muestra el efecto que tienen los árboles sobre el inicio de la escorrentía, indicando que a mayor cobertura de árboles en el sistema, el umbral de escurrimiento se incrementa; asimismo, presenta una correlación de 0,93 ($p = 1,50E-05$) con el área basal.

La **capacidad de infiltración** presenta una correlación de 0,75 ($p = 0,01$) con la cobertura de árboles y de 0,78 ($p = 2,6 E-03$) con el área basal; es decir a mayor cobertura de árboles y área basal la capacidad de infiltración de los sistemas evaluados se incrementó. Asimismo presenta una correlación de 0,84 ($p = 6,90 E-04$) con el umbral de escorrentía, indicando que a mayor umbral de escorrentía la infiltración tiende a incrementarse.

La **humedad volumétrica** presenta correlaciones de 0,81 ($p = 1,30E-03$) con la humedad a capacidad de campo (humedad a 0,33 bares), de 0,84 ($p = 6,20E-04$) con la cobertura arbórea, de 0,77 ($p = 3,60E-03$) con el área basal y de -0,80 ($p = 1,60E-03$) con la conductividad hidráulica. Estas correlaciones indican que mayor cobertura de árboles los beneficios hídricos, referente mejor conservación de humedad en el suelo, se incrementan.

La **conductividad hidráulica** presentó correlaciones negativas de -0,82 ($p = 1,20E-03$) con la capacidad de campo y de -0,80 ($p = 1,60E-03$) con la humedad volumétrica; mostrando una condición lógica la cual nos indica que suelos con una mayor capacidad de retención de humedad tienden a tener una menor conductividad.

V. CONCLUSIONES

1. La escorrentía superficial en la pastura mejorada con árboles (15%) fue dos veces menor que en las pasturas nativas con árboles (27%) y que en las pasturas nativas sobrepastoreadas (28%); asimismo el bosque secundario intervenido (7%) presentó una escorrentía superficial dos veces menor que la pastura mejorada y cuatro veces menor que las pasturas nativas sobrepastoreadas y las pasturas nativas con árboles.
2. La escorrentía superficial muestra un comportamiento inverso a la cobertura arbórea en las fincas ganaderas. Existiendo una correlación negativa de la cobertura arbórea (-0,71) y del área basal (-0,67) con respecto a la escorrentía superficial, lo que implica que a una mayor cobertura arbórea la escorrentía superficial disminuyó.
3. La capacidad de infiltración fue mayor en el bosque secundario intervenido ($3,54 \text{ cm h}^{-1}$). Las pasturas mejoradas con árboles ($0,23 \text{ cm h}^{-1}$) y en las pasturas nativas con árboles ($0,19 \text{ cm h}^{-1}$) presentaron una mayor capacidad de infiltración respecto a las pasturas sobrepastoreadas ($0,07 \text{ cm h}^{-1}$).
4. La capacidad de infiltración presenta una correlación positiva con cobertura de árboles (0,75) y el área basal (0,78). Lo que implica que a una mayor cobertura arbórea la infiltración aumentó.
5. Los sistemas silvopastoriles presentan características hidrológicas, referente a escorrentía e infiltración, intermedias entre las pasturas sobrepastoreadas y los bosques secundarios, por lo que se podrían aprovechar sus beneficios al ser sistemas de uso de suelo "intermedio".
6. La Humedad en el suelo y la cobertura de árboles presentó una correlación positiva (0,84); por lo que el establecimiento de sistemas silvopastoriles en zonas de recarga representa una excelente opción de manejo en sistemas ganaderos debido a que favorecerán a una mayor conservación de agua en el suelo.

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios complementarios que permitan respaldar los resultados encontrados.

Es de mucha importancia evaluar otras variables hidrológicas como evapotranspiración, escurrimiento por fuste, precipitación neta y precipitación incidente en sistemas silvopastoriles, con la finalidad de conocer más a detalle su ciclo hidrológico y poder estimar con mayor detalle el balance hídrico.

Se recomienda continuar con las mediciones de los parámetros hídricos en una mayor diversidad de casos en el tiempo y en el espacio, lo que permitiría incrementar la base de datos, contribuyendo a tener un universo más amplio de posibilidades de arreglos que beneficien a las zonas de recarga.

Se sugiere repetir la metodología usada con la finalidad de validar su uso en la evaluación de variables hidrológicas de sistemas silvopastoriles.

VII. LITERATURA CITADA

- Atlas de Costa Rica. 2004. 1 disco compacto 8 mm.
- Alegre, J.; Meza, A. y Arévalo, L. 2000. Establecimiento de barbechos mejorados. *Revista Agroforestería de las Américas*. (7): 27
- Alves, F.; Fish, G. y Vendrame, I. 1999. Modificações do microclima e regime hidrológico devido ao desmantamento na Amazonía: Estudio de un caso enm rondônia (RO), Brazil. *Acta Amazónica*: 29(3): 395-409
- Aguirre, J. e Ibrahim, M. 1999. Políticas para Incentivar las Relaciones Ganadería / Bosques: Un problema de Flujo de Caja y de Sostenibilidad Ecológico-Económica. *Areas de Agroforestería y Socioeconomía*. CATIE. (En preparación) 1999. CR
- Ahmed, I. y Amin, A. n.d. Arsenic on tap. <http://www.dainichi-consul.co.jp/Español/arsenic/as18.htm>. (23/11/98)
- Arima, E. y Uhl, C. 1997. Ranching in the Brazilian Amazon in a National Context: Economics, Policy, and Practice. *Society and Natural Resources*, 10: 433-51.
- Argel, P. 1992. Problemática del pasto ratana en Costa Rica. In Seminario taller El Pasto Ratana (*Uschaemun ciliare*) en costa Rica, alternativa o problemática en nuestra ganadería? 1992, San Carlos CR. San José, CR, Cooperativa de productores de leche Dos Pinos. P11-17.
- Ahmed, A. y Schumand, G. y Hart, R. 1987. Soil bulk density and water infiltration as affected by grazing systems. *Journal of Range Management* 40(4): 307-309
- Adams, J. 1966. Influence of mulches on runoff, erosion and soil moisture depletion. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison. (30): 110-14 p.
- Bilsborrow, R. y Carr, D. 2001. "Population, Agricultural Land Use and the Environment in Developing Countries", In *Tradeoffs or Synergies? Agricultural Intensification, Economic Development and the Environment*, eds. D.R. Lee and C.B. Barrett. Wallingford. CABI Publishing, pp. 35-56.
- Bosch J. y Hewlett, J. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evaporation. *Journal of Hydrology* 55:3-23. In Cavelier J. y Vargas G. 2001. *Procesos hidrológicos. Ecología y conservación de bosques neotropicales* Guariguata M., Catan G., eds.). 145-165.
- _____ 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55: 3-23.
- Barrantes, G; Romero, M y Díaz, J. 1997. Tasa de erosión y productividad en un sistema agrícola. In Pérez, L. ed. *Desarrollo rural sostenible en Costa Rica, avances y perspectivas*. San José, CR. Porvenir. 269p.
- Baruch, Z. y Fisher, M. 1991. Factores climáticos y de competencia que afectan el desarrollo de la planta en el establecimiento de pasturas. In: Lascano, C.E. y J.M. Spain (eds). *Establecimiento y renovación de pasturas: conceptos, experiencias y enfoque de*

- investigación. 6^a Reunión comité asesor RIEPT. Veracruz (México), noviembre 1998. Cali, CO. CIAT. Pp. 103 – 142.
- Bruijnzeel LA.1997. Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests. editores: e. k. Sadanandan Nambiar y Alan g. Brown. Csiro Canberra Australia. 1997. 571p.
- _____. 1990. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: A state-of-knowledge review. Paris: UNESCO International Hydrological Programme. 224p.
- Bruijnzeel, L. y Proctor, J.1993. Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forests: what do we really know? Pages 25-46 in L. S. Hamilton, J. O. Juvik, y F. N. Scatena, editores. Tropical montane cloud forests: proceedings of an international symposium. East-West Center, Honolulu, Hawaii, USA.
- Chará, J. 2003. Manual para la evaluación biológica de ambientes acuáticos en microcuencas ganaderas. CIPAV.Cali, CO.
- Camero, A.; Camargo, J.; Ibrahim, M. y Schönvoig. 2000. Agroforestería y sistemas de producción animal en América Central. *In* intensificación de la ganadería en Centroamérica. Eds. Pomareda, C; Steinfeld, H. San José CR. Muestra Tierra. 177-198 p.
- Cruz, A.; Susset, A.; Suárez, J. y Esperance, M. 1999. Aspectos socioeconómicos del proceso de producción de los sistemas silvopastoriles en la provincia de la Habana. *Pastos y Forrajes* 22:371-3379
- Calder, I. 1998. Water-resource and land use issues. SWIM Paper 3. Colombo: IIMI.
- _____.1992. The hydrological impact of land use change (with special reference to afforestation and deforestation). Proceedings of the ODA conference on “Priorities for water resources allocation and management” Natural resources and engineering advisers Conference, Southampton, July 1992, Overseas Development Administration, London. 91-101 p.
- Carvalho, M. 1997. Asociaciones de pasturas con árboles en la región centro sur del BR. *Agroforestería en las Américas* 4(15):5-8 p.
- Chomitz, K. y Kumari, K. 1996. The domestic benefits of tropical forests. A critical review emphasizing hydrologic functions. World Bank Policy Research Working Paper, No.1601.
- Chavez, J. y Leopoldo, P. 1991. Evaporação em solos nus da amazonía central. *Energía na Agricultura* 6(2): 35-41.
- Dengo, J.; Cotera, J.; Lücke, O. y Orlich, D. 1999. Escenarios de uso del territorio para Costa Rica en el año 2005. *In* Rodríguez A. Ed. Escenarios de uso del territorio para Costa Rica en el año 2005. SINADES. CR.
- FAO. 2001. “The Global Forest Resources Assessment 2000, Summary Report”. Information Note, Committee on Forestry, Fifteenth Session, 12-16 March. Rome.
- _____.1999. Water. Background Paper 6 of the Conference on the Multifunctional Character of Agriculture and Land. Maastricht.

- _____. 1993. Forest Resources Assessment 1990, Tropical Countries. FAO Forestry Paper 112. Rome: FAO.
- Fassbender, H. 1993. Modelos Edafológicos de Sistemas Agroforestales. CATIE, Turrialba, CR. 491 p.
- Giraldo, ME. 1996. El potencial de los sistemas silvopastoriles para la ganadería sostenible. Pasturas tropicales. 141-172.
- Guevara, S.; Meave, J.; Moreno, P.; Laborde, J. y Castillo, S. 1994. Vegetación y flora de potreros en la sierra de los Tuxtlas, MX.. Acta Botánica Mexicana. 28: 1-27.
- Grima, U. y Fassbender, H. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un sistema forestal de los andes Occidentales de Venezuela. III. Ciclo Hidrológico y translocación de los elementos químicos con agua. Turrialba. CATIE. CR.31:89-99
- Gavande, S. 1972. Física de suelos. Principios y aplicaciones. Limusa. México, D.F., Mex..351 p
- Henriquez C. y Cabalceta G. 1999. Guía practica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. 1era edición. San José, CR. 122p.
- Harvey, C. y Haber W., 1999. Remnant trees and the conservation of biodiversity in Costa Rican pastures. Agroforestry Systems, vol. 44, pp. 37 - 68.
- Hamilton, L. y King, P. 1993. Conversion to grassland or savanna for grazing. In tropical forested watershed: Hydrologic and soil response to major uses or conversions. Hamilton, L. and King, P. (ed). Wetsview Press. 71-80 p.
- Humphreys, L.. 1991. Tropical pasture utilization. Cambridge University Press, Cambridge (UK). 202 p.
- Hamilton, L. y Pearce, A. 1987. Biophysical aspects in watershed management. In watershed resource management: An framework with studies from Asia and th Pacif. Howe, C.W.(ed.). Boulder: Wetsview Press. 33-49 p.
- _____. 1986. ¿What are the soil and water benefits of planting trees in developing country watersheds?. In sustainable resource development in the third world Southgate, D. and Desinger J.F. (ed.). Boulder: Wetsview. 39-58 p.
- Hamilton, L. 1985. Towards clarifying the appropriate mandate in forestry for watershed rehabilitation and management. Report on an expert meeting on strategies approaches and systems for integrated watershed management. Fores and effects conversion: a state of Kathmandu, Roma, FAO. East West 40 p.
- _____. 1983. Reforestation and Afforestation. In tropical forested watershed: Hydrologic and soil response to major uses or conversions. Hamilton, L. and King, P. (ed). Wetsview Press. 113-121 p.
- Hudson, N. 1981. Soil conservation. Londron : BT Batsford Limited. 324p
- Hong, A. 1978. Evaluation on the use de vegetative covers for soil conservation *in* : FELDA . Agricultural Journal. Malaysia (51): 335 -342 p.

- Hewlett, J. 1970 Review of the catchment experiment to determine water yield. *In* Join FAO/USSR International Symposium on Forest influences and Watershed Management (1970, Moscow, USSR). Proceedings. Sn.t. p. 145 - 155
- Ibrahim, M, Schlonvoigt, A. Camargo, J. y Souza, M. 2001. Multi-strata silvopastoral systems for increasing productivity and conservation of natural resources in Central America. J.A. Gomide, W.R.S.Mattos, S. C. da Silva (Eds.) Proceedings. of the XIX International Grassland Congress. Brazil , Piracicaba, Brazilian, FEALQ. 645-650 pp.
- Kiersch, B. 2000. Impactos del uso de la tierra sobre los recursos hídricos: una revisión bibliográfica. ONU. Roma, IT.12p.
- Jiménez, F. 2003. Metodologías de Investigación en Sistemas Agroforestales: Medición de los componentes del balance hídrico en sistemas agroforestales. CATIE, Turrialba, CR. 13 p.
- Kaimowitz, D. 1996. Livestock and deforestation in Central America in the 1980s: a policy perspective. Jakarta, Indonesia. Center for International Forestry research (CIFOR). 88 p
- Libreros, H. 1996. La sostenibilidad de los sistemas de producción agropecuaria: la Agroforestería como alternativa. *In* Seminario Internacional sobre sistemas silvopastoriles: Casos exitosos y su potencial en Colombia (1995, Santa fe de Bogotá, CO). Memoria p. 41- 49
- Leopoldo, P.; Franken, W. y Villa Nova, N. 1995. Real evapotranspiration and transpiration through a tropical rain forest in central Amazonian as estimated by the water balance method. *Forest Ecology and Management*: 73 185-195
- LLuval, J y Uhl, Ch. 1990 Transpiration rates for several woody successional species and for a pasture in the Upper Amazon basin in Venezuela. *Acta Amazónica* 20(único): 29-38
- Leibschner; H. 1985. The hydrological cycle and the influence exerted upon it by man. *Applied Geography and Development (Germany)* 26: 32-45
- Lull, W. 1970. management possibilities for water yield increases. *In* Join FAO/USRR International Symposium on Forest Influences and Watershed Management (1970, Moscow, USSR). Proceedings s.n.t. p. 168 – 178.
- Medina, B. 2004. Externalidades hídricas del sistema agroforestal café con sombra, en la subcuenca del Río Guacalate, Guatemala. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 78 p.
- Muñoz-Carpena, R. 2004. Field devices for monitoring soil water content. Disponible en: <http://edis.ifas.ufl.edu>
- Murgueitio, E. 2000. Sistemas agroforestales para la producción ganadera en Colombia. *Pastos y Forrajes* 23(3): 235-250.
- Mouraille, C.; Porras, I. y Aylward B. 1996. La protección de Cuencas Hidrográficas: Una bibliografía anotada de Hidrología, Valorización Económica e Incentivos Económicos. CREED Costa Rica Notas técnicas. San José. CR.143 p.

- Mattos, M. y Uhl, C. 1994. "Economic and Ecological Perspective on Ranching in the Eastern Amazon" *World Development* 22(2): 145-58.
- Martinez, J.; Noguera, N; Peters, W; Clavero, T y Cassanova, A. 1992. Efecto de la compactación del suelo sobre la producción de forraje en pasto guinea (*Panicum maximum Jacq*). *Agronomía LUZ* 9(2/3): 97-108.
- Moore, I.D. 1981. Effect of surface sealing on infiltration. *Trans. ASAE* 24, 1546-1552.
- Mojica, I. 1974. Efectos de la eliminación de la cobertura vegetal en el contenido de humedad del suelo. CATIE. Turrialba, CR. 1974. 14 p.
- Musgrave, G. y Nichols, M. 1942. Organic matter in relation to land use. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison. (7): 22-28 p.
- Peso, D. e Ibrahim, M. 1996. Sistemas Silvopastoriles: una opción para el uso sostenible de la tierra en sistemas ganaderos. *In* 1er. Foro Internacional sobre "Pastoreo intensivo sobre zonas tropicales". Veracruz, México, 7 – 9 noviembre 1996. Morelia, México. FIRA – Banco de México. 39 p.
- Pezo, D.; Romero, F. e Ibrahim, M. 1992. Producción, manejo y utilización de los pastos tropicales para la producción de leche y carne. En: *Avances en la producción de leche y carne en el Trópico Americano*. FAO. CL.
- Rudel, T.; Flesher, K.; Bates, D.; Baptista, S y Holmgren, P. 2000. "Tropical Deforestation Literature: Geographical and Historical Patterns", *Unasylva* 51 (203): 11-18.
- Robinson, D.; Garder C. y Cooper J. 1999. Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, Capacitance and Theta Probe: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity. *Journal of Hydrology* 223: 198 – 211.
- RODAS, O. 1997. El papel del bosque en el ciclo hidrológico. Plan de Acción Forestal para Guatemala & Instituto Nacional de Bosques. Guatemala. 10p.
- Reynolds, S. 1995. Pasture – Cattle – coconut systems. Bangkok, Thailand. FAO, Regional office for Asia and the Pacific.
- Rhoades, E.; Locke, L; Taylor, H. y McIlvain, E. 1964. Water intake on a sandy range as affected by 20 years of differential cattle stocking rates. *J. 'Range Manage.* 17: 185-190.
- Rauzi, F. y Hanson, C. 1966. Water intake and runoff as affected by intensity of grazing. *J. Range Manage.* 19:351-356.
- Sánchez, F. (2004). Medidas puntuales de permeabilidad. Universidad de Salamanca, 11 pp. (En: <http://web.usal.es/javisan/hidro>)
- Szott, L.; Ibrahim, M., y Beer, J. 2000. The Hamburger connection hangover: cattle pasture land degradation and alternative land use in Central America. CATIE, DANIDA, GTZ.
- Steinfeld, H.; De Hann, C. y Blackburn, H. 1998. *Agriculture and the Environment: Perspectives on Sustainable Rural Development:/ Livestock and the Environment: Issues and Options*. BM. BM. US.
- Somarriba, E. 1997. Pastoreo bajo plantaciones forestales. *Agroforestería de las Américas* 4(15): 26-28 p.

- Sadeghian, S.; Rivera, J. y Gómez, M. 1997. Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia. In: Conferencia electrónica de la FAO sobre "Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica" 1998. Disponible en: <http://www.fao.org/livestock/agap/frg/afris/espanol/document/agrofor1/Agrofor1.htm>
- Solano, F. 1994. Determinación de la rentabilidad Financiera y Comparativa del Manejo del Bosque tropical con Respecto a la Actividad Ganadera, Cordillera Volcánica Central. Tesis Mag. Sc. CATIE .Turrialba, CR.
- Stadmuller, T. 1994. Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales: medidas para mitigarlo. CATIE. Colección Silvicultura de Manejo de Bosques Naturales. 10: 62 p
- Serrao, E. y Toledo, J. 1993. The Search for Sustainability in Amazonian Pastures. In Alternatives to Deforestation: Steps Toward Sustainable Use of the Amazon Rain Forest, ed. A.B. Anderson. New York: Columbia University Press, pp. 195-214.
- Soriano, F y Shimomichi, P. 1991. Proyecto manejo de cuencas hidrográficas experimentales. Sao Paulo. Laboratorio de Hidrología Florestal Eng. Agr Water Emmerrh. 20 p
- Singh, R.y Gupta, M. 1990. Impact of grazing on infiltration in forest ecosystems. Journal of Tree Sciences, Nagar, 9(2):82-85.
- Steel, R y Torrie, J. 1988. Bioestadística: principios y procedimientos. Mx. 622 p.
- Stocking, M. 1988. Socioeconomics of soil conservation in developing countries. Journal of soil and water conservation. 43(5): 381 -385 p.
- Suárez de Castro, F. 1980. Conservación de suelos. IICA, San José, CR. 315 p.
- Turcios, W. 1994. Producción y valorización económica del componente hídrico y forestal de los robledales de altura bajo intervenciones silviculturales. Tesis Mag, Sc. Turrialba, CATIE, CR. 81 p.
- Tejwani, K. 1993. Water management issues: Population, Agriculture and Forests - a focus on watershed management. In Bonell, M., Hufschmidt, M.M. and Gladwell, J.S. Hydrology and water management in the humid tropics. Paris: UNESCO, pp 496-525.
- Takar, A.; Dobrowski, J. y Thurow, T. 1990. Influence of grazing, vegetation life-form, and soil type on infiltration rates and inter-rill erosion on Somalio rangeland. J. of Range Manag. 43(6): 486-490 p..
- Villón, M. 2002. Hidrología. Serie en Ingeniería Agrícola. ITC, Costa Rica. 435 p.
- Villanueva, C. 2001. Ganadería y beneficios de los sistemas silvopastoriles en la cuenca alta del Río Virilla, San José, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CATIE. CR, 108 p.
- Vahrson, W. 1990. El potencial erosivo de la lluvia en Costa Rica. Agronomía costarricense 14(1): 15- 24.
- Wilson, J. y Ludlow, M. 1991. The environment and potential growth of herbage under plantations. In Shelton ,H.M y W.W. Stür (eds.). Forages for plantation crop. ACIAR proceedings. Canberra, AU. ACIAR. (32)10-24 pp.

- Wilson, J. y Wild, D. 1991. Improvement of nitrogen nutrition and grass growth under shading. In Shelton, H.M. y W.W. Stür (eds.). Forages for plantation crop. ACIAR proceedings N° 32. Pp.77-82.
- Walling, E.1980. Water in the catchment ecosystem in :Water quality in catchment ecosystem. New York, J Wiley. P 1 -47
- Young, A. 1997. Agroforestry systems for soil management. 2nd. ed. CAB International, New York, USA. 320 p.
- Zhang, B.; Horn, R.; Baumgartl, T. 2001. Changes in penetration resistance of Ultisols from southern China as affected by shearing. In: Soil & Tillage Research. 57: p. 193 – 202

VIII. ANEXOS

Cuadro 25. Formato para toma de datos de escorrentía

HOJA DE TOMA DE DATOS			
Nombre del colector de datos :			
Zona : _____		Sistema : _____	
Hora : _____		Fecha : _____	
# Estación	LECTURAS		
	Estación en cm	Pluviómetro en pulg.	Observación
1			
2			
3			
4			

Cuadro 26. Formato para la toma de datos de infiltración.

Diámetro del cilindro : _____ Sistema: _____
 Fecha : _____ Lugar : _____
 Ensayo en : _____ Seco () Húmedo ()
 Parcela : _____

Hora de lectura	1 = T Tiempo (minutos)	2 = Altura del Agua		3 = Lectural actual - anterior (cm)	4 = I* Lecturas acumuladas	5 = Tiempo actual - anterior (minutos)	6 = Velocidad de Infiltración (mm/hora)	
		Lectura	Lectura ajustada*					
			1					2
	0							
	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	10							
	20							
	30							
	45							
	60							
	90							
	120							
PROMEDIO DE INFILTRACIÓN								

Cuadro 27. Datos meteorológicos durante periodo de estudio

ELEV: 700 m LAT: 10° 18' 00" N LONG: 84° 48' 00" W															
TEMPERATURE (°C), HEAT BASE 18.3, COOL BASE 18.3															
DEP. HEAT COOL															
FROM DEG DEG															
MEAN MEAN															
FROM NORM															
YR	MO	MAX	MIN	MEAN	NORM	DAYS	DAYS	HI	DATE	LOW	DATE	MAX	MAX	MIN	MIN
												>=32	<=0	<=0	<=-18
05	1														
05	2														
05	3														
05	4														
05	5														
05	6	26.5	19.8	22.2	0.0	0	36	29.6	27	19.4	26	0	0	0	0
05	7	27.8	20.2	22.8	0.0	0	121	31.7	4	18.8	2	0	0	0	0
05	8	28.3	19.9	22.6	0.0	0	122	31.4	2	18.1	28	0	0	0	0
05	9	27.7	19.8	22.3	0.0	0	110	31.6	18	18.9	7	0	0	0	0
05	10	24.6	19.5	21.2	0.0	0	86	30.2	28	17.7	26	0	0	0	0
05	11	26.1	19.9	21.9	0.0	0	76	29.6	6	18.9	13	0	0	0	0
05	12														
		26.9	19.8	22.2	0.0	0	551	31.7	JUL	17.7	OCT	0	0	0	0

PRECIPITATION (mm)									
DEP. MAX									
FROM OBS.									
DAYS OF RAIN									
OVER									
YR	MO	TOTAL	NORM	DAY	DATE	.2	2	20	
05	1	0.0	0.0	0.0	1	0	0	0	0
05	2	0.0	0.0	0.0	1	0	0	0	0
05	3	0.0	0.0	0.0	1	0	0	0	0
05	4	0.0	0.0	0.0	1	0	0	0	0
05	5	0.0	0.0	0.0	1	0	0	0	0
05	6	53.2	0.0	24.8	26	9	6	1	
05	7	218.2	0.0	61.4	15	20	14	4	
05	8	212.4	0.0	50.4	16	22	12	4	
05	9	349.7	0.0	73.4	1	28	18	6	
05	10	455.1	0.0	62.8	3	29	25	8	
05	11	80.6	0.0	35.6	19	17	9	1	
05	12	0.0	0.0	0.0	1	0	0	0	
		1369.2	0.0	73.4	SEP	125	84	24	

WIND SPEED (m/s)					
DOM					
YR	MO	AVG.	HI	DATE	DIR
05	1				
05	2				
05	3				
05	4				
05	5				
05	6	0.1	4.0	28	SSE
05	7	0.1	6.7	10	SSE
05	8	0.1	7.2	28	SSE
05	9	0.1	4.5	17	SSE
05	10	0.1	5.4	4	SE
05	11	0.1	8.0	10	NNW
05	12				
		0.1	8.0	NOV	SSE

Cuadro 28. Escorrentía superficial promedio (%) durante 50 eventos de lluvia en diferentes sistemas de producción ganadera y un bosque secundario en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Sistema	Muestras						Escorrentía superficial
	1	ds	2	ds	3	ds	
PNS	24,02	9,09	23,29	8,69	35,97	10,88	27,76 ^a
PN + A	28,36	11,17	23,62	7,90	27,66	8,18	26,55 ^a
PM + A	14,80	4,93	14,89	4,88	15,41	5,38	15,03 ^b
BS	4,27	2,00	6,45	3,04	10,42	5,70	7,05 ^c

Donde: PNS = pastura nativa sobrepastoreada, PNA = pastura nativa con árboles, PMA = pastura mejorada, BS= bosque secundario intervenido y ds = desviación estándar.

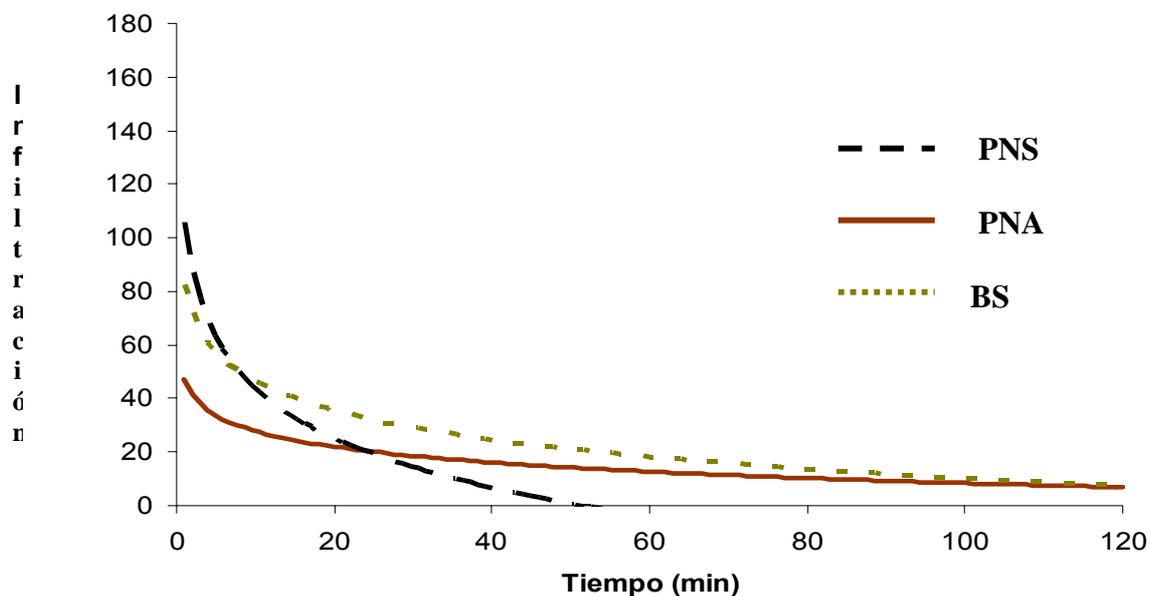


Figura 32. Curvas de infiltración en mmh-1 en los diferentes sistemas de producción animal en la subcuenca el Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

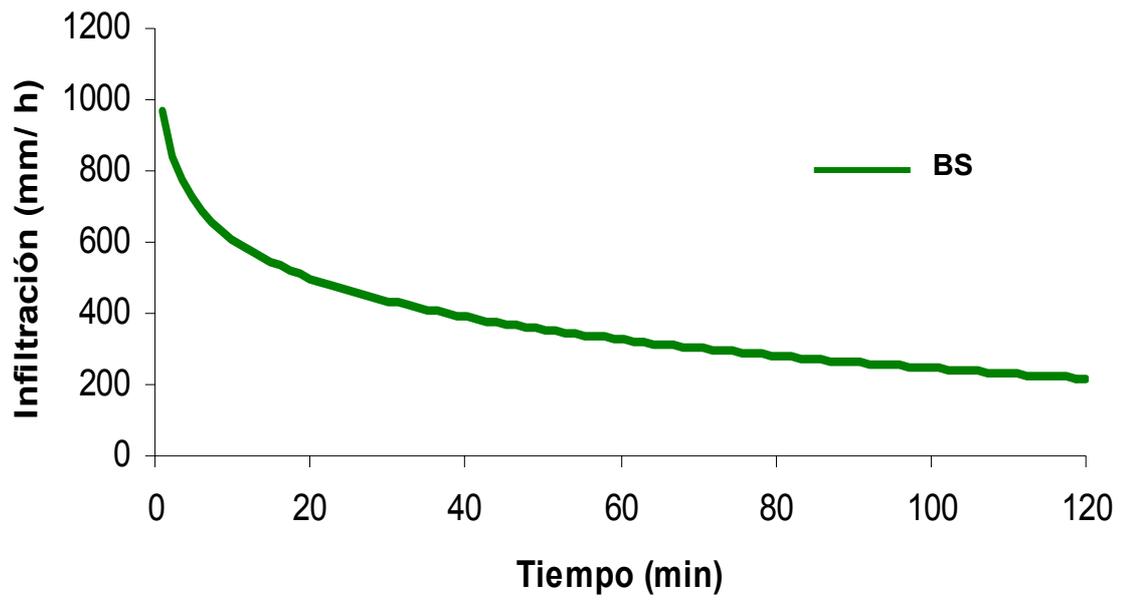


Figura 33. Curvas de infiltración del bosque secundario intervenido en la subcuenca el Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005.

Cuadro 29 Balance hídrico (mm) durante un periodo de 67 días en pasturas nativas sobre pastoreadas en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005

Día	Pp(mm)	ETR(mm)	ESC(mm)	P(mm)	Δ H(mm)	Reserva max de Agua
1	112.6	0.0	0.0		0.0	100.0
2	3.8	1.2	0.7	1.9	0.0	100.0
3	8.5	1.2	2.5	4.8	0.0	100.0
4	13.7	2.2	7.4	4.1	0.0	100.0
5	27.9	1.5	8.8	17.7	0.0	100.0
6	4.2	1.5	1.3	1.5	0.0	100.0
7	0.0	2.2	0.0	0.0	-2.2	97.8
8	0.0	1.3	0.0	0.0	-1.3	96.4
9	56.7	2.7	21.0	29.4	3.6	100.0
10	0.0	2.2	0.0	0.0	-2.2	97.8
11	0.0	3.2	0.0	0.0	-3.2	94.6
12	0.0	2.2	0.0	0.0	-2.2	92.4
13	0.0	0.7	0.0	0.0	-0.7	91.7
14	41.1	1.5	13.1	18.1	8.3	100.0
15	70.3	2.1	21.9	46.3	0.0	100.0
16	22.9	1.4	9.0	12.4	0.0	100.0
17	25.4	2.2	8.6	14.7	0.0	100.0
18	35.6	3.3	13.1	19.2	0.0	100.0
19	22.9	1.3	8.6	13.0	0.0	100.0
20	17.8	1.2	6.4	10.1	0.0	100.0
21	2.5	1.8	0.7	0.1	0.0	100.0
22	59.3	1.1	16.1	42.1	0.0	100.0
23	27.9	1.2	6.6	20.2	0.0	100.0
24	19.1	1.1	4.4	13.6	0.0	100.0
25	5.1	1.3	1.3	2.5	0.0	100.0
26	0.0	1.6	0.0	0.0	-1.6	98.4
27	101.6	1.5	0.0	98.5	1.6	100.0
28	111.3	0.7	27.3	83.4	0.0	100.0
29	28.8	0.7	5.7	22.4	0.0	100.0
30	12.7	0.8	3.1	8.8	0.0	100.0
31	12.7	1.6	1.7	9.5	0.0	100.0
32	20.3	0.6	3.8	15.9	0.0	100.0
33	24.6	0.7	5.5	18.4	0.0	100.0
34	42.3	0.6	6.9	34.8	0.0	100.0
35	54.2	1.3	15.0	37.9	0.0	100.0
36	43.2	1.9	10.7	30.6	0.0	100.0
37	47.4	1.0	9.7	36.7	0.0	100.0
38	30.5	0.7	3.6	26.2	0.0	100.0
39	33.0	0.8	10.2	22.0	0.0	100.0
40	5.1	0.9	1.8	2.4	0.0	100.0
41	7.6	0.7	2.3	4.7	0.0	100.0
42	7.6	0.4	2.4	4.8	0.0	100.0
43	46.6	0.5	10.2	35.9	0.0	100.0
44	41.5	0.6	12.9	28.0	0.0	100.0
45	22.9	0.9	5.9	16.0	0.0	100.0
46	82.1	0.7	22.1	59.3	0.0	100.0

47	44.9	0.8	16.4	27.7	0.0	100.0
48	25.4	0.8	8.3	16.2	0.0	100.0
49	7.6	0.5	2.6	4.5	0.0	100.0
50	0.0	0.7	0.0	0.0	-0.7	99.4
51	0.0	0.5	0.0	0.0	-0.5	98.9
52	0.0	0.4	0.0	0.0	-0.4	98.6
53	0.0	0.5	0.0	0.0	-0.5	98.0
54	16.9	1.1	3.6	10.3	2.0	100.0
55	5.1	1.3	1.0	2.8	0.0	100.0
56	5.1	0.3	1.4	3.4	0.0	100.0
57	0.0	2.0	0.0	0.0	-2.0	98.0
58	0.0	1.6	0.0	0.0	-1.6	96.4
59	7.6	0.8	2.1	1.1	3.6	100.0
60	0.0	0.7	0.0	0.0	-0.7	99.3
61	0.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	98.3
62	0.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	97.3
63	0.0	0.3	0.0	0.0	-0.3	97.0
64	5.9	0.6	1.4	0.9	3.0	100.0
65	7.6	1.2	1.8	4.6	0.0	100.0
66	8.5	1.9	1.8	4.8	0.0	100.0
67	2.5	1.6	0.7	0.2	0.0	100.0
	1377.7	80.1	353.12	944.44	0.0	

Cuadro 30 Balance hídrico (mm) durante un periodo de 67 días en pasturas nativas con árboles en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005

Día	Pp(mm)	ETR(mm)	ESC(mm)	P(mm)	Δ H(mm)	Reserva max de Agua
1	116.0			0.0	0	110.0
2	3.4	1.2	0.8	1.4	0.0	110.0
3	50.8	1.2	4.5	45.1	0.0	110.0
4	10.9	2.2	1.2	7.5	0.0	110.0
5	27.9	1.5	2.7	23.7	0.0	110.0
6	2.5	1.5	0.7	0.3	0.0	110.0
7	0.3	2.2	0.0	0.0	-2.0	108.0
8	0.0	1.3	0.0	0.0	-1.3	106.7
9	53.3	2.7	14.0	33.3	3.3	110.0
10	0.0	2.2	0.0	0.0	-2.2	107.8
11	0.0	3.2	0.0	0.0	-3.2	104.6
12	0.0	2.2	0.0	0.0	-2.2	102.4
13	0.0	0.7	0.0	0.0	-0.7	101.7
14	41.9	1.5	6.7	25.4	8.3	110.0
15	83.0	2.1	16.2	64.7	0.0	110.0
16	41.5	1.4	12.1	27.9	0.0	110.0
17	30.5	2.2	5.7	22.6	0.0	110.0
18	36.4	3.3	6.7	26.4	0.0	110.0
19	25.4	1.3	4.3	19.9	0.0	110.0
20	20.3	1.2	5.9	13.2	0.0	110.0
21	2.5	1.8	0.7	0.1	0.0	110.0
22	60.1	1.1	16.9	42.2	0.0	110.0
23	33.9	1.2	5.7	27.0	0.0	110.0
24	11.9	1.1	2.6	8.2	0.0	110.0
25	6.8	1.3	3.0	2.5	0.0	110.0
26	0.0	1.6	0.0	0.0	-1.6	108.4
27	101.6	1.5	62.2	36.2	1.6	110.0
28	111.8	0.7	63.0	48.2	0.0	110.0
29	32.2	0.7	9.6	21.9	0.0	110.0
30	16.1	0.8	5.0	10.3	0.0	110.0
31	2.5	1.6	0.8	0.1	0.0	110.0
32	22.9	0.6	7.8	14.4	0.0	110.0
33	27.9	0.7	10.5	16.8	0.0	110.0
34	40.6	0.6	12.6	27.4	0.0	110.0
35	54.2	1.3	22.8	30.1	0.0	110.0
36	37.3	1.9	9.7	25.7	0.0	110.0
37	45.7	1.0	11.2	33.6	0.0	110.0
38	28.8	0.7	4.1	24.0	0.0	110.0
39	38.1	0.8	7.1	30.2	0.0	110.0
40	5.1	0.9	1.7	2.5	0.0	110.0
41	9.3	0.7	3.0	5.7	0.0	110.0
42	10.2	0.4	2.5	7.3	0.0	110.0
43	50.8	0.5	13.3	37.0	0.0	110.0
44	46.6	0.6	9.7	36.3	0.0	110.0
45	24.6	0.9	7.1	16.5	0.0	110.0
46	85.5	0.7	13.1	71.7	0.0	110.0
47	44.9	0.8	12.6	31.5	0.0	110.0

48	20.3	0.8	3.0	16.5	0.0	110.0
49	7.6	0.5	2.6	4.5	0.0	110.0
50	0.0	0.7	0.0	0.0	-0.7	109.4
51	0.0	0.5	0.0	0.0	-0.5	108.9
52	0.0	0.4	0.0	0.0	-0.4	108.6
53	0.0	0.5	0.0	0.0	-0.5	108.0
54	22.9	1.1	6.4	13.4	2.0	110.0
55	7.6	1.3	2.1	4.2	0.0	110.0
56	5.1	0.3	1.3	3.5	0.0	110.0
57	0.0	2.0	0.0	0.0	-2.0	108.0
58	0.0	1.6	0.0	0.0	-1.6	106.4
59	7.6	0.8	1.9	1.3	3.6	110.0
60	0.0	0.7	0.0	0.0	-0.7	109.3
61	0.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	108.3
62	0.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	107.3
63	0.0	0.3	0.0	0.0	-0.3	107.0
64	6.8	0.6	1.7	1.5	3.0	110.0
65	7.6	1.2	1.7	4.7	0.0	110.0
66	7.6	1.9	1.8	3.9	0.0	110.0
67	2.5	1.6	0.8	0.1	0.0	110.0
	1475.489	80.13	423	972.32	0.0	

Cuadro 31 Balance hídrico (mm) durante un periodo de 67 días en pasturas mejoradas con árboles en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005

Día	Pp(mm)	ETR(mm)	ESC(mm)	P(mm)	ΔH (mm)	Reserva max de Agua
1	114.3	0.0	0.0	0.0	0.0	104.0
2	4.0	1.2	0.9	2.0	0.0	104.0
3	4.2	1.2	1.2	1.8	0.0	104.0
4	10.9	2.2	1.2	7.5	0.0	104.0
5	25.4	1.5	2.1	21.9	0.0	104.0
6	2.5	1.5	0.4	0.6	0.0	104.0
7	0.0	2.2	0.0	0.0	-2.2	101.8
8	0.0	1.3	0.0	0.0	-1.3	100.4
9	152.4	2.7	11.6	134.5	3.6	104.0
10	0.0	2.2	0.0	0.0	-2.2	101.8
11	0.0	3.2	0.0	0.0	-3.2	98.6
12	0.0	2.2	0.0	0.0	-2.2	96.4
13	0.0	0.7	0.0	0.0	-0.7	95.7
14	35.6	1.5	2.5	23.2	8.3	104.0
15	82.1	2.1	8.3	71.7	0.0	104.0
16	40.6	1.4	5.0	34.2	0.0	104.0
17	29.6	2.2	3.6	23.9	0.0	104.0
18	38.1	3.3	5.7	29.1	0.0	104.0
19	22.9	1.3	2.9	18.7	0.0	104.0
20	20.3	1.2	3.9	15.2	0.0	104.0
21	2.5	1.8	0.4	0.4	0.0	104.0
22	60.1	1.1	8.6	50.5	0.0	104.0
23	35.6	1.2	3.0	31.3	0.0	104.0
24	11.9	1.1	2.0	8.8	0.0	104.0
25	6.8	1.3	1.0	4.6	0.0	104.0
26	0.0	1.6	0.0	0.0	-1.6	102.4
27	101.6	1.5	28.9	69.6	1.6	104.0
28	113.0	0.7	27.3	85.1	0.0	104.0
29	38.1	0.7	4.6	32.8	0.0	104.0
30	14.4	0.8	2.4	11.2	0.0	104.0
31	2.5	1.6	0.4	0.6	0.0	104.0
32	20.3	0.6	2.9	16.8	0.0	104.0
33	27.9	0.7	3.3	24.0	0.0	104.0
34	44.9	0.6	7.6	36.6	0.0	104.0
35	55.0	1.3	6.2	47.6	0.0	104.0
36	38.9	1.9	3.6	33.5	0.0	104.0
37	47.4	1.0	8.1	38.4	0.0	104.0
38	29.6	0.7	1.7	27.3	0.0	104.0
39	38.9	0.8	3.8	34.4	0.0	104.0
40	5.1	0.9	1.2	3.0	0.0	104.0
41	9.3	0.7	1.8	6.9	0.0	104.0
42	11.9	0.4	2.0	9.4	0.0	104.0
43	54.2	0.5	5.5	48.2	0.0	104.0
44	50.0	0.6	5.5	43.9	0.0	104.0
45	27.1	0.9	4.8	21.4	0.0	104.0
46	88.9	0.7	9.7	78.4	0.0	104.0
47	47.4	0.8	8.6	38.0	0.0	104.0

48	22.9	0.8	3.4	18.6	0.0	104.0
49	7.6	0.5	1.5	5.6	0.0	104.0
50	0.0	0.7	0.0	0.0	-0.7	103.4
51	0.0	0.5	0.0	0.0	-0.5	102.9
52	0.0	0.4	0.0	0.0	-0.4	102.6
53	0.0	0.5	0.0	0.0	-0.5	102.0
54	22.9	1.1	2.1	17.7	2.0	104.0
55	6.8	1.3	1.0	4.5	0.0	104.0
56	5.1	0.3	0.4	4.4	0.0	104.0
57	0.0	2.0	0.0	0.0	-2.0	102.0
58	0.0	1.6	0.0	0.0	-1.6	100.4
59	7.6	0.8	1.2	2.1	3.6	104.0
60	0.0	0.7	0.0	0.0	-0.7	103.3
61	0.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	102.3
62	0.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	101.3
63	0.0	0.3	0.0	0.0	-0.3	101.0
64	7.6	0.6	1.1	3.0	3.0	104.0
65	5.9	1.2	0.7	4.0	0.0	104.0
66	10.2	1.9	1.4	6.8	0.0	104.0
67	4.7	1.6	0.6	2.4	0.0	104.0
	1553.3	80.1	217.2	1256.0	0.0	

Cuadro 32 Balance hídrico (mm) durante un periodo de 67 días en el bosque secundario intervenido en la subcuenca del Río Jabonal, Barranca, Costa Rica, 2005

Día	Pp(mm)	ETR(mm)	ESC(mm)	P(mm)	Δ H(mm)	Reserva max de Agua
1	116.0	0.0	0.0		0.0	109.0
2	4.9	1.2	0.0	3.7	0.0	109.0
3	6.8	1.2	0.0	5.6	0.0	109.0
4	9.3	2.2	0.4	6.7	0.0	109.0
5	37.3	1.5	1.5	34.3	0.0	109.0
6	4.7	1.5	0.3	2.9	0.0	109.0
7	1.3	2.2	0.0	0.0	-1.0	108.0
8	0.0	1.3	0.0	0.0	-1.3	106.7
9	58.4	2.7	4.9	48.6	2.3	109.0
10	0.0	2.2	0.0	0.0	-2.2	106.8
11	0.0	3.2	0.0	0.0	-3.2	103.6
12	0.0	2.2	0.0	0.0	-2.2	101.4
13	0.0	0.7	0.0	0.0	-0.7	100.7
14	50.8	1.5	3.1	37.9	8.3	109.0
15	86.4	2.1	4.7	79.5	0.0	109.0
16	40.6	1.4	3.6	35.6	0.0	109.0
17	30.5	2.2	3.5	24.9	0.0	109.0
18	40.6	3.3	3.4	33.9	0.0	109.0
19	30.5	1.3	1.4	27.8	0.0	109.0
20	15.2	1.2	1.0	13.0	0.0	109.0
21	2.5	1.8	0.2	0.6	0.0	109.0
22	63.5	1.1	4.5	57.9	0.0	109.0
23	40.6	1.2	2.1	37.3	0.0	109.0
24	7.6	1.1	0.0	6.5	0.0	109.0
25	5.9	1.3	0.0	4.7	0.0	109.0
26	0.0	1.6	0.0	0.0	-1.6	107.4
27	101.6	1.5	7.5	91.0	1.6	109.0
28	114.3	0.7	8.1	105.6	0.0	109.0
29	38.1	0.7	2.9	34.5	0.0	109.0
30	17.8	0.8	2.7	14.3	0.0	109.0
31	2.5	1.6	0.0	1.0	0.0	109.0
32	22.9	0.6	3.3	19.0	0.0	109.0
33	27.9	0.7	4.1	23.1	0.0	109.0
34	45.7	0.6	5.6	39.5	0.0	109.0
35	58.4	1.3	6.3	50.9	0.0	109.0
36	43.2	1.9	5.8	35.5	0.0	109.0
37	50.8	1.0	4.8	45.0	0.0	109.0
38	33.0	0.7	2.2	30.1	0.0	109.0
39	40.6	0.8	3.7	36.1	0.0	109.0
40	5.1	0.9	0.4	3.7	0.0	109.0
41	10.2	0.7	1.1	8.4	0.0	109.0
42	12.7	0.4	1.1	11.1	0.0	109.0
43	55.9	0.5	3.8	51.6	0.0	109.0
44	50.8	0.6	4.1	46.1	0.0	109.0
45	22.9	0.9	2.6	19.3	0.0	109.0
46	91.4	0.7	8.9	81.8	0.0	109.0
47	48.3	0.8	3.3	44.1	0.0	109.0

48	25.4	0.8	2.3	22.3	0.0	109.0
49	7.6	0.5	0.4	6.7	0.0	109.0
50	0.0	0.7	0.0	0.0	-0.7	108.4
51	0.0	0.5	0.0	0.0	-0.5	107.9
52	0.0	0.4	0.0	0.0	-0.4	107.6
53	0.0	0.5	0.0	0.0	-0.5	107.0
54	22.9	1.1	2.4	17.3	2.0	109.0
55	7.6	1.3	0.5	5.8	0.0	109.0
56	5.1	0.3	0.0	4.8	0.0	109.0
57	0.0	2.0	0.0	0.0	-2.0	107.0
58	0.0	1.6	0.0	0.0	-1.6	105.4
59	10.2	0.8	0.7	5.1	3.6	109.0
60	0.0	0.7	0.0	0.0	-0.7	108.3
61	0.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	107.3
62	0.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	106.3
63	0.0	0.3	0.0	0.0	-0.3	106.0
64	7.6	0.6	0.6	3.4	3.0	109.0
65	7.6	1.2	0.4	6.0	0.0	109.0
66	10.2	1.9	0.6	7.7	0.0	109.0
67	5.1	1.6	0.0	3.5	0.0	109.0
	1540.8	80.1	125.0	1335.6	0.0	
	1540.8	80.1	125.0	1335.6	0.0	