

**Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Agrícola**

**ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN
POTENCIAL DE EROSIÓN EN LA
MICROCUENCA MEDIA-BAJA DEL RÍO
SANTA ROSA, CENTRO DE GENERACIÓN
ARCOSA, TILARÁN, GUANACASTE**

Por:

SISGO RACHITH ACUÑA CHINCHILLA

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Junio de 2010

ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN POTENCIAL DE EROSIÓN EN LA MICROCUENCA MEDIA-BAJA DEL RÍO SANTA ROSA, CENTRO DE GENERACIÓN ARCOSA, TILARÁN, GUANACASTE

Por:

SISGO RACHITH ACUÑA CHINCHILLA

Sometido a la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad de Costa Rica como requisito parcial para optar por el grado de
LICENCIADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA

Aprobado por el Tribunal:

Dr. Georges Govaere Vicarioli
Presidente del Tribunal

Ing. José Francisco Aguilar Pereira MSc.
Director, Escuela de Ingeniería Agrícola

Ing. Henry Alfaro Chavarría MSc.
Miembro, Comité Asesor

Ing. Daniel Baudrit Ruiz MSc.
Miembro, Comité Asesor

Ing. Agr. Karla Sánchez Núñez MSc.
Lector externo
ICE

Dedicatoria

A Dios por haberme regalado la vida, las herramientas y el espíritu para salir adelante frente a las adversidades.

A mi madre Alba Iris por apoyarme sin condiciones en todos mis proyectos y haberse sacrificado tanto, con el fin de sacarnos adelante.

A mi amigo Esteban que está en el cielo.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi compañero Ing. Ronald Aguilar Álvarez por tantos momentos compartidos, su amistad y su apoyo durante todo este tiempo. Al Ing. José Fco. Aguilar Pereira por impulsarme a seguir adelante, aconsejarme y haber compartido tanto conocimiento. Al Ing. Ag. William García Arias por su confianza y toda la ayuda brindada, al Lic. Victor Montero por su interés en el proyecto y la dedicación de su tiempo, al C.S servicios Básicos de Hidrología Ing. José Roberto Rodríguez Meza, Ing. José Zúñiga Mora por su apoyo con los datos, a Marcelo Avendaño y el topógrafo Henry Fernández por su colaboración Además un agradecimiento especial a la Ing. Agr. Karla Sánchez Campos, Ing. Ag. Gustavo Sánchez Núñez, Ana Ramírez Sánchez y Graciela Villalobos Cascante de la UC ArCoSa que me dieron todo su apoyo para la consecución de este proyecto.

Agradezco a todo el personal directivo del C.G. ArCoSa que nos apoyó Ing. Edgar Villalobos Fallas, Ing. José Miguel Araya Chaves, Ing. Guillermo Guerrero, Ing. Erick Selva Herrera, Ing. Eduardo Sibaja Duarte, Ing. Ricardo Zúñiga, Ing. José William Cordero Garay, Ing. William Fernández Ramírez. También quiero agradecer a nuestros colaboradores en ArCoSa durante el proyecto Alberto Porras, Freddy Rojas, Luis Vargas, David Campos, Danny Campos, Luis Alonso , Saray Obando, José Álvarez Cruz, Gerardo Herrera, Johnny, Marco, Gilberto, Luis, Alfonso, Herman, Memo y todos los demás compañeros. Agradecimiento también para toda la gente de Tilarán que colaboró durante el proyecto, en especial a los dueños de las fincas donde se realizó.

Finalmente quiero agradecer a mi familia y a mi novia Jill que han creído en mí, mis hermanos y hermanas, a mis tíos, tías y primos por su ayuda, a Lidieth por tanto apoyo, a Maribel, a mis abuelos y al personal administrativo y docente además de estudiantes de la Escuela de Ingeniería Agrícola que compartieron este tiempo conmigo y de una u otra forma colaboraron con la realización de este proyecto.

Resumen

En diciembre de 1979 entraron en operación las primeras unidades generadoras del Centro de Producción Arenal, 20 años después de los primeros estudios realizados en la cuenca superior del río Arenal para la construcción de un proyecto hidroeléctrico. Actualmente el Centro de Generación ArCoSa cuenta con tres centros de producción que funcionan en cascada y tres embalses, Arenal en la subcuenca del río homónimo, Santa Rosa y Sandillal en la microcuenca del río Santa Rosa.

Estos dos últimos embalses han presentado problemas de sedimentación desde hace varios años, los cuales han requerido de operaciones de limpieza frecuentes. Actualmente se realiza en Sandillal un desembalse cada dos años, en 2007 se estimó un total de 1 000 000 de toneladas de sedimentos, de las cuales sólo 400 000 fueron removidas durante el desembalse.

Como apoyo a la Unidad de Cuencas ArCoSa se desarrolló el presente estudio cuyo fin es determinar el potencial erosivo de la microcuenca media-baja del río Santa Rosa. Se instalaron parcelas experimentales en usos de suelo pasto y bosque en pendientes de 0% a 45% utilizando barreras geotextil tipo “silt fence” para cuantificar la erosión. Adicionalmente se caracterizó de manera cualitativa la condición de las riberas de ríos, se relacionó el comportamiento de la energía de la precipitación y la erosión y se generó un mapa de vulnerabilidad para la microcuenca.

Se encontró que el estado general de la microcuenca baja es muy bueno, donde el 92% de su superficie presenta una tasa erosiva menor a 10 ton/ha, siendo ligeramente más alto el potencial de pérdida de suelo en bosque que en pasto. La vulnerabilidad de las riberas de los ríos se encuentra principalmente en función de su pendiente, ya que en su mayor parte muestra una buena cobertura, sin embargo se encontró cinco puntos importantes de aporte directo al cauce. La contribución principal de sedimento a los embalses, lo constituyen riberas de ríos desprotegidas por movimientos en masa y taludes de caminos con problemas de deslizamientos.

Índice general

Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Resumen.....	v
CAPÍTULO 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 Delimitación del problema.....	5
1.4.1 Descripción del problema.....	5
1.4.2 Centro de Generación ArCoSa.....	5
1.5 Limitaciones.....	8
CAPÍTULO 2. Generalidades sobre la erosión.....	9
2.1 Erosión hídrica.....	9
2.1.1 Erosividad.....	11
2.1.2 Erodabilidad.....	13
2.1.3 Efecto de la cobertura vegetal sobre el suelo.....	14
2.2 Erosión por salpicadura.....	16
2.3 Erosión en cárcavas.....	17
2.4 Medición y control de erosión hídrica utilizando geomembranas.....	18
2.5 Riberas de ríos.....	19
CAPÍTULO 3. Metodología.....	21
3.1 División de la microcuenca.....	21
3.2 Definición de los sitios de interés.....	22
3.3 Medición de erosión hídrica utilizando una metodología adecuada.....	23
3.4 Caracterización de riberas de ríos.....	26
3.5 Representación gráfica del comportamiento de lluvia y erosión, elaboración de un mapa de vulnerabilidad.....	29
CAPÍTULO 4. Resultados y análisis.....	31
4.1 Caracterización de la microcuenca del río Santa Rosa.....	31
4.2 División de la microcuenca.....	34
4.3 Definición de los sitios de interés.....	38
4.4 Caracterización temporal.....	47
4.5 Pastos.....	49
4.5.1 Caracterización.....	49
4.5.2 Parcelas con pendiente de 0% - 15%.....	52
4.5.3 Parcelas con pendiente de 15% - 30%.....	55
4.5.4 Parcelas con pendiente de 30% - 45%.....	56
4.6 Bosques.....	60
4.6.1 Caracterización.....	60
4.6.2 Parcelas con pendiente de 0% a 15%.....	61

4.6.3	Parcelas con pendiente de 15% a 30%	65
4.6.4	Parcelas con pendiente entre 30% y 45%	70
4.7	Evaluación de la erosión en cárcava	76
4.8	Descripción cualitativa del estado de las riberas	79
4.9	Mapa de vulnerabilidad generado a partir de la tasa erosiva medida	91
CAPÍTULO 5. Conclusiones y recomendaciones		94
5.1	Conclusiones	94
5.1.1	Microcuenca media - baja	94
5.1.2	Microcuenca del río Santa Rosa	95
5.2	Recomendaciones	96
5.3	Temas de estudio futuros	96
CAPÍTULO 6. Bibliografía		98

Índice de figuras

Figura 1.1.	Mapa de sectores del área de influencia del C.G. ArCoSa	6
Figura 1.2.	Esquema del sistema de generación en cascada del C.G. ArCoSa	7
Figura 2.1.	Procesos y factores que inciden en la erosión hídrica	9
Figura 4.1.	Mapa de tipos de uso del suelo (año 2005) para la microcuenca del río Santa Rosa	31
Figura 4.2.	Distribución de los porcentajes de superficie para cada tipo de uso del suelo	32
Figura 4.3.	Mapa de pendientes para la microcuenca del río Santa Rosa	33
Figura 4.4.	Distribución de los porcentajes de superficie para cada rango de pendientes	33
Figura 4.5.	Mapa de suelos para la microcuenca del río Santa Rosa	34
Figura 4.6.	Fincas dedicadas a ganadería en los alrededores de Los Ángeles de Tilarán, zona media-baja de la microcuenca	35
Figura 4.7.	Terrenos de pastoreo en las faldas del Cerro Chiripa, zona media-alta de la microcuenca	35
Figura 4.8.	Mapa de zonas de vida de Holdridge para la microcuenca del río Santa Rosa	36
Figura 4.9.	Curva hipsométrica generada para la microcuenca del río Santa Rosa	37
Figura 4.10.	División de la microcuenca del río Santa Rosa	37
Figura 4.11.	Mapa de pendientes para la microcuenca media-baja del río Santa Rosa	38
Figura 4.12.	Porcentaje de superficie de la microcuenca media baja según los rangos de pendiente evaluados	39
Figura 4.13.	Mapa de usos del suelo para el año 2005 en la microcuenca media-baja río Santa Rosa	40
Figura 4.14.	Porcentaje de superficie de la microcuenca media-baja según tipo de uso del suelo	41
Figura 4.15.	Órdenes de suelo presentes en la microcuenca media-baja	43
Figura 4.16.	Distribución de las parcelas experimentales en la microcuenca media – baja	44
Figura 4.17.	Ubicación de las estaciones pluviográficas dentro del área de influencia de la microcuenca media – baja	45
Figura 4.18.	Zonas de vida de Holdridge presentes en el área de estudio	47

Figura 4.19. Precipitación en los meses de junio a diciembre en el 2009 y promedio histórico correspondiente al mismo periodo de las estaciones meteorológicas en el área de influencia del estudio.	48
Figura 4.20. A) Cobertura del 100% con buen desarrollo, parcela P 0-15 MC1. B) Cobertura del 100% con bajo desarrollo foliar, parcela IE 0 – 15 - 2. C) Cobertura del 95% con buen desarrollo foliar, parcela MC 30-45. D) Pasto con bajo desarrollo foliar, parcela IE 0-15-1.	50
Figura 4.21. Evidentes síntomas de erosión en fincas de la microcuenca media-baja. A) Proceso de reptación. B) Curso de agua estacional sin protección alguna generando una cárcava. C) Camino interno dentro de una finca sin estructuras hidráulicas de protección que ha originado canales en el borde del camino y socavamiento de los taludes. D) Ampliación de surco formado al lado del camino.	51
Figura 4.22. Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela IE 0-15-1.	53
Figura 4.23. Resultados obtenidos en las parcelas de pasto con pendiente de 0% - 15%. ...	55
Figura 4.24. Resultados obtenidos en las parcelas de pasto con pendiente de 15% - 30%. .	56
Figura 4.25. Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela P 30-45 C1.	57
Figura 4.26. Resultados obtenidos en las parcelas de pasto con pendiente de 30% - 45%. .	58
Figura 4.27. Condiciones del bosque tropical seco ubicado en propiedad ICE, cerca del embalse Sandillal.	60
Figura 4.28. Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela PA 0-15.	61
Figura 4.29. Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela PS 0-15-3.	63
Figura 4.30. Pérdida total de suelo en las parcelas experimentales de bosque en pendiente de 0% -15%.	64
Figura 4.31. Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía acumulada de la lluvia para la parcela PA 15-30.	65
Figura 4.32. Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela PS 15-30-2.	67
Figura 4.33. Erosión por salpicadura presentada en la geomembrana de la parcela experimental PS 15-30-2.	68
Figura 4.34. Pérdida total de suelo en las parcelas experimentales de bosque en pendiente de 15% -30%.	69
Figura 4.35. Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela PS 30-45-1.	70
Figura 4.36. Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela PS 30-45-2.	71
Figura 4.37. Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela PS 30-45-3.	73
Figura 4.38. Pérdida total de suelo en las parcelas experimentales de bosque en pendiente de 30% -45% de la microcuenca media-baja.	74
Figura 4.39. Parcela experimental IE ESTU. A, B) Vista de la parcela experimental donde se aprecia la formación de la cárcava. C) Acción de la geomembrana, retención del suelo erosionado en la cárcava. D) Geomembrana limpia para la cuantificación de nuevo material erosionado.	76

Figura 4.40. Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela IE ESTU.....	77
Figura 4.41. Tipos de uso de suelo en la zona de amortiguamiento de cuerpos de agua de la microcuenca del río Santa Rosa.....	79
Figura 4.42. Pendiente presentada en la zona de amortiguamiento de cuerpos de agua de la microcuenca del río Santa Rosa.....	81
Figura 4.43. Ubicación de sitios de riesgo en las riberas de los cursos de agua en la microcuenca del río Santa Rosa.....	82
Figura 4.44. Estado de la ribera y el cauce de quebrada Grande en la zona del puente que comunica la comunidad del mismo nombre con Tilarán, Marzo 2009.	83
Figura 4.45. Movimiento en masa, con gran cantidad de suelo expuesto, sobre el cauce principal del río Santa Rosa, unos 300 m aguas arriba de la confluencia con quebrada Grande.	85
Figura 4.46. Zona inestable, con riesgo de movimiento en masa en la ribera de quebrada Quesera aledaña al puente de la ruta Tilarán –Líbano.....	86
Figura 4.47. Deslizamiento presentado cerca del cauce de la quebrada Chiquiro en su margen derecho.....	87
Figura 4.48. Ubicación de algunos sitios con acumulación importante de material en los cauces de cursos de agua principales en la microcuenca del río Santa Rosa.	89
Figura 4.49. Banco de arena y sedimentos retenidos por los troncos depositados sobre el cauce de quebrada Grande, en las cercanías del puente sobre la ruta Tilarán – Quebrada Grande, Octubre, 2009.	90
Figura 4.50. Troncos, arena y piedras, acumulados en el cauce de quebrada Grande aguas arriba de su confluencia con el río Santa Rosa.....	90
Figura 4.51. Troncos de gran tamaño, dejados durante el invierno anterior en la confluencia del río Santa Rosa y quebrada Grande.....	91
Figura 4.52. Mapa de vulnerabilidad generado para la microcuenca del río Santa Rosa.....	92

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Capacidad generadora de las plantas hidroeléctricas y eólica del Centro de Generación ArCoSa.....	8
Tabla 2.1. Clasificación de la erosión según el criterio de la FAO.....	10
Tabla 2.2. Escorrentía (%) y erosión (ton/ha/3 años) medidas en parcelas de erosión ubicadas en el CATIE, Turrialba, Costa Rica entre 1948-1950.....	16
Tabla 3.1. Promedios anuales históricos de precipitación para las estaciones en el área de influencia de la microcuenca del río Santa Rosa.....	22
Tabla 4.1. Combinaciones de uso del suelo y pendientes seleccionadas para el estudio.....	41
Tabla 4.2. Características generales de las parcelas establecidas.....	46
Tabla 4.3. Características generales de las parcelas de pasto ubicadas en la cuenca media baja.....	50
Tabla 4.4. Valores totales encontrados para las parcelas de pasto en la microcuenca media-baja.....	59
Tabla 4.5. Valores totales encontrados para las parcelas de bosque en la microcuenca media-baja.....	75

Índice de anexos

Anexo A. Comparación entre los promedios históricos de precipitación mensual y los presentados durante el periodo Jun-Dic, 2009.....	101
Anexo B. Datos de energía de la precipitación y factor de erosividad R para las estaciones de la zona de influencia de la microcuenca media baja.....	104
Anexo C. Propiedades físicas de la geomembrana.....	105
Anexo D. Datos obtenidos para la generación de gráficas de energía y sedimentos en las parcelas experimentales.....	106
Anexo E. Zonas de protección de las riberas en la microcuenca del río Santa Rosa.....	111
Anexo F. Problemas ocasionados por material de origen vegetal en las estructuras hidráulicas del C.G. ArCoSa.....	113
Anexo G. Variación porcentual de la energía y la masa de sedimento seco recolectado en la geomembrana de las parcelas experimentales a lo largo del periodo de prueba.....	114
Anexo H. Recomendaciones de técnicas de conservación para riberas de ríos.....	119
Anexo I. Vegetación recomendada o sugerida para el control de la erosión en Centroamérica (tomado de Porras Murillo, 2000).....	132

CAPÍTULO 1. Introducción

El presente documento del proyecto de investigación forma parte de un trabajo conjunto con el Ing. Ronald Aguilar Álvarez desarrollado a solicitud de la Unidad de Cuencas del Centro de Generación ArCoSa (ICE) con el fin de evaluar el potencial erosivo de la microcuenca del río Santa Rosa ubicada en los cantones de Tilarán y Cañas de la provincia de Guanacaste, la cual es muy importante para dicho Centro de Generación, debido a que aporta sus aguas a dos embalses de los centros de producción Miguel Pablo Dengo B. y Sandillal.

Debido a la amplitud del tema y la problemática, además de la extensión superficial de la microcuenca y sus diferencias, el trabajo de campo se realizó de forma coordinada y con apoyo mutuo, sin embargo el análisis de la información y los informes de investigación se generaron por separado. De esta forma, la tesis del Ing. Aguilar “Evaluación de la producción potencial de erosión en la microcuenca media-alta del río Santa Rosa, Tilarán, Guanacaste” y este informe son documentos complementarios para el análisis de la microcuenca del río Santa Rosa.

Para una adecuada comprensión y contextualización el documento contiene un capítulo de generalidades acerca de la erosión, con un abordaje breve de los principales aspectos de este fenómeno. Posteriormente se presenta la metodología utilizada para llevar a cabo cada uno de sus objetivos específicos. En el capítulo de resultados y su análisis, se pasa de las consideraciones de la microcuenca media-baja a las obtenidas para la totalidad de la microcuenca. Finalmente se muestra el capítulo de conclusiones y recomendaciones, siguiendo la misma línea que los resultados; e incluye un apartado de conclusiones generadas conjuntamente para toda la microcuenca del río Santa Rosa.

Los resultados encontrados servirán a la Unidad de cuencas del C. G. ArCoSa para definir zonas prioritarias y orientar esfuerzos en el manejo adecuado de la microcuenca, con el fin de reducir desde su origen, la cantidad de material que afecta a los embalses Santa Rosa y Sandillal. Las conclusiones y recomendaciones se usarán como información base para las medidas correctivas y de mitigación en los puntos más vulnerables de la zona de estudio.

1.1 Antecedentes

Desde hace varios años existe una sinergia entre la Unidad de Manejo de Cuencas (UMC) dentro del Centro de Servicio Gestión Ambiental (CSGA) de la UEN Proyectos y Servicios Asociados (PySA) – ICE y la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica. Se han llevado a cabo varios trabajos conjuntos referentes a medición de sedimentos y escorrentía, aplicando entre otras metodologías la del Silt-Fence y el simulador de lluvia en la microcuenca Plantón Pacayas.

Continuando con esa línea de cooperación mutua se realiza el contacto de la Unidad de Cuencas del Centro de Generación ArCoSa a través del Lic. Víctor Montero ya que existe la necesidad y el interés por realizar un estudio en producción de sedimentos. Se establece una reunión con la coordinadora de la UC ArCoSa Ing. Ag. Karla Sánchez Campos, el en cargado del área agropecuaria Ing. Ag. Gustavo Núñez Sánchez y la encargada del área de biología Biol. Ana Rocío Ramírez Sánchez. Durante la misma se discute la necesidad de realizar el estudio y se acuerda realizar una gira de reconocimiento para evaluar las condiciones de la microcuenca del río Santa Rosa.

Según lo visto en la gira realizada en marzo de 2009 con el Ing. Ag. Gustavo Núñez, la zona es explotada en cultivos de pasto para ganado de engorde y producción de leche en un gran porcentaje de la microcuenca del Río Santa Rosa. Por otro lado se evidenció que algunos caminos rurales y riberas de cauces naturales presentan mucha inestabilidad en sus taludes. Estas áreas tienen un potencial a ser erosionadas y por tanto ser contribuyentes de sedimentos a los cauces de los ríos, dándose una reducción de la capacidad de almacenamiento de agua de los embalses para la generación hidroeléctrica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Calcular y analizar la producción potencial de erosión mediante el establecimiento de parcelas de investigación y puntos de descripción cualitativa de riberas, en zonas de interés de la microcuenca del Río Santa Rosa que afectará directamente los embalses Santa Rosa y Sandillal, cantones de Tilarán y Cañas, provincia de Guanacaste.

1.2.2 Objetivos específicos

- Definir los sitios de interés para establecer parcelas de medición de pérdida de suelo en una escala de trabajo apropiada para el área de la microcuenca del río Santa Rosa
- Medir la erosión hídrica en las parcelas experimentales utilizando una metodología ajustada de acuerdo a las necesidades de escala de trabajo
- Cuantificar la producción de sedimentos en un terreno degradado a fase inicial de cárcava
- Representar gráficamente el comportamiento de la lluvia y la erosión durante el ciclo de prueba y generar un mapa de vulnerabilidad.
- Describir cualitativamente el estado de las riberas de los afluentes del río Santa Rosa como fuente probable de aporte directo de sedimentos y caracterizar el material susceptible a ser arrastrado.

1.3 Justificación

En Costa Rica alrededor de un 70% de la energía se genera a partir de plantas hidroeléctricas. El ICE es el principal ente generador nacional con gran cantidad de proyectos y embalses a lo largo del país. La buena salud de la cuenca hidrográfica que abastece a un embalse, permitirá un mejor aprovechamiento del recurso hídrico que contiene y prolongará su vida útil.

Uno de los factores que influye en la vida útil de un embalse, cualquiera que sea su fin, es la colmatación del mismo debido al arrastre y acumulación de sedimentos transportados por las quebradas y ríos que lo alimentan, situación agravada por el uso inadecuado del suelo en ciertos casos, con su consecuente reducción de capacidad de almacenamiento. Por tal motivo, la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica (E.I.A.) en conjunto con la Unidad de Manejo de Cuencas del Centro de Generación ArcoSa (UC ArCoSa) se lleva a cabo estudios de investigación de medición de pérdidas de suelo y transporte de sedimentos en zonas representativas de la microcuenca del Río Santa Rosa, que afecta directamente a los centros de producción Miguel Pablo Dengo B. (Corobicí) y Sandillal.

La estimación de la cantidad y características potenciales del material que llegarán por desprendimiento y arrastre a los embalses Santa Rosa y Sandillal, donde se encuentran las tomas de agua de las plantas Corobicí y Sandillal respectivamente, permitirá definir las áreas más vulnerables de la microcuenca, donde se deba implementar obras que disminuyan o controlen los procesos erosivos en la zona, como lo son la creación de áreas de contención destinadas a actividades de reforestación, obras de bioingeniería, gestión de fincas implementando buenas prácticas de manejo (BMP's), protección de taludes y restauración de riberas en los cursos de agua.

1.4 Delimitación del problema

1.4.1 Descripción del problema

Hasta la fecha no existen estudios de potencial erosivo y transporte de sedimentos dentro del área de influencia del Centro de Generación ArCoSa a una escala de trabajo que logre definir criterios para implementar medidas de mitigación a nivel de microcuenca.

Tales condiciones hacen necesario el estudio de las cantidades de material que se van a producir en la microcuenca y que posteriormente se sedimentarán en el embalse, identificando los focos de producción. Tener claro los puntos más vulnerables a los procesos erosivos dentro de la microcuenca, permitirá tener la noción de la importancia de implementar obras y medidas que mitiguen los procesos erosivos en la zona.

Un factor más que acentúa el problema lo representa el hecho de que el ICE debe realizar periódicamente desembalses en Santa Rosa y Sandillal, con sus consecuentes pérdidas económicas en cuanto a la disminución de generación eléctrica y los gastos de la extracción de los sedimentos.

Cabe destacar que los desembalses de Sandillal se realizan cada dos años y en ellos interviene un protocolo muy elaborado, con el fin de afectar de manera mínima las comunidades aguas abajo, la fauna acuática de la cuenca baja del río Magdalena, Corobicí y Bebedero y el sistema de canales de riego del SENARA, que se abastece en gran parte del agua que sale del Centro de Producción Sandillal. Para el año 2009 se realizó un nuevo desembalse, donde se contó por parte de la dirección del Centro de Generación ArCoSa con los primeros resultados de este estudio. Durante el desembalse de 2007 la cantidad de sedimentos estimada fue de un millón de toneladas métricas, de las cuales sólo se pudo extraer 400 000 toneladas.

1.4.2 Centro de Generación ArCoSa

El Centro de Generación ArCoSa (C.G. ArCoSa) está integrado por el complejo hidroeléctrico que conforman los centros de producción Arenal, Miguel Pablo Dengo B. (Corobicí) y Sandillal, además del parque eólico Tejona. Se ubica en Tilarán, Guanacaste,

dentro de su área de influencia se localizan sectores de los cantones de Guatuso, San Carlos, San Ramón, Cañas y Tilarán. La Figura 1.1 muestra su ubicación geográfica.

Este complejo hidroeléctrico funciona con un sistema de aprovechamiento en cascada, cuyo esquema se presenta en la Figura 1.2. Se utiliza el agua del embalse Arenal, el cual tiene un área de 87,8 km², almacena 2 416 millones de m³ de agua y alcanza un nivel máximo de 546 m.s.n.m. El embalse Santa Rosa, que se abastece del río homónimo, se encuentra ubicado contiguo a planta Arenal, tiene un volumen de 143 670 m³ y permite la operación coordinada de las plantas Arenal y Corobicí. Además la planta hidroeléctrica Sandillal se abastece del río Santa Rosa y del embalse Sandillal. Dicho embalse abarca 71 ha, tiene un volumen de 6,3 hm³ y su elevación máxima es de 93 m.s.n.m. (ICE, 2006).

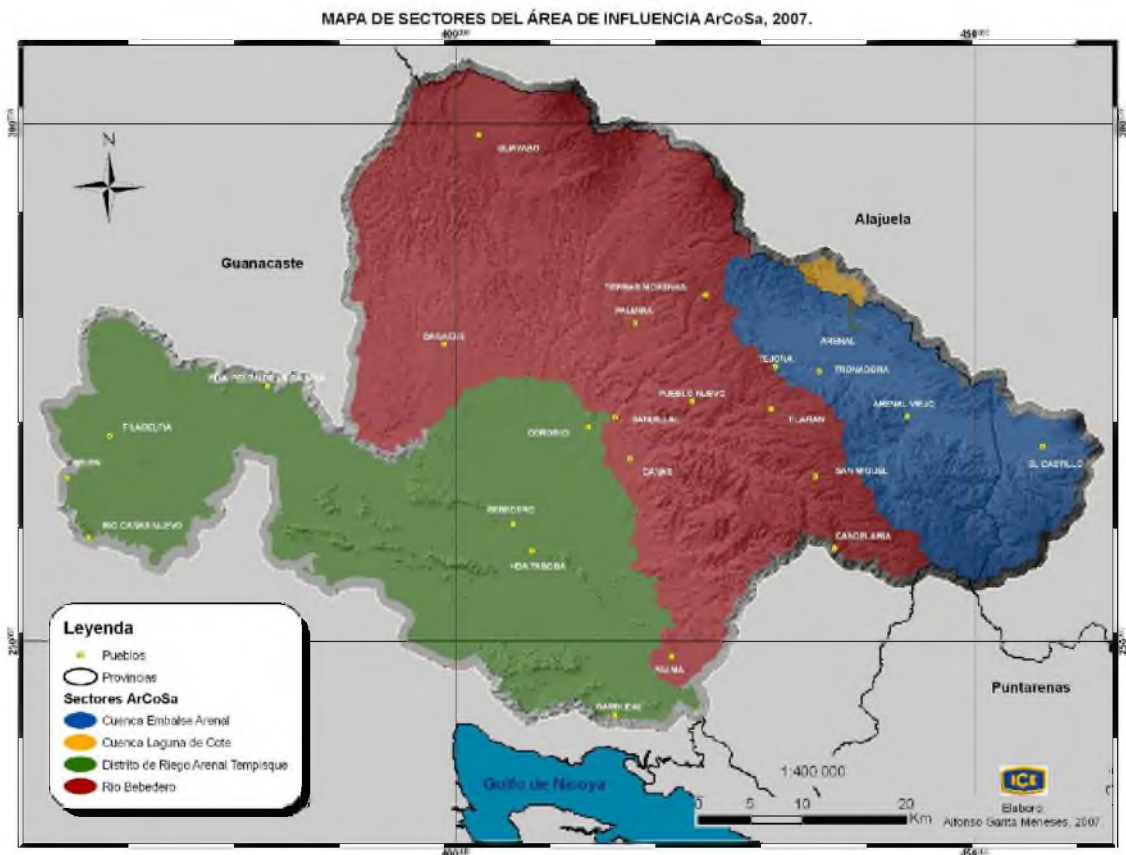


Figura 1.1. Mapa de sectores del área de influencia del C.G. ArCoSa.

Fuente: Alfonso Garita, Departamento de SIG, ICE.

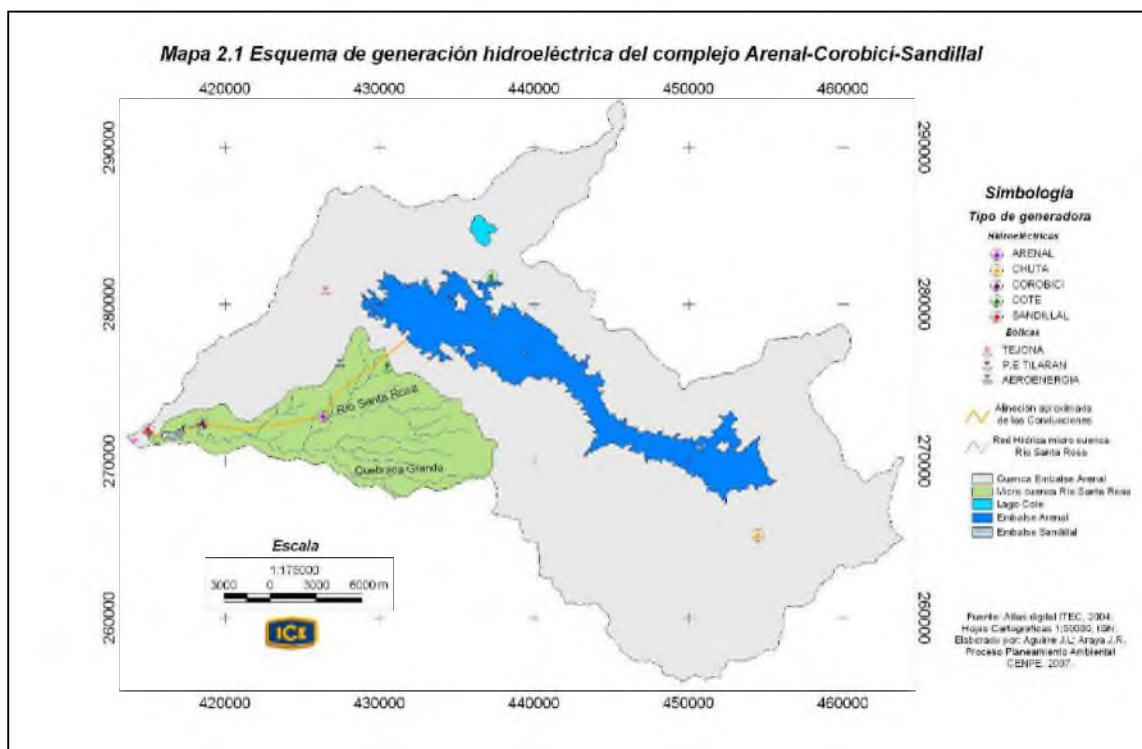


Figura 1.2. Esquema del sistema de generación en cascada del C.G. ArCoSa.

Fuente: Aguirre y Araya.

Complementa el complejo el Distrito de riego Arenal – Tempisque, que tiene su origen en la presa Miguel Pablo Dengo B. cuyo vertedero de excedencias está diseñado para un caudal de 2 570 m³/s. A partir de ella salen dos canales, uno hacia el sur y otro hacia el oeste con caudales de 30 m³/s cada uno. Estos canales irrigan una zona agrícola y ganadera de alrededor de 60 000 Ha en la provincia de Guanacaste (ICE, 2006). La generación de este centro representa alrededor de un 24% de la capacidad instalada que posee el país (Aguirre y Araya, 2007). La potencia nominal de cada una de las plantas se detalla en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Capacidad generadora de las plantas hidroeléctricas y eólica del Centro de Generación ArCoSa.

Fuente: ICE, 2006

Nombre	Capacidad (Kw)
Arenal	157 398
Miguel Pablo Dengo B.	174 012
Sandillal	32 000
Tejona	20 000

La Unidad de Cuencas del C.G. ArCoSa (UC ArCoSa) se constituyó en el mes de marzo de 2007. Su objetivo principal es realizar un diagnóstico ambiental y social de las cuencas dentro de la zona de influencia del centro, para definir las actividades requeridas en un plan de acción de manejo integrado por parte de la institución, como un usuario más de las mismas.

1.5 Limitaciones

La demora de la entrega de los datos de precipitación dificultó el análisis de la relación entre la energía producida y su influencia sobre los procesos erosivos. Esto impidió que se pudiese ajustar la metodología a las condiciones presentes.

Se aplazó la instalación de las membranas por atrasos durante el proceso de compra de materiales y equipo, lo cual redujo el periodo de prueba e impidió evaluar el potencial erosivo que presentan las primeras precipitaciones de la época lluviosa.

La tasa erosiva encontrada difiere de la correspondiente a la de un año promedio debido a la disminución en las precipitaciones generada por el fenómeno del Niño.

CAPÍTULO 2. Generalidades sobre la erosión

2.1 Erosión hídrica

Los procesos erosivos han sido parte de los mecanismos naturales de desarrollo y modelación de la superficie terrestre desde épocas remotas. No obstante, en la actualidad las alteraciones provocadas por el hombre sobre la cobertura y estructura del suelo han derivado en que la erosión se convierta en un problema severo.

La erosión hídrica se puede definir como la pérdida o el desgaste de la porción superficial del suelo debido a la acción del agua (Kirkby, 1984). En este fenómeno interviene gran cantidad de procesos que se muestran en la Figura 2.1.

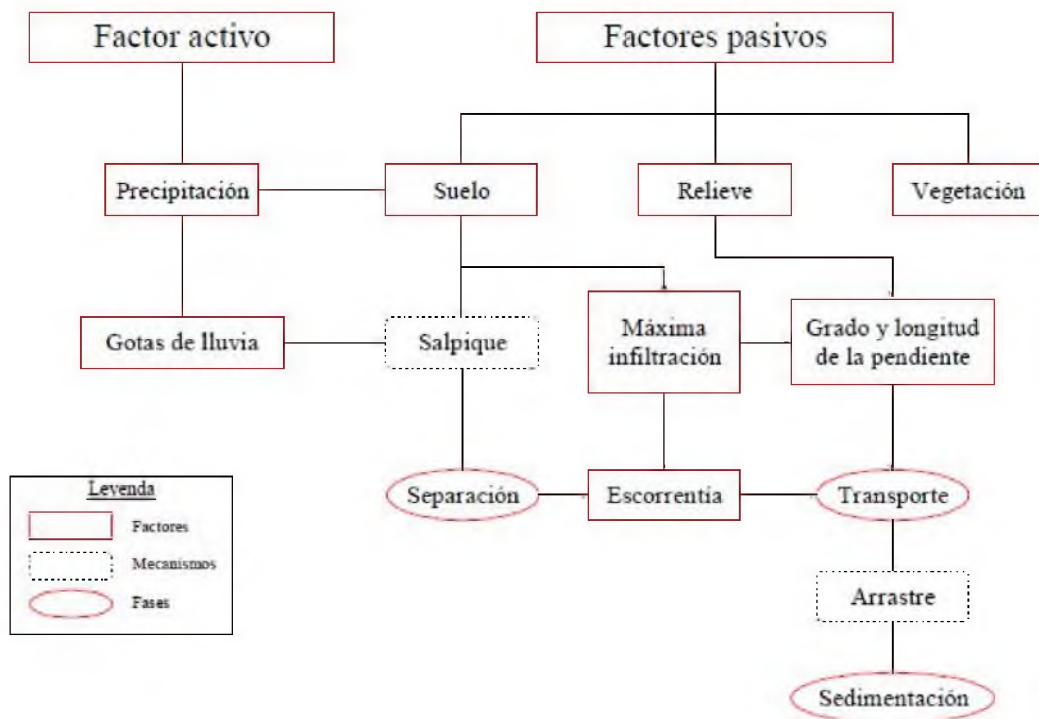


Figura 2.1. Procesos y factores que inciden en la erosión hídrica.

Fuente: Colotti, 2004.

Entre los factores físicos que afectan el proceso erosivo se pueden mencionar el clima principalmente representado por la precipitación, la topografía como función de la longitud y porcentaje de la pendiente del terreno, el suelo en cuanto a propiedades físicas y químicas, la cobertura vegetal sobre el suelo y además del uso y manejo que se le da al mismo.

Existen varios síntomas que indican la gravedad de la erosión, como pérdidas de suelo en cárcavas, pedestales, raíces expuestas, movimientos de reptación, entre otros. Generalmente se determina la pérdida de suelo en mm/año considerando el espesor del perfil A del suelo o ton/ha/año analizando la superficie total del área afectada. Para esta última denominación la Organización Mundial de la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) desarrolló un criterio de clasificación de la erosión en cuatro rangos, que se muestra en la Tabla 2.1 citado por Marchamalo 2004.

Tabla 2.1. Clasificación de la erosión según el criterio de la FAO.

Fuente. FAO.

A (ton/ha/año)	Clase de erosión
< 10	Erosión baja
10 - 50	Erosión moderada
50 - 200	Erosión severa
> 200	Erosión muy severa

La pérdida de suelo por erosión hídrica es un fenómeno variable espacial y temporalmente. En primer lugar las condiciones del suelo y su cobertura son muy distintos de un lugar a otro, además la lluvia se distribuye sobre el terreno de manera aleatoria. Para el segundo caso se encuentra que existen fenómenos climáticos que modifican la precipitación a lo largo del tiempo, el uso y cobertura es dinámico y el proceso de erosión se caracteriza por distintas fases secuenciales, las cuales pueden desarrollarse de manera simultánea. (Ureña, 1999)

Estas fases de la erosión hídrica superficial están conformadas por el desprendimiento o disgregación del suelo en partículas por acción del impacto de la gota de lluvia y su posterior transporte por escorrentía superficial o salpicadura. Como fase final del fenómeno de erosión está el proceso de sedimentación que consiste en la deposición de la carga de sedimentos debido a la disminución de la capacidad de transporte del agua o un exceso de concentración de partículas en suspensión. Las variaciones en la capacidad de transporte se dan como consecuencia de cambios en las características del flujo como caudal, velocidad, régimen, entre otros.

La repetición cíclica de estos procesos de erosión y sedimentación son los fenómenos más importantes que se desarrollan en un embalse. En el momento en que se establece la presa y el embalse, se da un cambio de un régimen de arrastre a un régimen de sedimentación en el propio vaso. Esto crea a veces graves problemas debido a que la colmatación que se produce tras esta sedimentación puede rellenar el embalse. (López, 2003)

Entre los costos económicos que genera esta sedimentación dentro de un embalse se encuentran la pérdida por concepto de paralización de la generación eléctrica, los gastos de remoción de sedimentos, disminución del área irrigable, costos adicionales en la purificación del agua potable y disminución de ingresos por conceptos de utilización recreativa (Gunatilake y Gopalakrishnan, 1999). En el caso particular del embalse Sandillal, las pérdidas corresponden al corte en la generación durante los tres o cuatro días que comprende el proceso de desembalse e interrupción del transporte de agua para el distrito de riego Arenal – Tempisque durante ese lapso. En el embalse Santa Rosa los gastos principales son los de la recolección y transporte del material acumulado.

2.1.1 Erosividad

La erosividad es una característica de la lluvia. Se refiere a la capacidad potencial que tiene ésta para generar una pérdida de suelo. Esta capacidad está relacionada con dos procesos: el desprendimiento del suelo producido por la energía de las gotas de lluvia al impactar su capa superficial y el aporte de la precipitación a la escorrentía superficial con su consecuente capacidad de arrastre.

Comúnmente la intensidad de la lluvia se considera su característica más importante. Sin embargo existen otros factores como duración y energía total que deben ser tomados en cuenta para relacionar la precipitación con la pérdida del suelo.

El comportamiento de la pérdida de suelo entre la primera lluvia y las siguientes dentro de una serie de tormentas, es variable, en especial cuando entre tormentas erosivas se dan procesos de meteorización o precipitación ligera que desprenden la capa superficial. La mayor parte de este material es removido por la primera escorrentía, quedando poco para ser transportado por las siguientes precipitaciones. (Morgan, 1997)

La característica más influyente sobre la erosividad de la precipitación es su energía, que está en función del tamaño, masa y velocidad terminal de las gotas de lluvia. Estudios realizados han demostrado que el tamaño de la gota está relacionado con la intensidad de la lluvia generalmente aumentando conforme aumenta la misma.

Existe gran cantidad de fórmulas desarrolladas para calcular la energía cinética de la lluvia, entre las que se destaca la obtenida por Wischmeier y Smith en 1958 basados en las trabajos publicados por Laws y Parson (1943). Esta fórmula es la utilizada para el cálculo del factor de erosividad de la lluvia R para la Universal Soil Loss Equation (USLE).

$$E_C = 1,213 + 0,890 \log_{10}(I) \quad (2.1-1)$$

Para totalizar la energía cinética de una tormenta en $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ se analizan sus registros dividiendo la lluvia en pequeños lapsos de intensidad uniforme. (Kirkby, Morgan, 1980) Se acumula la energía cinética para cada periodo con la fórmula anterior y posteriormente se multiplica por la cantidad de lluvia o altura de precipitación registrada para ese lapso. La suma de estos valores de energía cinética proporciona la energía cinética total para la tormenta.

$$E_T = \sum E_C * h \quad (2.1-2)$$

En el ICE la energía de la lluvia se calcula mediante un software llamado “Lluvias erosivas” que utiliza el Centro de Servicios Estudios Básicos de Hidrología. Esta aplicación permite escoger, a partir del registro de precipitación de las estaciones automáticas (o de la digitalización de las bandas de registro), las tormentas con capacidad erosiva. El criterio que se utiliza para definir el evento como erosivo es que exista una precipitación acumulada

total de al menos 13 mm y si se encuentran distanciadas por un lapso de 360 minutos. Los registros de lluvia se consideran instantáneos, incluso para eventos muy intensos se tiene un dato para cada minuto. (Gómez, 2002)

2.1.2 Erodabilidad

Representa la vulnerabilidad que posee el suelo a ser erosionado. Está en función de distintos aspectos físicos como textura, estructura, compactación, entre otros y es particular para cada tipo de suelo. Esto quiere decir que dos suelos diferentes sufren desiguales tasas de pérdida mientras los demás factores permanecen inalterados.

Acerca del papel de la textura del suelo, las partículas más grandes son más resistentes al transporte debido a que se requiere mayor fuerza para su arrastre, además las partículas finas son resistentes al efecto del desprendimiento por su cohesión. De esta manera las partículas menos resistentes a la erosión son los limos y las arenas finas.

Desde la perspectiva de la estructura los suelos con esta característica de tipo grueso, fuerte y masivo tienen mayor resistencia a la energía del impacto de la gota de lluvia y al arrastre de sus partículas por escorrentía. Los suelos estructurados de manera granular o suelta son más vulnerables a los procesos erosivos. Cabe destacar que la materia orgánica ejerce un importante papel en la resistencia del suelo, debido a su gran capacidad de absorción y retención de agua, sumado a su colaboración a los procesos de formación de agregados estables que mejoran la permeabilidad y porosidad del suelo. (Cubero, 1996)

Como medida de la cohesión y compactación del suelo está la resistencia a los esfuerzos cortantes producidos por el movimiento de fluidos o cargas mecánicas, derivada de la fricción que presentan las partículas constituyentes del suelo, de la absorción de las tensiones o esfuerzos por los contactos sólido – sólido entre partículas y de las fuerzas de tensión superficial del agua. La resistencia al esfuerzo cortante disminuye al aumentar la humedad del suelo. Con un contenido de humedad bajo el suelo se comporta como sólido y se fractura como reacción a un esfuerzo, sin embargo al aumentar el contenido de humedad se vuelve más plástico y se deforma sin romperse. Si se humedece más, se comportará como un líquido y fluirá por su propio peso. (Morgan, 1997)

2.1.3 Efecto de la cobertura vegetal sobre el suelo

En general, el efecto de la vegetación y sus restos en la defensa del suelo contra la erosión hídrica se genera por:

- La disminución de la energía del impacto de las gotas de lluvia
- La interrupción y disminución de la escorrentía formando obstáculos para agua superficial que dan rugosidad y reducen la velocidad del flujo.
- Aumento del contenido de materia orgánica en el suelo, por descomposición de sus restos
- Efecto de retención del suelo realizado principalmente por su sistema radicular
- Aumento de la porosidad y mejoramiento de la estructura del suelo por penetración, crecimiento y posterior descomposición de las raíces.

La cobertura vegetal con una densidad apropiada constituye la mejor protección natural del suelo contra la erosión hídrica, pues disminuye en gran cantidad el impacto de las gotas de lluvia mediante el proceso de intercepción que absorbe su energía. (Gutiérrez, 1987)

Su eficacia para lograr este propósito depende principalmente de la altura, continuidad y densidad de cobertura sobre el suelo. La altura es importante ya que las gotas que caen desde alturas mayores a los siete m pueden alcanzar más del 90% de su velocidad terminal. Incluso, a nivel del dosel, las gotas de lluvia interceptadas por las hojas pueden juntarse aumentando de tamaño, con el consiguiente incremento en su erosividad. Se ha encontrado que el diámetro medio de las gotas concentradas que caen desde las hojas en lo alto de los árboles va desde 4,50 a 9,00 mm, alrededor del doble del tamaño de las gotas de lluvia. (Morgan, 1997)

Primordialmente, el papel que juega la vegetación y especialmente los bosques sobre la escorrentía es modificar la forma en que ésta llega a los cuerpos de agua, disipando de manera importante la energía del flujo superficial y aumentando al aporte a las aguas

subterráneas. El efecto de la cobertura herbácea sobre la rugosidad de la superficie del suelo varía dependiendo del tipo y densidad de las plantas, además de la relación de su altura con la profundidad del flujo superficial, siendo mayormente efectiva para escorrentía superficial de poca profundidad.

Un estudio conducido por Cervantes y Vahrson (1992) para pérdida de nutrimentos en el suelo mediante medición de escorrentía y erosión encontraron los mayores volúmenes de escorrentía para las parcelas ubicadas en pasto, comparadas con la cobertura de café con sombra y sin sombra. La investigación se desarrolló en suelos alfisoles, con textura d entre franco arcilloso y arcilloso en el sector de Puriscal.

Cuando el porcentaje de cobertura vegetal sobre el suelo es amplio, desempeña un papel importante en la disminución de los procesos erosivos. La protección más efectiva la brinda la cubierta forestal, pero una cobertura densa de pastos puede tener un efecto similar, con la ventaja de que su establecimiento es más rápido.

Apolo Berrú, (1980) desarrollo un estudio similar en la Suiza de Turrialba sobre un suelo Ultisol durante un periodo de prueba de seis meses. Utilizó nueve parcelas experimentales con pendientes entre 42% y 51% bajo tres tratamientos de cobertura: pasto, pasto con árboles de poró en baja densidad y pasto con árboles de laurel con densidad moderada. Se encontró que el porcentaje de escorrentía promedio fue del 7,4%, presentando mucha variabilidad entre tratamientos y repeticiones, además se determinó una tasa erosiva de 1,9 ton/ha en promedio.

Durante un estudio de escorrentía y erosión, Ives (1951) citado por Marchamalo, 2004, se realizó en Turrialba sobre suelo Ultisol evolucionado de andisoles, mostró que los terrenos con cobertura de hierba en pendientes entre 16% y 45% no se produjo erosión perceptible durante un periodo de prueba de tres años. Los resultados se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Escorrentía (%) y erosión (ton/ha/3 años) medidas en parcelas de erosión ubicadas en el CATIE, Turrialba, Costa Rica entre 1948-1950.

Fuente: Marchamalo, 2004 pp 132.

Uso del suelo	Escorrentía (%)	Erosión (ton/ha/3 años)
Suelo desnudo en pendiente del 16%	0,04	0,24
Hierba en pendiente del 16%	0,05	0,00
Rotación de cultivos en pendiente del 16%	0,06	1,23
Suelo desnudo en pendiente de 45%	0,20	18,79
Hierba en pendiente del 45%	0,09	0,00
Rotación de cultivos en pendiente del 45%	0,28	10,32
Caña en pendiente de 45%	0,13	0,00

Prado (2009) llevó a cabo un estudio para desarrollar una metodología de cuantificación de la erosión en suelos bajo coberturas de cultivos anuales y pastos en la zona de Pacayas, Cartago. Para periodos de registro de datos de cuatro meses de duración a lo largo del ciclo productivo de cultivos anuales como papa, coliflor y repollo se encontraron valores de erosión entre 16 kg/3 meses y 66 kg/3 meses por parcela experimental, para las parcelas ubicadas en pasto no se registró erosión durante ningún periodo de estudio.

2.2 Erosión por salpicadura

La salpicadura constituye el factor más importante en el desprendimiento del suelo. El efecto de la energía de la gota de lluvia al impactar la capa superficial del suelo disgrega

las partículas, las cuales pueden ser desplazadas a varios centímetros de distancia hacia cualquier dirección.

El suelo puede reaccionar de diferentes maneras al impacto de las gotas de agua contra su superficie, dependiendo de su contenido de humedad y su estructura, además de la intensidad de la lluvia y duración de la lluvia.

En el caso de que el suelo se encuentre seco y la intensidad de lluvia sea fuerte, los agregados se rompen rápidamente al hidratarse. La capacidad de infiltración se reduce de manera acelerada y el efecto en superficies muy lisas es la rápida aparición de la escorrentía. Si las partículas de suelo se encuentran parcialmente húmedas al inicio de la tormenta o si la intensidad de ésta es baja, se producen microrrupturas y los agregados se separan en partículas más pequeñas. La superficie del suelo sufre una disminución en su rugosidad, sin embargo, la infiltración no sufre un cambio importante, debido a la porosidad que permanece entre los microagregados. Si el suelo se encuentra saturado, la dinámica entre escorrentía e infiltración depende de la capacidad hidráulica, aunque se requiere de precipitaciones fuertes y prolongadas para sellar la superficie. (Morgan, 1997)

Algunas evidencias de erosión mencionadas anteriormente y encontradas en la microcuenca del río Santa Rosa, como formación de pedestales bajo objetos protectores y exposición progresiva de raíces de árboles son prueba de que se puede presentar una pérdida de suelo importante mediante la salpicadura sin necesidad de que exista flujo superficial.

2.3 Erosión en cárcavas

Debido a que la superficie del suelo presenta muchas irregularidades y obstáculos la escorrentía superficial no desciende sobre la pendiente como una capa uniforme de agua, sino que tiende a concentrarse en las depresiones lo que posteriormente conduce a la formación de surcos.

La paulatina ampliación de estos surcos o la unión de varios de ellos conduce a la formación de una cárcava donde se da una gran concentración del flujo superficial generalmente también con altas velocidades. La pérdida de suelo se acelera debido a que

sumado al arrastre de la capa del fondo, también se tiene el continuo desgaste y socavación de las paredes de la cárcava, con lo que se da un aumento en la cantidad de material que llega hasta los cursos de agua.

La mayoría de los factores que inciden en la formación de cárcavas están asociados con prácticas inadecuadas de manejo del suelo como el sobrepastoreo, concentración de aguas descontroladas, cambio en el uso del suelo, desprotección de laderas y desagües naturales, por citar algunos ejemplos.

Sus aspectos negativos derivan de que este fenómeno corresponde a la forma más severa de erosión por escorrentía superficial que implica la pérdida de suelo fértil, con la consecuente reducción de terreno apto para cultivo o pastoreo, socavamiento de laderas y aumento en la producción de sedimentos. Además tiene el agravante de que requiere un control complicado y costoso en caso de que no se tomen medidas correctivas en su etapa de formación y establecimiento.

2.4 Medición y control de erosión hídrica utilizando geomembranas

Históricamente el problema de la pérdida de suelo debido al efecto de la precipitación involucra tanto técnicas básicas de control de erosión, como cobertura del suelo y retención de sedimentos. Entre las soluciones se cuenta la cobertura vegetal muerta “mulch”, mantos orgánicos o de yute, refuerzo en la cobertura de césped, franjas de regeneración vegetal, geotextiles y barreras para limos conocidas como “silt fence”.

La utilización de geotextiles y barreras de limos nació a principios de los años 70 a través del uso de filtros de tela. Regulaciones dispuestas por el gobierno de los Estados Unidos limitaron la pérdida del suelo durante y después de las construcciones situadas en las inmediaciones de cuerpos de agua. (Carrol et al, 1992)

Dentro de las coberturas de geosintéticos desarrolladas para el control de la erosión se cuentan los de protección refuerzo del césped natural y para el control de la erosión y revegetación, tanto temporales como permanentes. Actualmente los sistemas permanentes están compuestos de materiales sintéticos duraderos, estabilizados contra los rayos

ultravioleta e inertes a los compuestos químicos que se encuentran de manera natural en el suelo. (Theisen, 1992)

Las barreras geotextiles tipo “silt fence” se han convertido en una práctica habitual en las construcciones de Estados Unidos. Una barrera bien diseñada en principio filtra las partículas de limo y arena transportadas por la escorrentía superficial, Posteriormente un filtro de suelo se constituye adherido a la geomembrana, lo cual reduce la capacidad del flujo superficial de pasar a través de la misma. Este proceso conduce a la formación de un charco antes de la geomembrana el cual funciona como sedimentador de los sólidos suspendidos en el agua de escorrentía. (Theissen, 1992)

El proyecto de investigación desarrollado por Prado (2009) demostró que la utilización de las barreras tipo “silt fence” puede utilizarse como sistema de cuantificación de pérdida de suelos bajo condiciones controladas de escorrentía. Esta constituye una prueba demostrativa del fenómeno de la erosión para los distintos grupos de interés involucrados en este problema.

2.5 Riberas de ríos

Las riberas son el espacio vegetal que se presenta en el límite entre un cuerpo de agua y su entorno, constituyendo una zona de transición entre los sistemas terrestres de ladera y los acuáticos del cauce, presentando unas características diferenciadas y especiales.

Una de sus funciones y ventajas principales es la estabilización de márgenes y orillas, pues la vegetación en los ríos da una mayor cohesión al suelo a través de su sistema radicular, lo cual favorece de manera importante la resistencia a la erosión. Si se cuenta con una cobertura vegetal abundante y bien desarrollada, la corriente tiende a erosionar más el lecho del río que sus bordes, de manera que se crean tramos más estables. (Schmidt y Otaola-Urrutxi, 2002)

Además una adecuada vegetación ribereña puede tener un gran beneficio sobre el aumento en la capacidad de filtrar toda clase de aportes y contaminantes físicos o químicos que se hacen al río a través de su cuenca y principalmente o de forma más directa los provenientes desde los terrenos más próximos a los cursos de agua.

La escorrentía superficial proveniente de las zonas aledañas es retenida o utilizada en gran medida por la vegetación ya que el aumento en la rugosidad y la permeabilidad del suelo producidas por un estrato rico en vegetación, favorecen que un gran porcentaje de los sedimentos queden retenidos, disminuyendo los sólidos en suspensión que transportará el río y protegiendo su cauce. (Schmidt y Otaola-Urrutxi, 2002)

Como otros aspectos positivos de las riberas de ríos se cuentan: la prevención o mitigación de avenidas, el favorecimiento del ecosistema fluvial y disminución de la evaporación desde el curso de agua.

A pesar de que la producción y el transporte de sedimentos ocurren de forma natural las variaciones en sus características tales como tamaño de partículas y carga total traen consigo efectos negativos para las riberas, el río mismo y los terrenos aguas abajo. Por lo tanto, la calidad del agua debe ser el objetivo primordial en cualquier esfuerzo de restauración de riberas.

Las experiencias han demostrado que la bioingeniería representa una técnica interesante aplicable a proyectos de restauración de riberas, que puede aportar una mayor eficacia a las estructuras clásicas de protección. (Schmidt y Otarola-Urrutxi, 2002)

CAPÍTULO 3. Metodología

Como línea base de información para la elaboración del proyecto se contó con un estudio realizado en 2007 en apoyo a la comisión de desembalses de la planta hidroeléctrica Sandillal, denominado “Caracterización general de la microcuenca del río Santa Rosa”, elaborado por el Ing. José Luis Aguirre Carballo y el Ing. José Rogelio Araya Rojas del Centro Nacional de Planificación Eléctrica (CENPE). Se utilizó como apoyo tanto en su forma impresa (texto y mapas) como en su forma digital (base de datos geofísica). Además se consultaron las fotografías aéreas del proyecto Carta 2005.

Se requirió principalmente de la información geográfica de curvas de nivel, caminos, ríos, delimitación de la microcuenca, usos del suelo, zonas de vida y tipos de suelo.

3.1 División de la microcuenca

Debido a los grandes contrastes presentados entre las características de las coberturas de pasto y bosque entre la parte alta y la parte baja de la microcuenca, además de las diferencias en cuanto a clima, precipitación anual y zonas de vida de Holdridge, se plantea hacer una división de la zona de estudio, ya que no resulta adecuado evaluar el potencial erosivo de dos lugares tan distintos, como si fuera uno solo.

En la parte alta, se presentan las zonas de vida bosque húmedo premontano, bosque húmedo tropical transición a premontano, bosque muy húmedo premontano y bosque muy húmedo premontano transición a pluvial, mientras que en la parte baja se presentan el bosque seco tropical, bosque húmedo premontano transición a tropical y bosque húmedo tropical transición a seco. (Aguirre y Araya, 2007).

Además, al analizar los registros históricos de precipitación se observa que existe una diferencia de más de 2 000 mm en los promedios anuales de las estaciones ubicadas en sus extremos Cerro Chiripa: 3 543 mm y Sandillal: 1 484 mm, como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Promedios anuales históricos de precipitación para las estaciones en el área de influencia de la microcuenca del río Santa Rosa.

Fuente: El autor.

Estación	Nombre	Promedio anual (mm)
69552	Tejona	2004,4
69585	Nueva Tronadora	2173,2
69630	Cerro Chiripa	3543,0
76018	Quebrada Lavas	1803,4
76020	Líbano	1497,1
76021	El Chopo	1412,4
76022	La Quesera	1970,6
76024	Coyol	1585,0
76040	Sandillal	1483,9

Por otro lado, las condiciones de pasto en las fincas son distintas. En la zona alta la cobertura del pasto es del 100% durante todo el año, caso contrario al que se presenta en la parte baja, donde en los meses secos, la cobertura del pasto sobre el terreno no es completa o adecuada pues este está seco en su gran mayoría

A partir de este punto, se describe la metodología desarrollada para cada uno de los objetivos propuestos en el presente proyecto de investigación, los resultados obtenidos se presentan únicamente para la microcuenca media-baja.

3.2 Definición de los sitios de interés

El fin primordial de la realización de esta fase del proyecto es encontrar las áreas, que por sus características de uso del suelo y pendiente, sean las más representativas de la zona de estudio, con el fin de ubicar las parcelas experimentales en lugares propicios para realizar mediciones de pérdida de suelo a una escala adecuada y así lograr su aplicabilidad a la mayor parte de la superficie posible dentro de la microcuenca.

A partir de la información de curvas de nivel cada 20 metros se genera, mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), un mapa de pendientes con una resolución de 10 m el cual será el base para definir las clases de pendiente para la zona de estudio.

Con el fin de caracterizar de manera uniforme y con la mayor amplitud posible la pendiente del terreno dentro de la microcuenca, a partir de los rangos de pendiente establecidos se decide incluir dentro del estudio las pendientes que tengan mayor superficie. Estos rangos de pendiente conforman la primera variable del diseño experimental.

Posteriormente se realiza un análisis cruzado de información del mapa de pendientes generado junto con el mapa de uso del suelo para delimitar las características del terreno predominantes en la microcuenca. Los usos del suelo principales son pasto, bosque y pasto con árboles, se seleccionan los que poseen mayor porcentaje de superficie (pasto y bosque) como las otras dos variables del diseño experimental.

Una vez establecidas las características representativas del área de estudio, se realizaron giras de reconocimiento con el fin de validar la información obtenida en el SIG tanto de tipo de uso de suelo, el cual se puede corroborar a simple vista, como de la pendiente media del terreno, labor que se llevó a cabo utilizando un clinómetro propiedad de la Escuela de Ingeniería Agrícola. Además durante las giras se buscan los sitios idóneos para instalar las parcelas experimentales en función de sus condiciones y cercanía a las estaciones pluviográficas.

Una vez que con ayuda del SIG y posterior validación quedan definidas de manera general las zonas de interés para colocar las parcelas experimentales, se visitan los propietarios de las fincas para informarles sobre el proyecto de investigación y solicitarles el permiso respectivo para la realización del mismo. Con el permiso otorgado, se ubican los sitios específicos para la instalación de las parcelas.

3.3 Medición de erosión hídrica utilizando una metodología adecuada

A través de esta parte de la investigación se quiere cuantificar con precisión la cantidad de sedimento producido en un sitio definido y delimitado, para caracterizar su vulnerabilidad a los procesos erosivos y relacionar posteriormente las cantidades de suelo removido con la energía de la precipitación registrada en estaciones pluviográficas cercanas a la zona de estudio.

El método de cuantificación del proceso erosivo se basa en el proyecto final de graduación realizado por el Ing. Rodolfo Prado Segura titulado “Metodología ajustada para la determinación de pérdidas de suelos en cultivos anuales y pastos” presentado en 2009 en la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica.

Para la implementación de la parcela experimental se necesita un área natural delimitada por una divisoria de aguas, o una zona en la cual el agua de escorrentía converge hacia un punto definido. Este sitio se define mediante visitas al campo para verificar sus condiciones de accesibilidad, pendiente y facilidad para ubicar el lugar exacto donde ubicar la geomembrana.

La georreferenciación del área de estudio se realizó con un receptor GPS Garmin. Este aparato tiene una precisión máxima de 3 m., las coordenadas se registraron en metros para la proyección Lambert Norte, con el fin de adecuarlas a la base de datos geofísica con la que se cuenta.

Una vez definidos los sitios para realizar las pruebas, se procede a la instalación de la geomembrana en la parte baja de la zona de estudio. Esta geomembrana está formada por un material que da cierta permisividad al paso del agua, pero actúa como trampa para los sedimentos debido a su baja conductividad hidráulica. De esta forma, fomenta la sedimentación y permite medir fácilmente en el campo la cantidad de material que se desprende asociado a un evento de precipitación. Se utilizó una geomembrana tipo “*silt fence*” W330 modelo PROPEX 1198. Las especificaciones de este material se detallan en el Anexo C. La colocación de las geomembranas se realizó entre el 23 de Junio y el 16 de julio de 2009 con el fin de abarcar la mayor parte del periodo lluvioso en la zona de estudio.

Para su colocación se excava una zanja de aproximadamente 30 cm de ancho y 20 cm de profundidad en el punto de convergencia del agua de escorrentía, se coloca la geomembrana dentro de la zanja, la cual posteriormente se rellena de nuevo con tierra y se compacta, para asegurar su firmeza. Luego se clavan estacas de 1 m. de longitud cada 80 cm. para que sirvan como soporte a la geomembrana. Una vez colocadas las estacas la membrana se fija a ellas mediante grapas que se ubican de forma inclinada, para abarcar el mayor número de fibras horizontales y verticales posibles.

En algunos sitios se requirió aumentar la distancia recomendada entre estacas, se utilizaron más grapas y se colocaron piedras para proteger la geomembrana del viento, pues este fenómeno es muy característico de la zona de Tilarán. En principio se tuvo problemas pues el viento ingresó por el espacio entre la geomembrana y el suelo, creando bolsas y separando la geomembrana de las estacas en los puntos donde se ubicaron las grapas.

Definir el área de aporte a la geomembrana es imprescindible para conocer el potencial erosivo del terreno. Es necesario realizar un levantamiento topográfico de la zona de estudio, con la generación de sus respectivas curvas de nivel, para asociar su área de aporte a la cantidad de suelo desprendido y poder extrapolar los datos encontrados a la totalidad del área de la microcuenca que cumpla con características similares en uso de suelo y pendiente.

El levantamiento incluyó el área de aporte delimitada por la divisoria de aguas natural, la ubicación de la geomembrana y la posición geográfica exacta (con precisión al centímetro) de la parcela en el sistema de coordenadas CRTM 05 según los estándares actuales de Instituto Geográfico Nacional. Las curvas de nivel se generaron cada 50 cm para trabajar con una escala adecuada al tamaño de la zona de estudio y a las pendientes más bajas. El método de levantamiento se denomina RTK (Real Time Kinetic) que consiste en un sistema provisto de una antena que recibe las coordenadas desde los satélites y las transmite vía señal de radio al receptor GPS, por lo que la posición exacta se tiene en tiempo real. Con este sistema se generaron los puntos de referencia para el amarre de la estación total utilizada, la cual tiene una precisión milimétrica.

Dados los requerimientos del estudio y el diseño experimental, el número de parcelas es grande, por lo que la instalación de la parcela experimental debe realizarse antes del levantamiento topográfico y la generación de un modelo de elevación digital. De esta manera la ubicación de la geomembrana y delimitación de la parcela experimental requirió de pericia y mucho trabajo de campo para definir los sitios más adecuados. El levantamiento topográfico se realizó durante los meses de Agosto, Setiembre y Octubre de 2009, los archivos de dibujo con las curvas de nivel y posición geográfica preliminares fueron entregados a finales de Febrero de 2010.

Una vez instalada la geomembrana, se realizan visitas semanales a cada parcela con el fin de medir la masa del sedimento depositado sobre la misma y evaluar su funcionamiento y condiciones, además de tomar una muestra del suelo recogido. La medición de masa se realizó mediante una romana de mesa con capacidad para 20 kg. El sedimento depositado sobre la geomembrana se recoge utilizando una pala o cuchara de albañil y se coloca en baldes para la determinación de su masa húmeda. Se acumulan submuestras provenientes de los baldes ya pesados hasta completar 1 kg.

Las muestras de suelo obtenidas, se llevan al horno de secado ubicado en la Escuela de Ingeniería Agrícola (E.I.A.) de la UCR. Cada muestra se divide en tres submuestras, que se colocan en recipientes de aluminio, se pesan utilizando una balanza electrónica y secan en el horno a 110° C durante 24 horas. Terminado este tiempo, se dejan enfriar por una hora y se pesan nuevamente para obtener su porcentaje de humedad y peso del suelo seco recolectado, dato que será asociado a la totalidad del peso del sedimento recolectado en el campo. La balanza utilizada posee capacidad para 300 g. y cuenta con una precisión de cuatro decimales.

3.4 Caracterización de riberas de ríos

Con el cumplimiento de esta fase del proyecto se quiere lograr la identificación de las principales características de los cauces y riberas en los principales cursos de agua de la microcuenca del río Santa Rosa. A partir de una descripción cualitativa se pueden definir factores de vulnerabilidad para generar una caracterización cuantitativa del riesgo erosivo.

Para la consecución de este objetivo se realizan giras de campo a diversos puntos sobre el cauce principal del río Santa Rosa, a saber: puente sobre ruta 926: Tilarán – El Silencio, puente sobre ruta 142: Cañas – Tilarán, puente sobre ruta 142: Tilarán – La Fortuna, Embalse Santa Rosa y finca La Paz, sobre el camino que comunica Tilarán con la comunidad del Vergel de Cañas. Además se han visitado puntos de convergencia entre quebradas y puentes en las rutas 145: Tilarán – Quebrada Grande, 925: Tilarán – Líbano, además de quebradas y caminos vecinales dentro del cantón de Tilarán.

Durante cada gira, se registra mediante fotografías las características del río que se consideran útiles para describir el estado general del cauce y las riberas del mismo. Los

materiales removidos previamente y depositados en las cercanías del curso de agua, propensos a ser arrastrados posteriormente en una nueva crecida y llevados hasta los embalses también han sido fotografiados para tener una idea de el conjunto y tipo de material que puede afectar las tomas de agua, compuertas y otras estructuras importantes para el adecuado funcionamiento de los centros de producción pertenecientes a ArCoSa. Además se georreferencian los sitios en los cuales se evidencian síntomas graves de erosión con ayuda del receptor GPS.

Además tomando como insumo los mapas de uso del suelo y pendientes de la microcuenca del río Santa Rosa, se generó un mapa combinado de usos del suelo y pendientes en riberas de ríos, dentro de un área de amortiguamiento o “buffer” de 200 m hacia ambos márgenes para representar el estado de los márgenes en los ríos de la microcuenca y analizar su vulnerabilidad.

3.5 Representación gráfica del comportamiento de lluvia y erosión, elaboración de un mapa de vulnerabilidad

Paralelamente a la recolección del sedimento acumulado en las geomembranas se debe recopilar la información generada por las distintas estaciones pluviográficas, para analizar el comportamiento de la erosión en cada parcela, en función de la energía de la lluvia. Debido al detalle del estudio, es necesario trabajar con los datos de precipitación de menor lapso entre registros, para generar información útil proveniente de cada tormenta. En la microcuenca media-baja existen cuatro estaciones: Queb. Lavas (76018), El Chopo (76021), El Coyol (76024) y Sandillal (76040). Estas registran datos de precipitación cada cinco minutos, e incluso la estación 76040 es telemétrica, por lo que sus datos pueden ser consultados en tiempo real desde la oficina de hidrología de Servicios Básicos del ICE. Los datos de energía y factor de erosividad R para lluvias erosivas se muestran en el Anexo B.

La estación 76018 Quebrada Lavas prácticamente se eliminó del estudio, pues durante el mes de Julio se le instaló la antena y el sistema para funcionar de forma telemétrica, sin embargo, menos de una semana después sufrió vandalismo y fue destruida en su totalidad. Posteriormente se trasladó a terrenos ICE cerca del tanque de oscilación del C.P. Arenal, pero se perdió el registro de información durante el resto del año. Sólo se utiliza su información para el mes de Julio para completar los valores de precipitación asignados a las parcelas más cercanas en las cuales se utilizan datos de la estación Coyol, la cual muestra un faltante de datos para casi todo ese mes.

La energía de la lluvia se calcula mediante un software llamado “Lluvias erosivas” que se utiliza en Servicios Básicos del ICE. El criterio que se utiliza para definir la tormenta como erosiva es que exista una precipitación de al menos 13 mm en un lapso de 360 minutos. Este criterio fue definido por Gómez, 2002 en su tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil. Los registros de la base de datos para cada estación se introducen en el programa, el cual realiza una evaluación por tormenta (no por fecha específica) y genera una lista de eventos erosivos. Estos eventos pueden ser analizados, tomando en cuenta la intensidad de la precipitación (en mm/h) para cada lapso de cinco minutos y generando valores de energía en $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ y $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2\cdot\text{mm}$, además del factor de erosividad R con base

en el I_{30} generado a partir de la comparación entre intensidades de cada lapso de 30 minutos, desfasado cada cinco minutos para encontrar la intensidad máxima en 30 minutos.

Obtenidos los valores de energía en $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ se pueden comparar con los valores obtenidos en la recolección de sedimento en cada una de las parcelas experimentales, para caracterizar el efecto de un fenómeno sobre otro. El comportamiento de ambas variables se grafica en función del tiempo para observar su variación y relación a lo largo del periodo de estudio.

Una vez obtenidos los totales de masa de sedimento recolectado para cada una de las parcelas experimentales sumados al valor de su superficie determinado por el levantamiento topográfico se obtiene su potencial erosivo, en ton/ha . Este se promedia para las parcelas que tienen las mismas condiciones de cobertura y rango de pendientes con el fin de obtener un factor de vulnerabilidad a la erosión a partir de estas características.

Para obtener un resultado general, la susceptibilidad a los procesos erosivos se representa de manera gráfica a través de un mapa para la microcuenca media baja, mostrando los diferentes ámbitos de potencial erosivo con base en la clasificación de la FAO que define las clases de erosión desde baja hasta muy severa, como se muestra en la Tabla 2.1. Debido a los resultados obtenidos se realiza una subdivisión dentro de la clase definida como erosión baja, representando las zonas con potencial erosivo prácticamente imperceptible, con valores inferiores a $0,50 \text{ ton}/\text{ha}$, identificados con un factor de vulnerabilidad 1. El factor 2 se asigna al resto de las áreas con erosión baja no consideradas dentro del factor anterior, el factor 3 a erosión moderada y el 4 a erosión severa.

CAPÍTULO 4. Resultados y análisis

4.1 Caracterización de la microcuenca del río Santa Rosa

La microcuenca del río Santa Rosa, tiene una superficie de 10 446 ha, es explotada principalmente mediante la producción de ganado de engorde y leche, con un porcentaje del 52% del total de la microcuenca. Cobertura boscosa y zonas de pasto con árboles, 24% y 15%, respectivamente son los otros usos que más caracterizan la zona. En la mayoría de los caminos y algunas riberas de cauces naturales se presenta mucha inestabilidad en sus taludes. Estas áreas tienen un potencial a ser erosionadas y por tanto ser contribuyentes directos de sedimentos a los cauces de los ríos y por ende a los embalses Santa Rosa y Sandillal. La Figura 4.1 muestra el mapa de usos del suelo para la microcuenca.

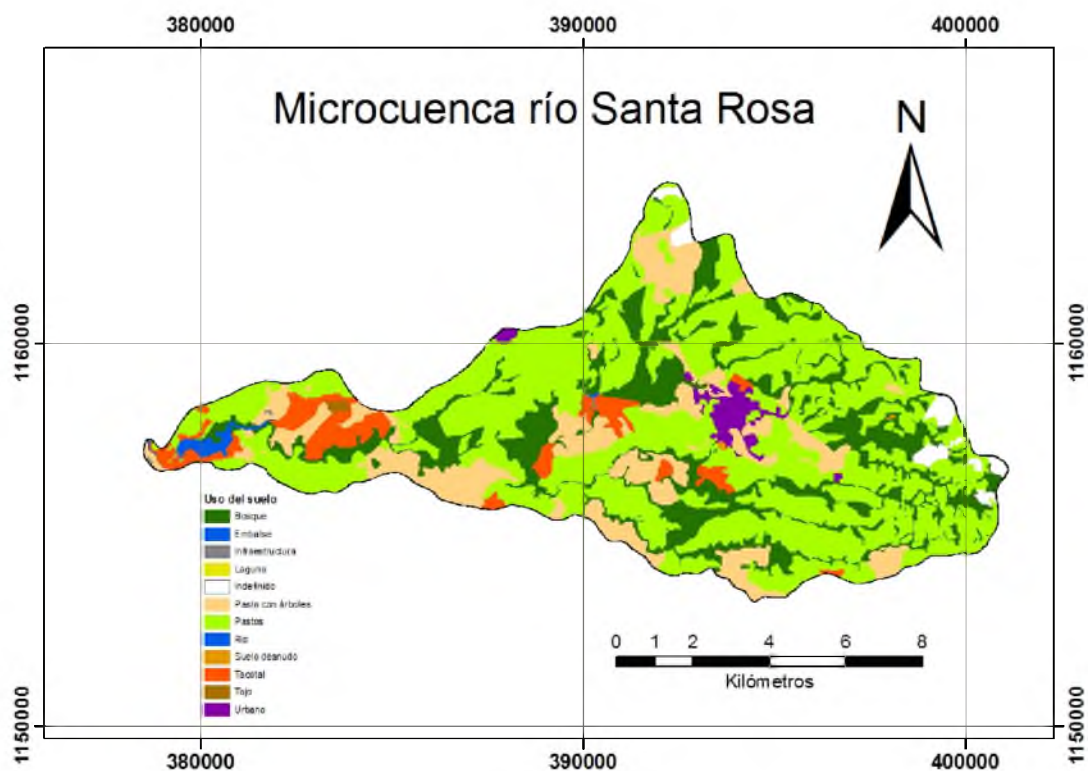


Figura 4.1. Mapa de tipos de uso del suelo (año 2005) para la microcuenca del río Santa Rosa.

Fuente: El autor.

A partir de la información asociada al mapa de uso de suelo se determina el porcentaje de la superficie que abarca cada uso, como se muestra en la Figura 4.2

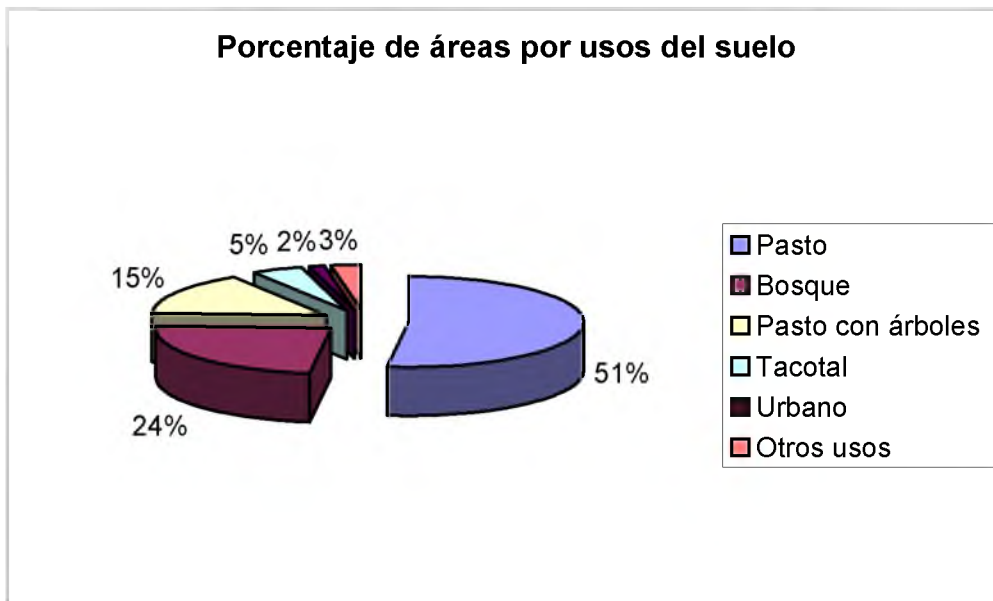


Figura 4.2. Distribución de los porcentajes de superficie para cada tipo de uso del suelo.

Fuente: El autor.

Como se mencionó anteriormente, la vocación de la microcuenca es principalmente pecuaria, con fincas de gran extensión. Se encuentra principalmente pasto mejorado, variedad Toledo de la especie (*Brachiaria brizantha*), pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*) y king grass (*Penisetum purpureum x Penisetum typhoides*). En menores porciones se presenta el jengibrillo (*Paspalum notatum*) y el pasto amargo (*Axonopus compressus*).

En cuanto al bosque las áreas más destacadas son la de la finca municipal de Cerro Chiripa en la zona alta de la microcuenca, donde se encuentran múltiples nacientes y el bosque de la finca El Chopo, aladaña al cero homónimo, en la parte baja del cauce principal del río Santa Rosa, cerca del embalse Sandillal.

A pesar de tener un relieve variado y de su diferencia altitudinal la mayor parte de la microcuenca del río Santa Rosa presenta pendientes bajas y moderadas, como se muestra en las Figuras 4.3 y 4.4. Algunas zonas con pendiente fuerte se encuentran cerca de las riberas de los cursos de agua, condición que se analizará posteriormente.

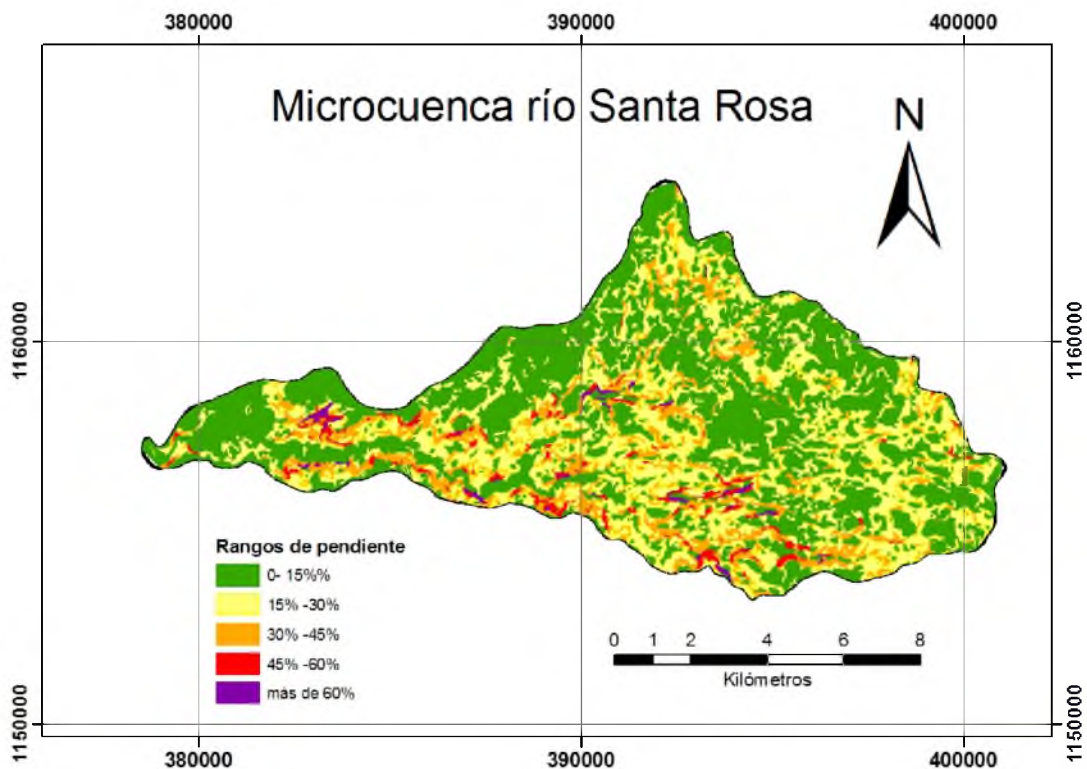


Figura 4.3. Mapa de pendientes para la microcuenca del río Santa Rosa.

Fuente: El autor.

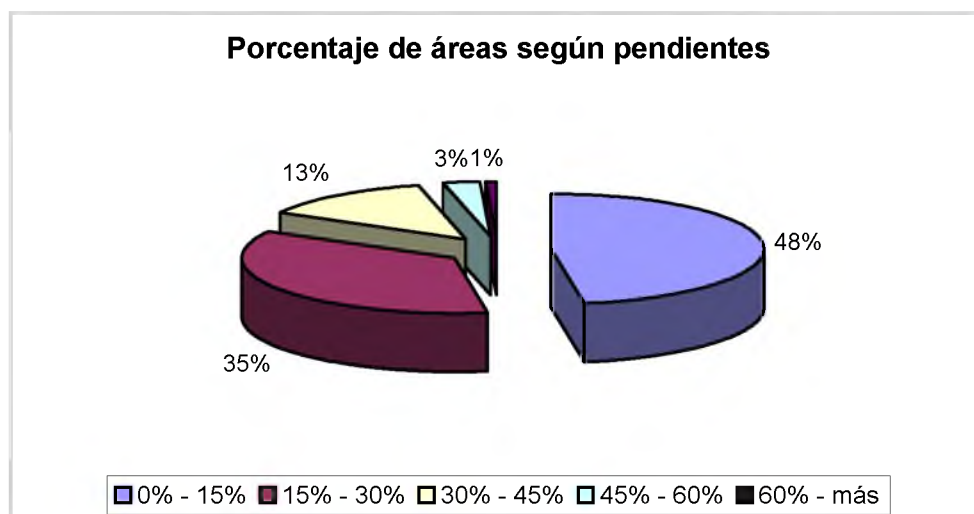


Figura 4.4. Distribución de los porcentajes de superficie para cada rango de pendientes.

Fuente: El autor.

De acuerdo a la información base con que se cuenta, la microcuenca presenta solamente dos tipos de suelo: alfisoles principalmente en la parte oeste y suroeste e

inceptisoles, destacados en la zona norte y este de la microcuenca, como se muestra en la Figura 4.5.

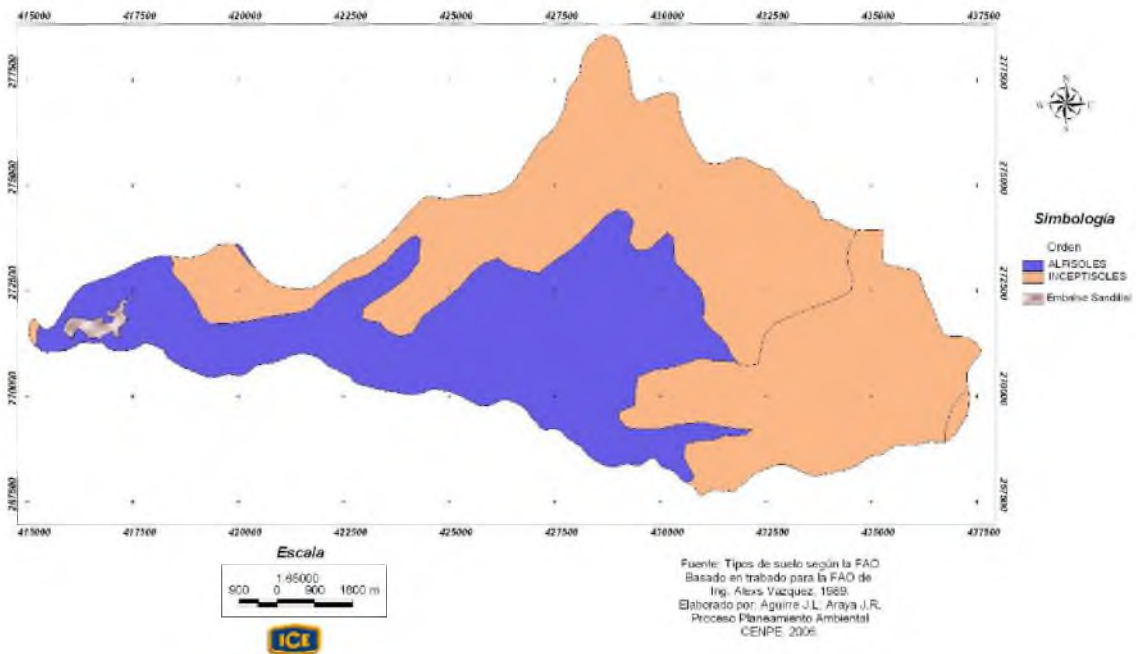


Figura 4.5. Mapa de suelos para la microcuenca del río Santa Rosa.

Fuente: Aguirre y Araya, 2007.

4.2 División de la microcuenca

Las Figuras 4.6 y 4.7, tomadas en marzo de 2009 son fotografías que confirman la variación estacional que se presenta en la cobertura de pastos en la zona baja de la microcuenca, en contraste con lo que se presenta en la zona alta. Debido a que se ve altamente influenciada por el clima de la Vertiente del Caribe, la zona alta presenta precipitaciones prácticamente a lo largo de todo el año, a diferencia de la zona baja, que tiene el clima característico del Pacífico Norte, con una estación seca muy marcada, siendo la más prolongada del país.



Figura 4.6. Fincas dedicadas a ganadería en los alrededores de Los Ángeles de Tilarán, zona media-baja de la microcuenca.

Fuente: El autor.



Figura 4.7. Terrenos de pastoreo en las faldas del Cerro Chiripa, zona media-alta de la microcuenca.

Fuente: El autor.

Tomando en cuenta estas diferencias entre ambos extremos de la microcuenca, en cuanto a clima, precipitaciones y características de la cobertura vegetal, se decide hacer una división de esta, de forma que se generen áreas en concordancia con la diferenciación de zonas de vida de Holdridge presentes (Figura 4.8).

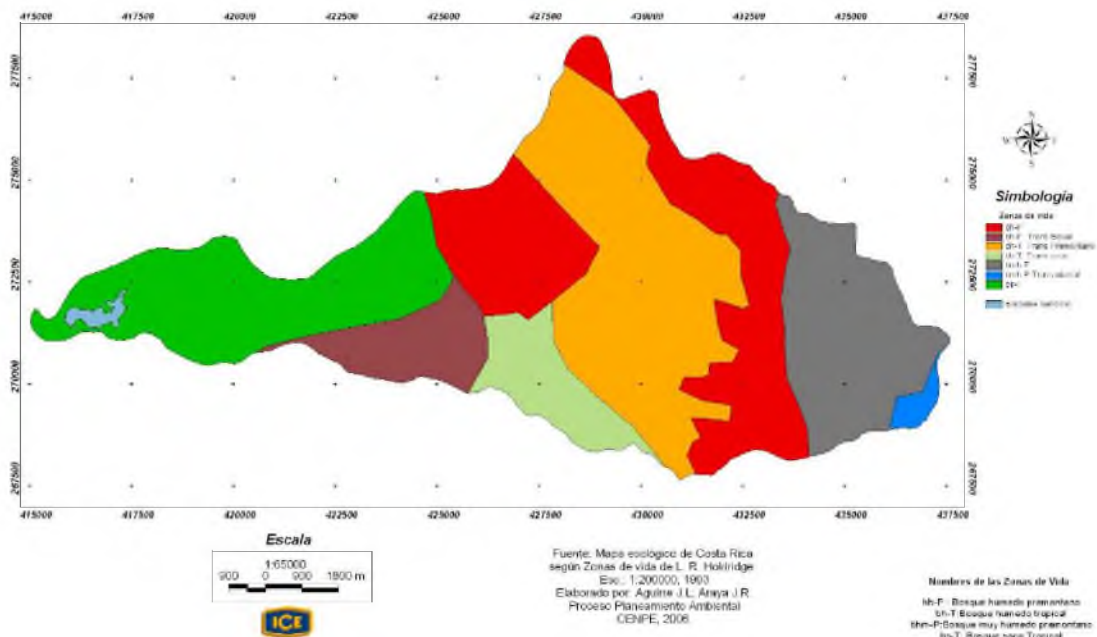


Figura 4.8. Mapa de zonas de vida de Holdridge para la microcuenca del río Santa Rosa.

Fuente: Aguirre y Araya, 2007.

Como se aprecia en la Figura 4.9 alrededor del 50% de la superficie de la microcuenca se encuentra sobre la curva de nivel de elevación 500 m. Se decide utilizar la curva de nivel de elevación 540 m.s.n.m. ya que coincide aproximadamente con el límite de la zona de vida denominada bosque tropical húmedo transición premontano.

La microcuenca media-baja del río Santa Rosa tiene una superficie de 5 421 ha, entre las que se incluye la superficie de los embalses Santa Rosa y Sandillal. Comprende las elevaciones desde 50 m.s.n.m. hasta los 540 m.s.n.m. como ya se mencionó.

La Figura 4.10 representa la forma en que quedó dividida la microcuenca del río Santa Rosa para su análisis de potencial erosivo. Definida adecuadamente el área de estudio, se procede a evaluar las características principales a evaluar dentro del estudio.

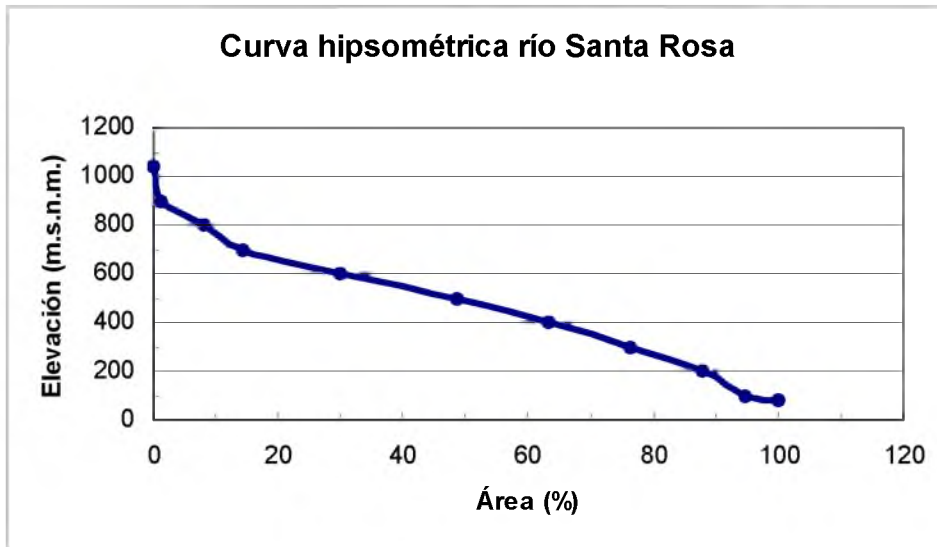


Figura 4.9. Curva hipsométrica generada para la microcuenca del río Santa Rosa.

Fuente: El autor.

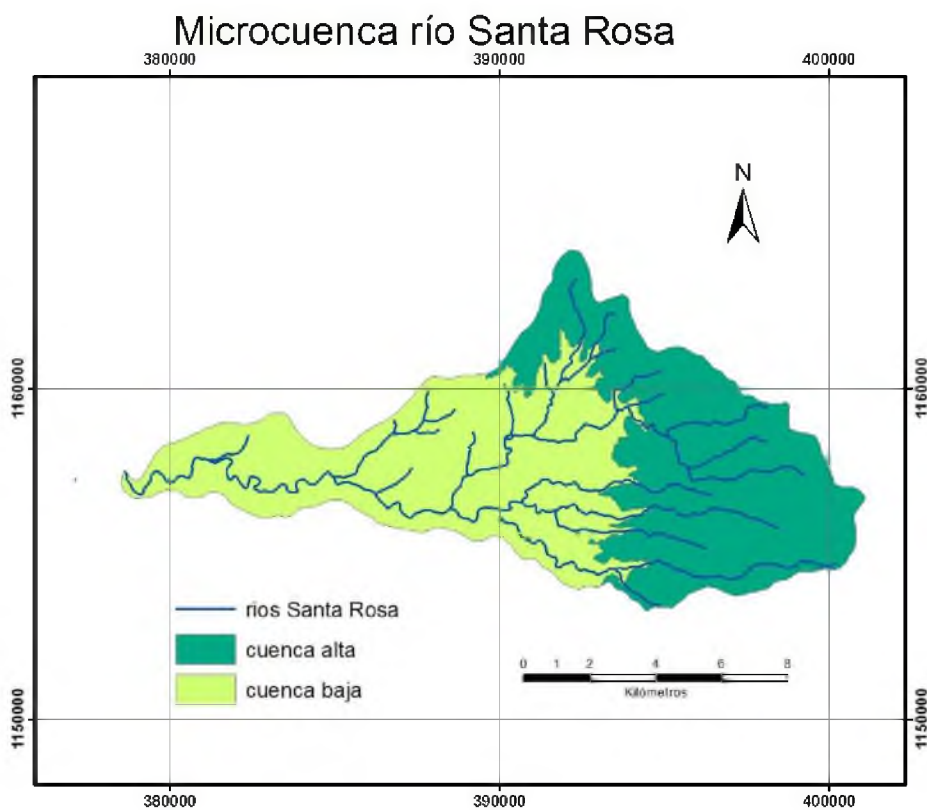


Figura 4.10. División de la microcuenca del río Santa Rosa.

Fuente: El autor.

4.3 Definición de los sitios de interés

Como primer variable para caracterizar la microcuenca media baja se genera un mapa de pendientes, que indica alta presencia de terreno con pendientes bajas como se observa en la Figura 4.11.

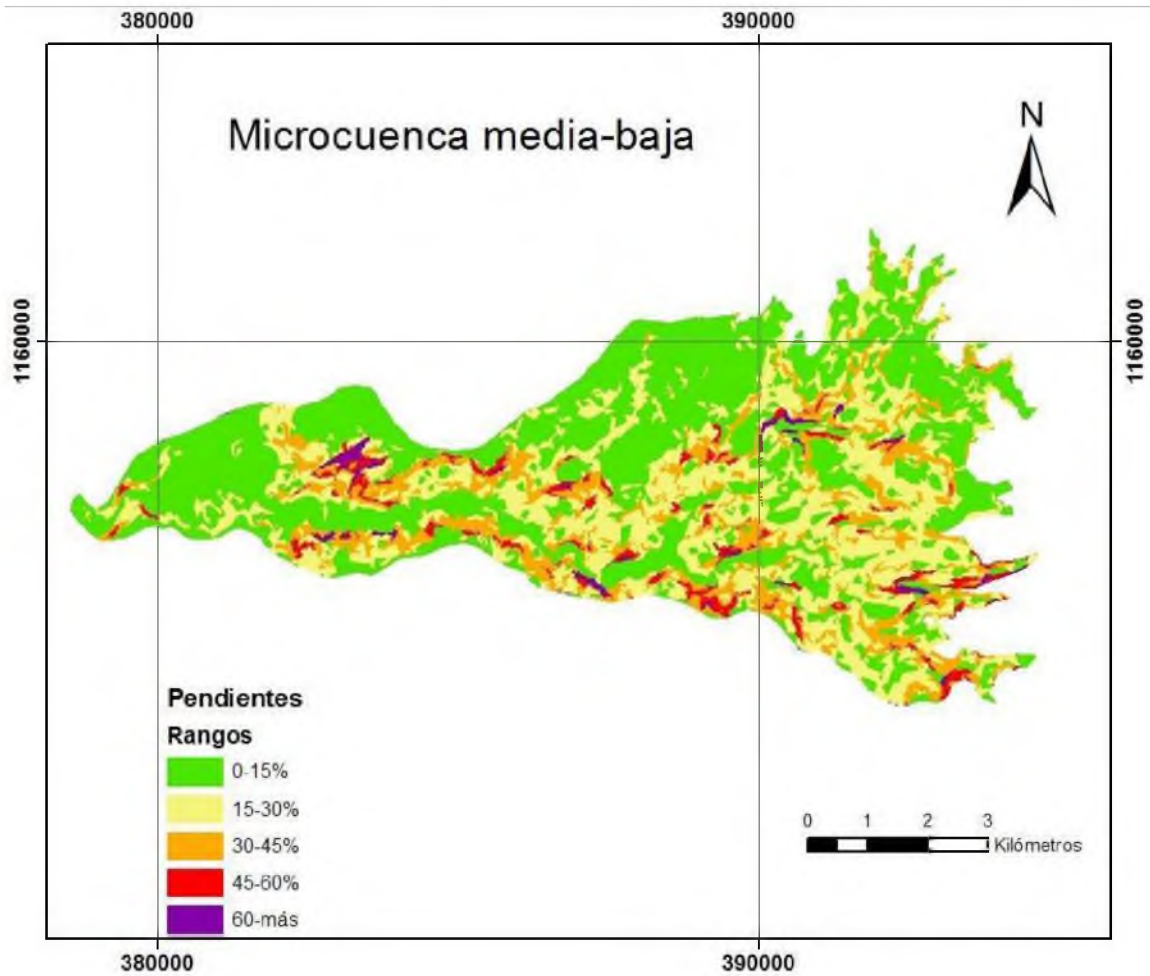


Figura 4.11. Mapa de pendientes para la microcuenca media-baja del río Santa Rosa.

Fuente: El autor.

Con base en el mapa de pendientes generado para la microcuenca baja se encuentra que alrededor de la mitad de su superficie corresponde a terrenos con pendientes menores al 15% y la tercera parte a pendientes entre 15% y 30%, como se describe en la Figura 4.12.

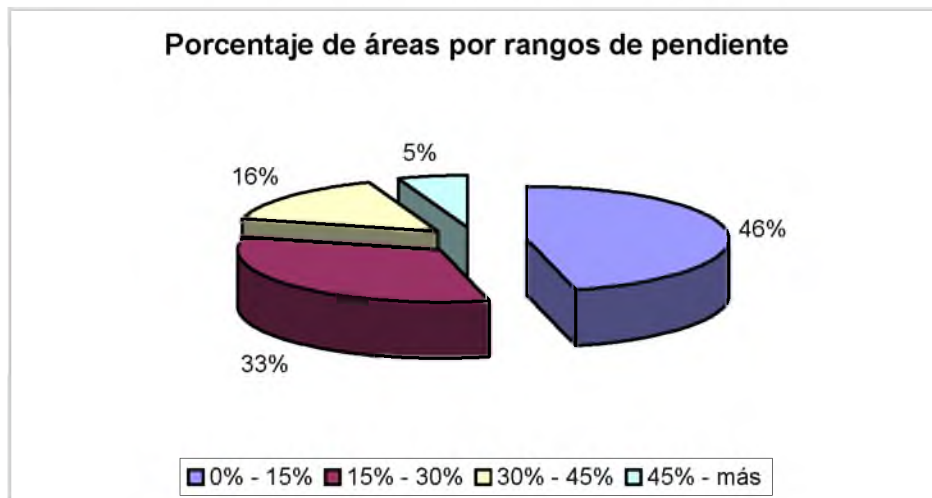


Figura 4.12. Porcentaje de superficie de la microcuenca media baja según los rangos de pendiente evaluados.

Fuente: El autor.

Dentro de la microcuenca media-baja están representados todos los usos del suelo encontrados en el área total de la microcuenca del río Santa Rosa, como se aprecia en la Figura 4.13. Además en las fotografías aéreas correspondientes a este sector no se presentan nubes que dificulten la interpretación del uso del suelo dentro de la zona de estudio, lo que representa una ventaja para la definición de los usos representativos del área.

El uso del suelo más extendido en la zona media-baja es el de pasto, ya que según se comprobó durante las diferentes giras realizadas, se aprovecha el terreno de pendientes moderadas y bajas para este propósito.

En la microcuenca media baja se utiliza principalmente la variedad de pasto Toledo, y en algunos sectores el pasto jengibrillo (*Paspalum notatum*), según lo observado en el campo. Sin embargo las condiciones de manejo y carga animal varían mucho entre las fincas, por lo que la cobertura del pasto no logra establecerse adecuadamente en algunas regiones. El área de pastos de estas zonas se utiliza exclusivamente bajo un sistema de ganadería extensiva para carne y toros para espectáculos públicos, con apartos de gran tamaño.

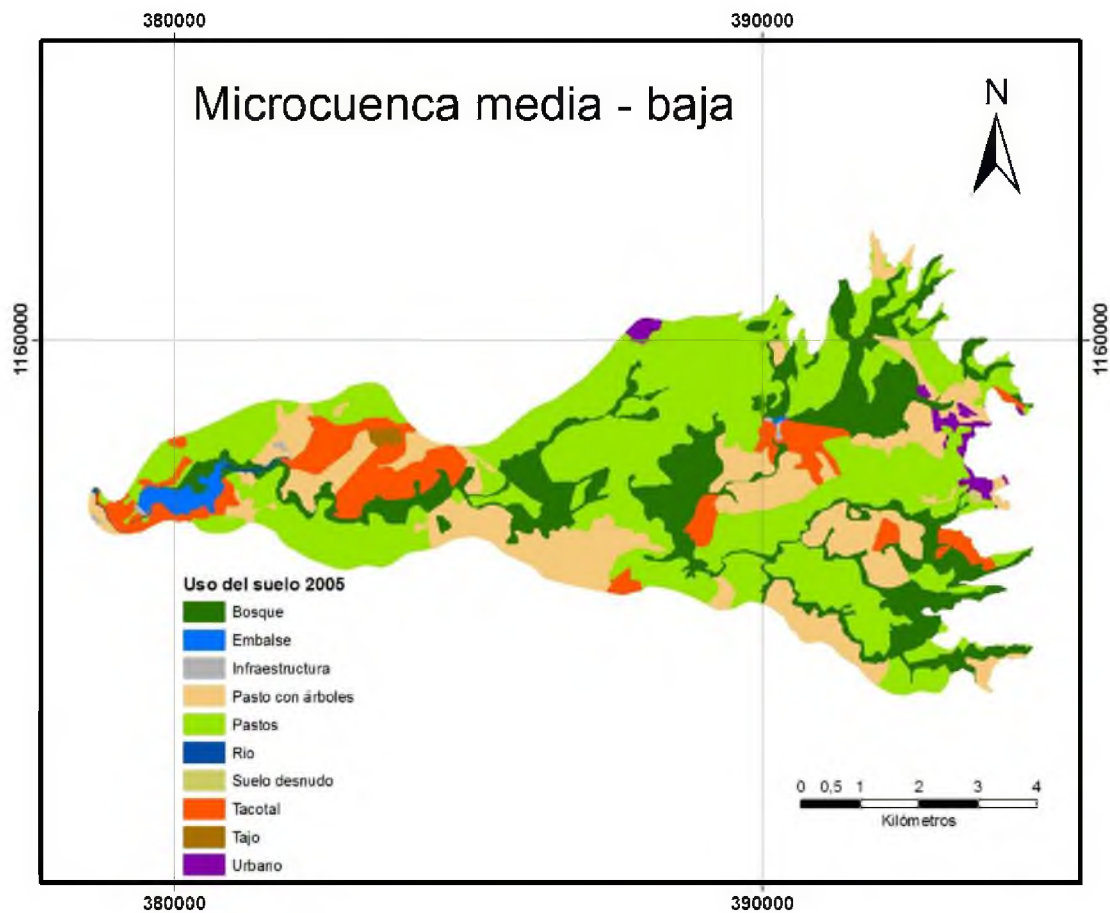


Figura 4.13. Mapa de usos del suelo para el año 2005 en la microcuenca media-baja río Santa Rosa.

Fuente: El autor.

Debido a la gran variedad de tipos de uso presentes en la microcuenca media – baja y al porcentaje reducido de la extensión total que representan algunos, se simplificó y sintetizó la información del mapa de usos en la Figura 4.14 que muestra el valor porcentual de los tipos de uso más destacados en la zona de estudio.

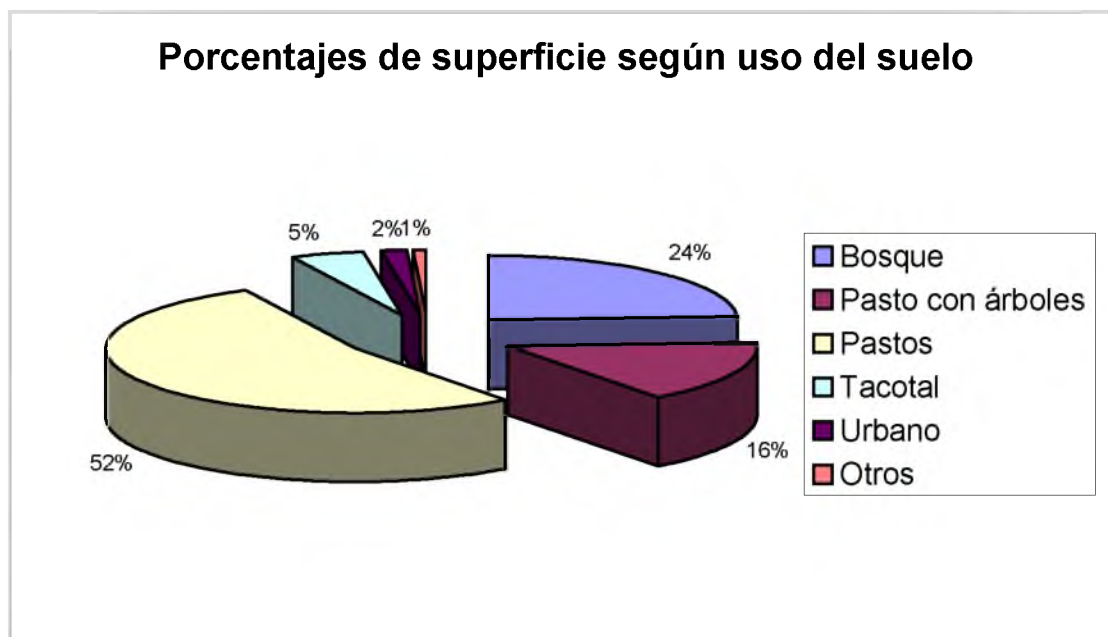


Figura 4.14. Porcentaje de superficie de la microcuenca media-baja según tipo de uso del suelo.

Fuente: El autor.

En la Tabla 4.1 se muestran los tipos de uso del suelo con mayor área en la zona, los cuales son representativos para el estudio además, combinados con los rangos de pendiente con mayor proporción de superficie, abarcan más del 66% el área de la microcuenca.

Tabla 4.1. Combinaciones de uso del suelo y pendientes seleccionadas para el estudio.

Fuente: El autor.

	% Pendiente	% Área	Área (ha)
PASTOS	0 – 15	24,98	1354,03
	15 – 30	13,93	755,01
	30 – 45	5,41	293,05
	Total 0 – 45	44,32	2402,09
BOSQUE	0 – 15	9,89	535,96
	15 – 30	7,92	429,61
	30 – 45	4,00	216,89
	Total 0 – 45	21,71	1182,46
TOTAL		66,03	3584,55

Se decide incluir dentro del proyecto los terrenos con pendiente comprendida entre 0% y 45%, con cobertura de pastos y bosque, características que en conjunto abarcan un 66% del área total de la microcuenca media-baja. De esta manera para el diseño experimental se requiere un total de $3 \times 2 \times 3 = 18$ parcelas experimentales considerando tres rangos de pendiente (0% - 15%, 15% - 30%, 30% - 45%), dos tipos de uso del suelo (pastos y bosque) y tres repeticiones para cada combinación. No se incluye el área con cobertura de pasto con árboles, que cubre un 20% del área de la microcuenca media-baja, debido a la limitante de tiempo que representa recoger y manipular la información de nueve parcelas experimentales más; sin embargo por sus características intermedias, los resultados obtenidos en el proyecto pueden ser aplicables a esta clasificación de uso.

A pesar de su potencial vulnerabilidad, se resuelve dejar por fuera del estudio las pendientes de más de 45% debido a varios motivos. En primer lugar, realizando un análisis de la base de datos asociada a la información espacial con que se cuenta, se encontró que sólo 296 ha cumplen con dicha condición (5,5% del área total); de estas, 285 ha tienen una cobertura vegetal importante (pasto con árboles, pasto, bosque o tacotal), por lo que solamente 11 ha (0,2% del área total) presentan condiciones de uso urbano, infraestructura, embalses, suelo desnudo o tajo. Además por sus características algunos de estas zonas presentan importantes dificultades de accesibilidad y seguridad tanto para el equipo como para las personas. Sin embargo, los terrenos con pendientes mayores a 45% y sin cobertura vegetal son considerados en la evaluación cualitativa del potencial erosivo de algunas riberas de ríos y en los taludes de caminos y carreteras evaluados en la tesis del Ing. Ronald Aguilar.

La mayor parte de los suelos de la microcuenca media baja son alfisoles, con una presencia menor de inceptisoles en la parte norte y este (Figura 4.15). Las zonas de vida de Holdridge presentes son bosque seco tropical, bosque húmedo tropical transición a basal, bosque húmedo tropical transición a seco y bosque húmedo premontano (Aguirre y Araya, 2007). Cabe destacar que las áreas de bosque no involucran solamente bosque primario, si no también bosque secundario. Además las áreas de reforestación son clasificadas como tacotal en la base de datos geofísica con que se cuenta.

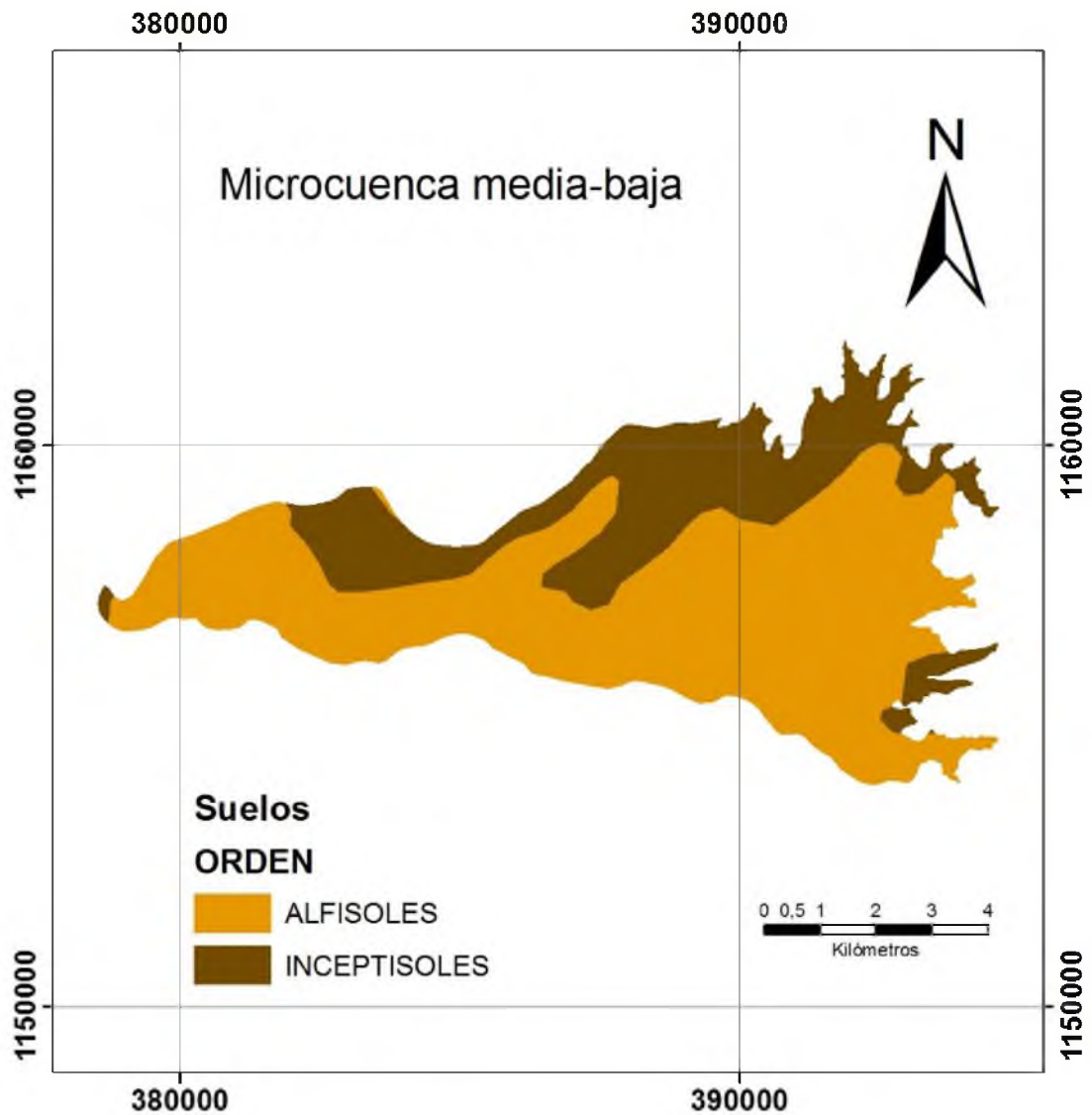


Figura 4.15. Órdenes de suelo presentes en la microcuenca media-baja.

Fuente: El autor.

A partir de la información mostrada en las Figuras 4.15 y 4.16 se tiene que de las 18 parcelas experimentales 13 fueron ubicadas en suelos del orden de los inceptisoles y cinco en el de los alfisoles, estas últimas en bosque secundario y en regeneración cerca del embalse Sandillal y del puente sobre el río Santa Rosa, en la ruta nacional 142 que comunica la ciudad de Cañas con Tilarán. La parcela experimental IE-ESTU correspondiente a la cárcava se ubicó en un inceptisol.

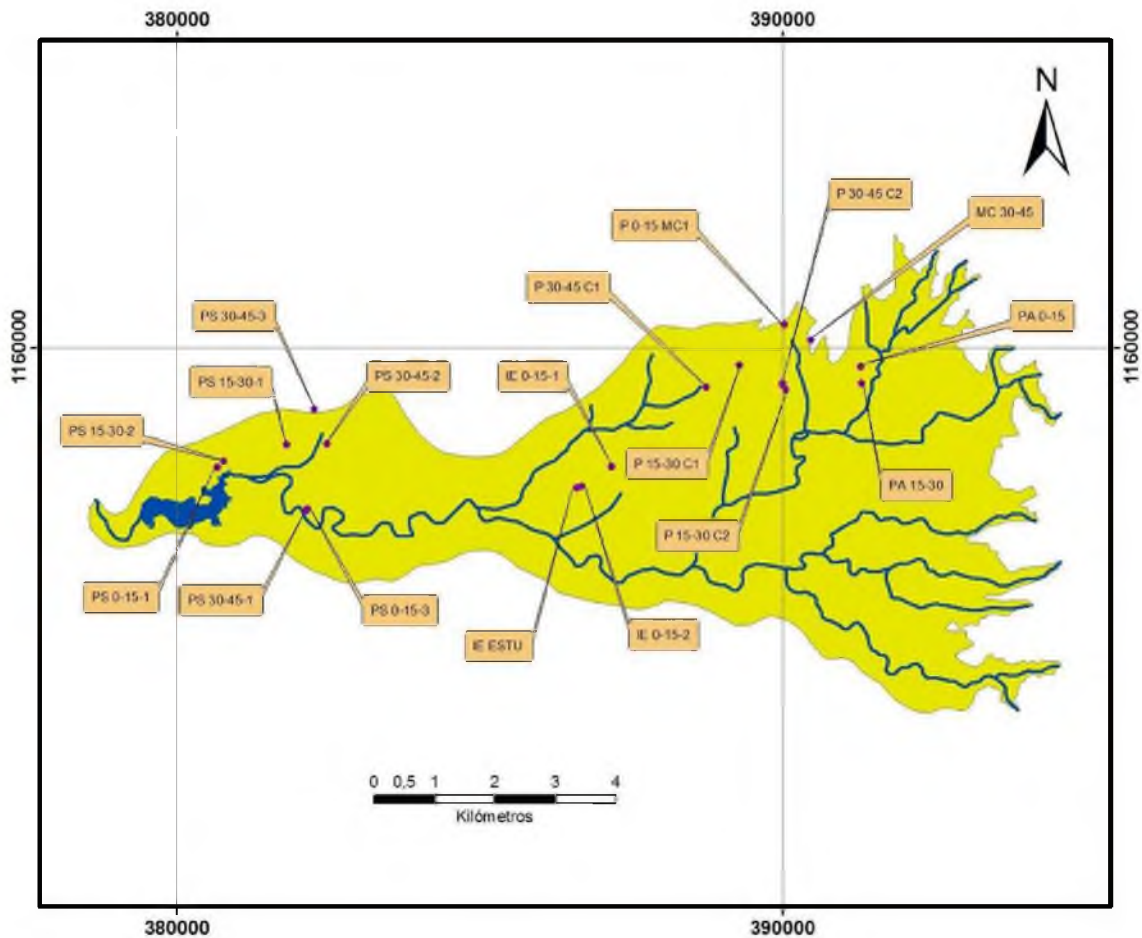


Figura 4.16. Distribución de las parcelas experimentales en la microcuenca media – baja.

Fuente: El autor.

La Figura 4.17 muestra la ubicación de las estaciones pluviográficas dentro del área de influencia de la microcuenca media – baja del río Santa Rosa. A partir de esta información y la presentada en la Figura 4.16 además de los datos del levantamiento topográfico, se generó la tabla 4.2 con las principales características de las parcelas experimentales ubicadas dentro del área de estudio.

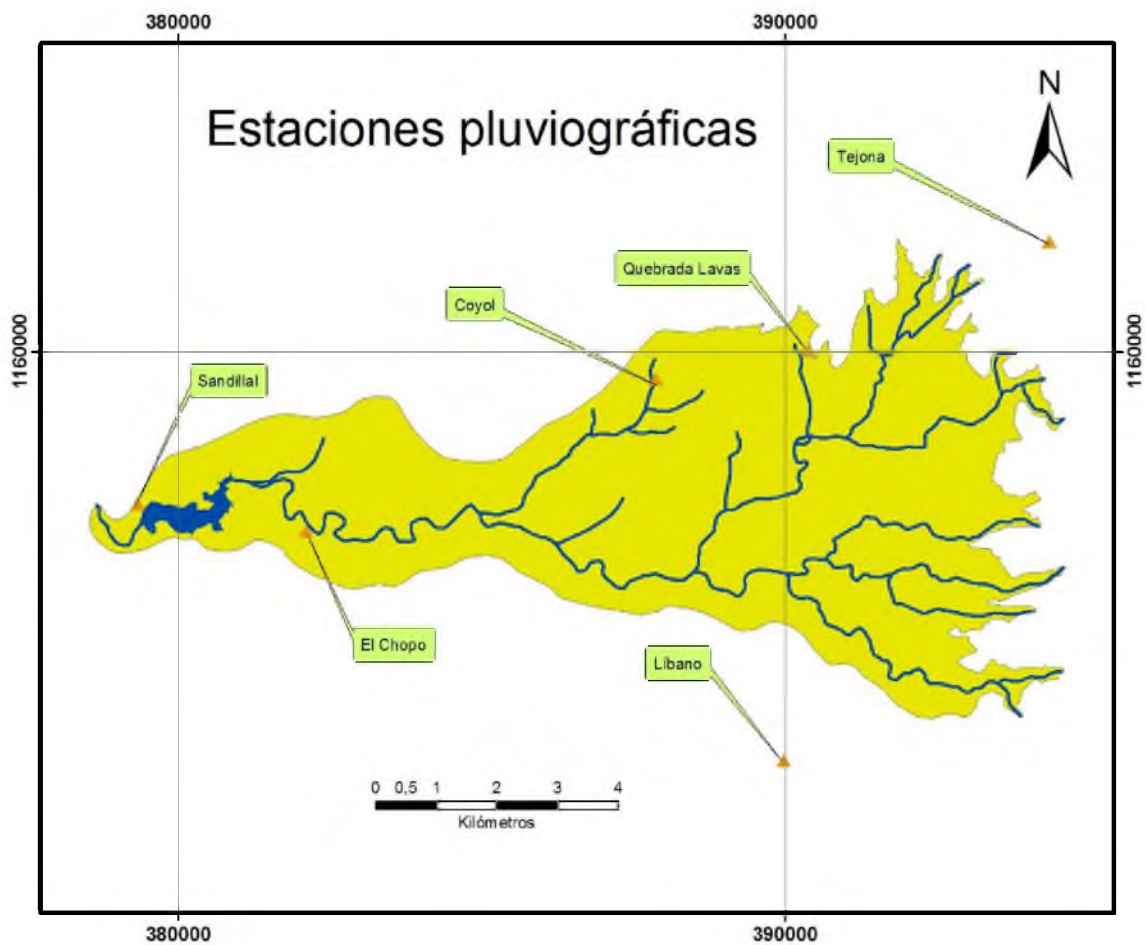


Figura 4.17. Ubicación de las estaciones pluviográficas dentro del área de influencia de la microcuenca media – baja.

Fuente: El autor.

La parcelas en tipo de uso de suelo de pastos se ubicaron en tres fincas de diferentes propietarios, por otro lado las fincas de bosque fueron establecidas únicamente en terrenos propiedad del ICE, en las cercanías del Centro de Producción Arenal, Centro de Producción Miguel Pablo Dengo B. y embalse Sandillal.

Tabla 4.2. Características generales de las parcelas establecidas.

Fuente: El autor.

Parcela	Uso	Rango de s (%)	Estación cercana	X (m)	Y (m)	Área (m ²)
PS 0-15-1		0-15	Sandillal, Chopo	380874	1157855	513,0
PA 0-15			Quebrada Lajas, Coyol	391482	1159539	444,7
PS 0-15-3			Sandillal, Chopo	382344	1157131	627,4
PA 15-30	Bosque	15-30	Quebrada Lajas	391498	1159237	551,2
PS 15-30-1			Sandillal, Chopo	382007	1158241	634,5
PS 15-30-2			Sandillal, Chopo	380961	1157950	2015,6
PS 30-45-1		30-45	Sandillal, Chopo	382372	1157179	283,1
PS-30-45-2			Sandillal, Chopo	382673	1158247	332,6
PS 30-45-3			Sandillal, Chopo	382486	1158789	516,7
P 0-15 MC1		0-15	Quebrada Lajas, Coyol	390229	1160230	1362,1
IE0-15-1			Coyol, Chopo	387389	1157866	1651,7
IE0-15-2			Coyol, Chopo	386875	1157525	2179,2
P 15-30 C1	Pasto	15-30	Quebrada Lajas, Coyol	389509	1159508	7387,4
P 15-30 C2			Quebrada Lajas	390251	1159137	823,3
P 15-30 C3			Quebrada Lajas	390184	1159226	986,6
MC 30-45		30-45	Quebrada Lajas	390715	1159975	2622,7
P 30-45 C1			Quebrada Lajas, Coyol	388952	1159179	1488,1
P 30-45 C2			Quebrada Lajas	390219	1159258	975,1
IE ESTU	Cárcava	15-30	Coyol, Chopo	386822	1157497	835,0

La Figura 4.18 muestra la distribución de las zonas de vida de Holdridge en la microcuenca media – baja del río Santa Rosa. Dentro del estudio están representados el bosque húmedo premontano, con las dos parcelas ubicadas alrededor del Centro de Producción Arenal, y el bosque seco tropical con las otras siete parcelas ubicadas en la zona más baja de la microcuenca.

Es importante mencionar que según lo observado en los sitios de prueba, las parcelas experimentales ubicadas en el tipo de uso de suelo de bosque no corresponden a bosque primario virgen en ninguno de los casos. Por el contrario se trata de bosque secundario o intervenido y algunas áreas de regeneración de bosque establecidas por el ICE dentro de sus terrenos.

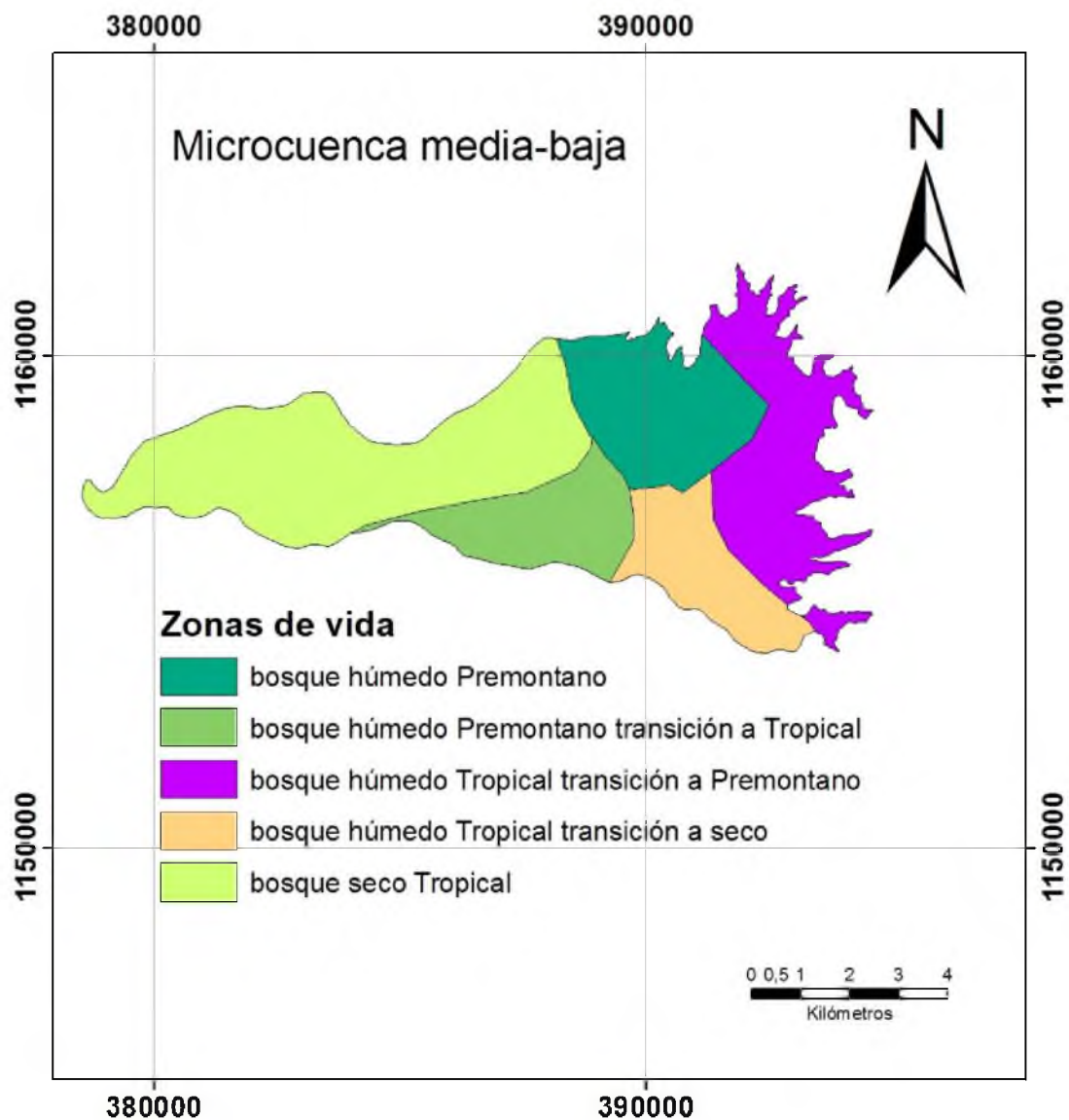


Figura 4.18. Zonas de vida de Holdridge presentes en el área de estudio.

Fuente: El autor.

4.4 Caracterización temporal

El fenómeno del niño es un proceso cíclico que afecta principalmente los países de América y Asia que poseen costas en el Océano Pacífico, su nombre es Oscilación del Sur El Niño. Este fenómeno se inicia en el Pacífico tropical, cuando los vientos alisios que soplan de este a oeste dejan de soplar o disminuyen, lo que provoca un cambio de

temperaturas entre el Pacífico americano y el asiático. Esto provoca una disminución en la presión atmosférica en América de Sur y un aumento de la presión en el sureste asiático. Este cambio ocurre en su totalidad en un lapso de seis meses, generalmente de Junio a Noviembre.

En la Vertiente Pacífica el fenómeno del Niño provoca una disminución substancial de las lluvias, con un aumento de hasta 60 días sin lluvia en el Pacífico Norte y Central con respecto a la estación lluviosa normal. Bajo el efecto de El Niño las lluvias inician la última semana de mayo, se interrumpen a mediados de junio, retornando a sus valores normales en setiembre. (Vega y Stolz, 1999)

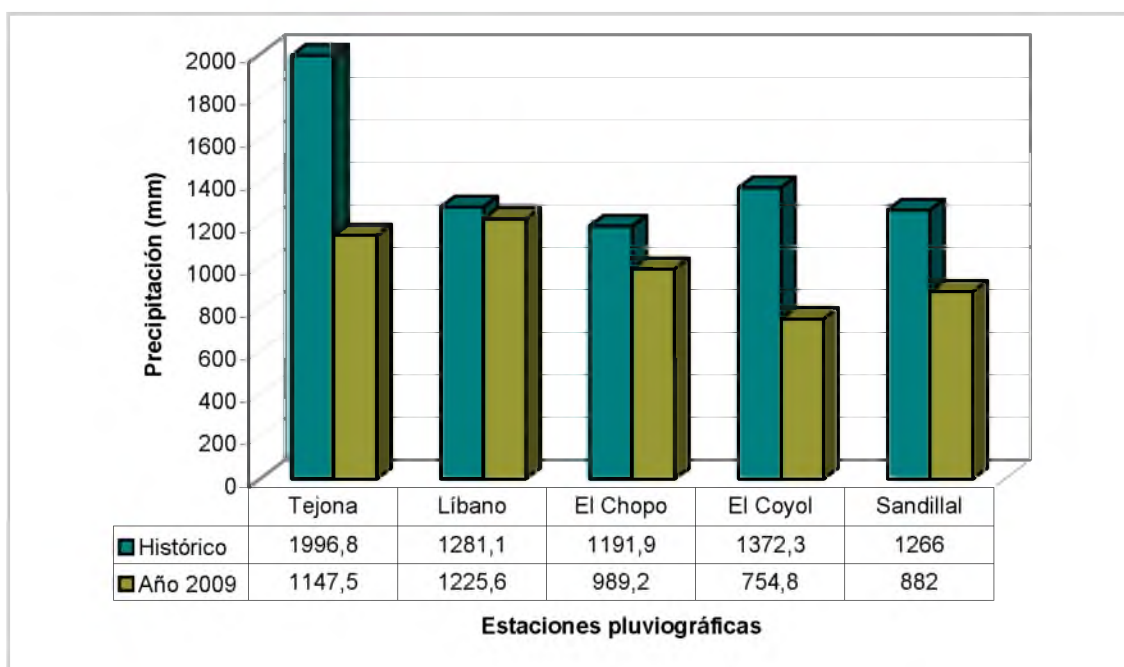


Figura 4.19. Precipitación en los meses de junio a diciembre en el 2009 y promedio histórico correspondiente al mismo periodo de las estaciones meteorológicas en el área de influencia del estudio.

Fuente. Meteorología, ICE.

La Figura 4.19 muestra la precipitación acumulada durante los meses de junio a diciembre del año 2009 y la precipitación acumulada histórica para los mismos meses, de las cinco estaciones meteorológicas con registros disponibles dentro del área de influencia de la microcuenca media – baja del río Santa Rosa.

Se nota que en todos los casos hubo una disminución de las precipitaciones para el periodo de estudio, lo cual podría ser debido al efecto del fenómeno del Niño. Es importante mencionar que el efecto de este fenómeno en la zona incide también en una reducción importante en las lluvias del mes de mayo, que no se considera dentro de el lapso analizado.

La caída de las precipitaciones en el 2009 ocasionó que la cantidad de material erosionado en la microcuenca no sea el que puede esperarse para un año con precipitaciones normales o en el promedio. Sin embargo, esta circunstancia no afecta los objetivos del estudio, pues ante un número reducido de precipitaciones casi cada evento que ocurra se puede relacionar directamente con el material recolectado en las parcelas experimentales.

4.5 Pastos

4.5.1 Caracterización

La identificación de la textura del suelo de cada una de las parcelas experimentales se realizó personalmente a partir de las submuestras recolectadas semanalmente. Se encontró que el suelo de las parcelas microcuenca media-baja tiene suelos de textura variada: franco arcillo limoso, franco limoso y franco arcilloso. Todas las parcelas de pastos están ubicadas en suelos del orden de los inceptisoles.

El área de pastos de estas zonas se utiliza exclusivamente bajo un sistema de ganadería extensiva para carne, con apartos de gran tamaño. La cobertura no alcanza el 100% en todos los sitios, el establecimiento de los pastos no logra completarse debido a malas prácticas agrícolas aplicadas a la finca tales como exceso de carga animal, apartos de gran tamaño o nulo en las fincas y falta de fertilización adecuada. Condiciones climáticas como un periodo seco muy prolongado inciden también en el crecimiento del pasto.

La Figura 4.20 ilustra las diferentes condiciones de cobertura que presentan algunas de las parcelas experimentales ubicadas en este sector. En la Tabla 4.3 se muestran las principales características de estas parcelas como tipo de pasto y porcentaje aproximado de cobertura durante el periodo de prueba.

Tabla 4.3. Características generales de las parcelas de pasto ubicadas en la cuenca media baja.

Fuente: El autor.

PENDIENTE DE LA PARCELA	0 - 15 %			15 - 30 %			30 - 45 %		
TEXTURA DEL SUELO	Franco limoso	Franco limoso	Franco arcillo limoso	Franco limoso	Franco arcilloso	Franco arcilloso	Franco limoso	Franco arcilloso	Franco limoso
NOMBRE DE LA PARCELA	P 0-15 MC1	IE 0-15-1	IE 0-15-2	P 15-30 C1	P 15-30 C2	P 15-30 C3	MC 30-45	P 30-45 C1	P 30-45 C2
ÁREA (m ²)	1362,1	1651,7	2179,2	7387,4	823,3	986,6	2622,7	1488,1	975,1
PASTO (<i>Brachiaria brizantha</i>)	cobertura del 100% con buen desarrollo foliar	cobertura del 85% con bajo desarrollo foliar	cobertura del 100% con bajo desarrollo foliar	cobertura del 100% con bajo desarrollo foliar	cobertura del 95% con bajo desarrollo foliar	cobertura del 100% con bajo desarrollo foliar	cobertura del 95% con alto desarrollo foliar	cobertura del 90% con bajo desarrollo foliar	cobertura del 90% con bajo desarrollo foliar

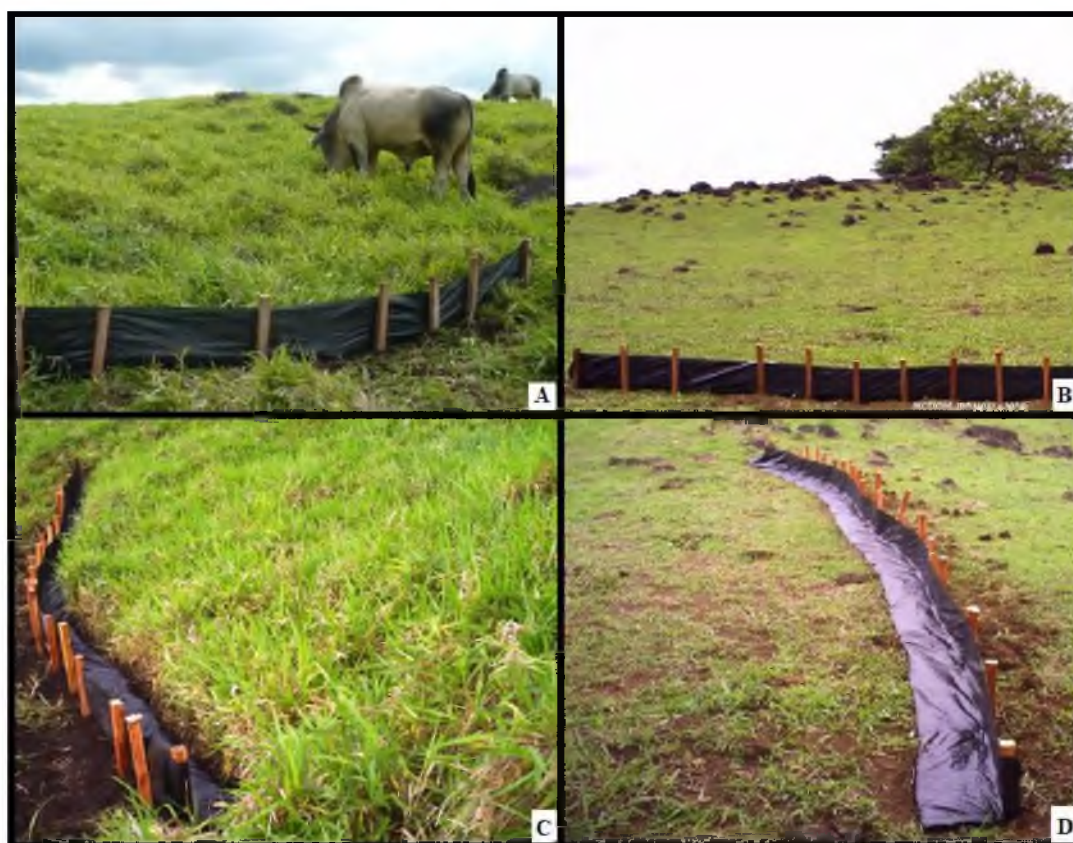


Figura 4.20. A) Cobertura del 100% con buen desarrollo, parcela P 0-15 MC1. B) Cobertura del 100% con bajo desarrollo foliar, parcela IE 0 – 15 - 2. C) Cobertura del 95% con buen desarrollo foliar, parcela MC 30-45. D) Pasto con bajo desarrollo foliar, parcela IE 0-15-1.

Fuente: El autor.

En algunas de las fincas se han encontrado zonas carentes de cobertura durante todo el año y bordes de los caminos internos con inestabilidad, en los cuales se han formado surcos y cárcavas permanentes que son indicativo importante de signos de erosión, como se ejemplifica en la Figura 4.21.

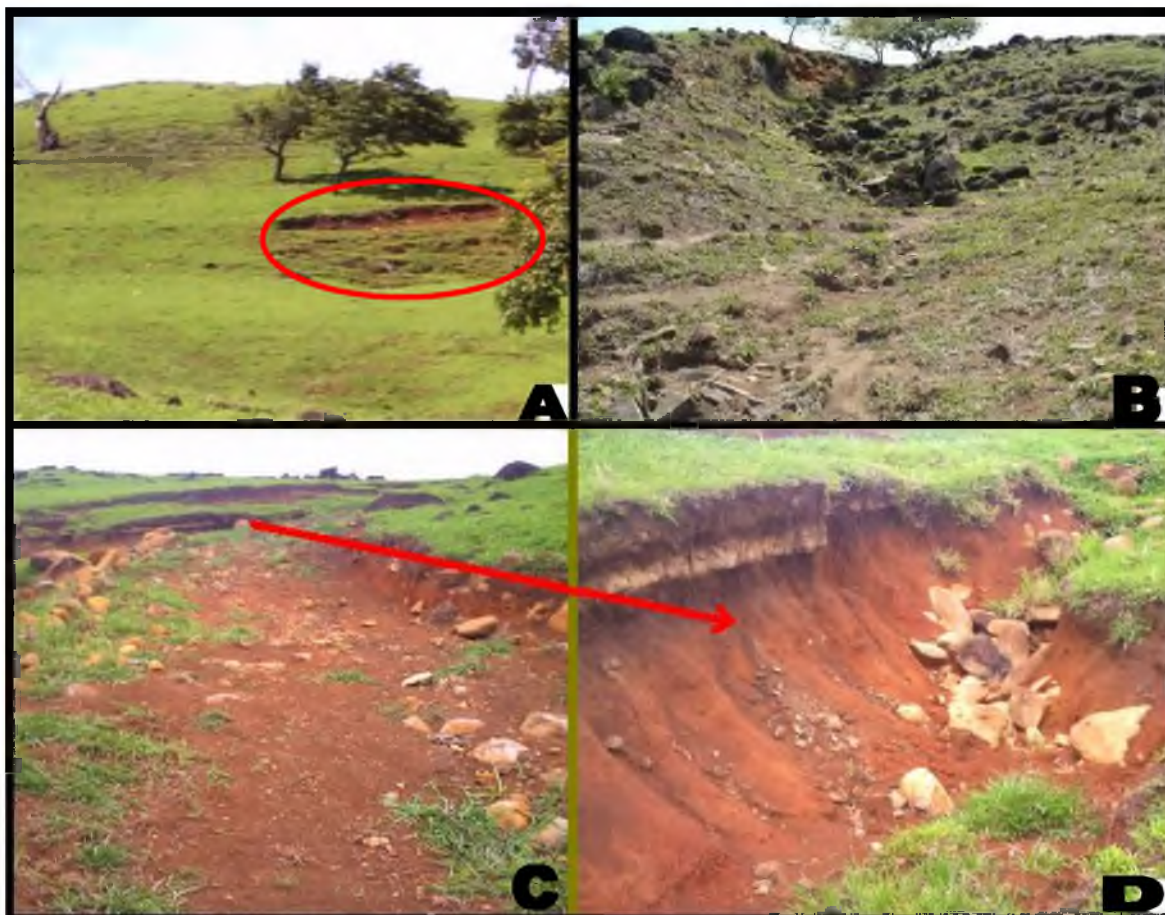


Figura 4.21. Evidentes síntomas de erosión en fincas de la microcuenca media-baja. A) Proceso de reptación. B) Curso de agua estacional sin protección alguna generando una cárcava. C) Camino interno dentro de una finca sin estructuras hidráulicas de protección que ha originado canales en el borde del camino y socavamiento de los taludes. D) Ampliación de surco formado al lado del camino.

Fuente: El autor.

La recolección de sedimento se extendió por un periodo de cinco a seis meses, dependiendo de la fecha de instalación de la geomembrana en cada parcela experimental, abarcando la época lluviosa de la zona. Los valores encontrados se acumularon a lo largo de este tiempo, para presentar totales por parcela, condiciones combinadas de uso-

pendiente y finalmente evaluando sólo la cobertura. La escala temporal definida para los gráficos de energía vs sedimento acumulado está en función de las fechas en que se visitaron las parcelas. De las nueve parcelas instaladas, en tres no se recogió sedimento, ubicadas dos en pendiente de 0% - 15% y una en pendiente 15% - 30%.

Durante las pruebas realizadas con el penetrómetro se encontraron valores entre 400 y 420 N/cm² en la superficie del terreno, que aumentaron considerablemente a profundidades de 20 a 30cm, con valores entre 540 y 560 N/cm².

4.5.2 Parcelas con pendiente de 0% - 15%

El comportamiento general de las parcelas ubicadas en suelos bajo cobertura de pastos es de nula a muy baja producción de sedimentos.

La parcela IE **0-15-1** es un caso particular, debido a que su cobertura no es completa, presentando alrededor de un 15% de suelo expuesto. La cantidad de pasto no varió apreciablemente durante la época lluviosa. Además la parcela forma parte de un potrero de gran extensión, el cual no se dejó de utilizar en los meses evaluados. Este uso prolongado, sumado a las condiciones climáticas de la zona, es el que provoca que, a pesar de que se tiene una variedad de pasto de alta producción de biomasa, éste no pueda establecerse adecuadamente.

La Figura 4.22 muestra la variación en la producción de sedimentos en función de la energía de la precipitación durante el ciclo de prueba. Sobre el eje “x” se ubica la variable independiente que corresponde a la energía, la cual presentó mucha variabilidad a lo largo de todo este lapso. La pendiente de la gráfica indica el efecto directo del impacto de la gota de lluvia sobre las fases del proceso erosivo.

Se puede apreciar que al inicio del estudio y durante las primeras recolecciones de sedimento la pendiente es muy fuerte, lo cual indica que valores de energía bajos contribuyen a que se sedimente una cantidad importante de suelo. A lo largo de la época lluviosa la pendiente de la gráfica va disminuyendo, lo que indica que se requiere de

mayores valores de energía para desprender y arrastrar en sedimento hasta la geomembrana.

Esta variación en la relación entre las dos variables muestra que al inicio de las lluvias se requiere menor energía para desprender y/o arrastrar las partículas de suelo por escorrentía, lo cual puede ser debido a que durante la temporada seca el suelo en su parte superficial está formado por pequeños agregados de polvo, con poca estructura, que se desprenden en mayor cantidad debido al paso del ganado, lo que conlleva a su mayor vulnerabilidad. Las primeras precipitaciones remueven la mayor parte de esas partículas tan susceptibles.

Durante la prueba se presentaron periodos en los que el proceso erosivo dominante fue el desprendimiento o lapsos en los cuales la energía total de los eventos de precipitación, tanto erosivos como no erosivos, no fue suficiente para transportar el suelo por lo que no hubo recolección de material erosionado. Esta situación se refleja en los segmentos de la grafica que presentan pendiente igual a cero.

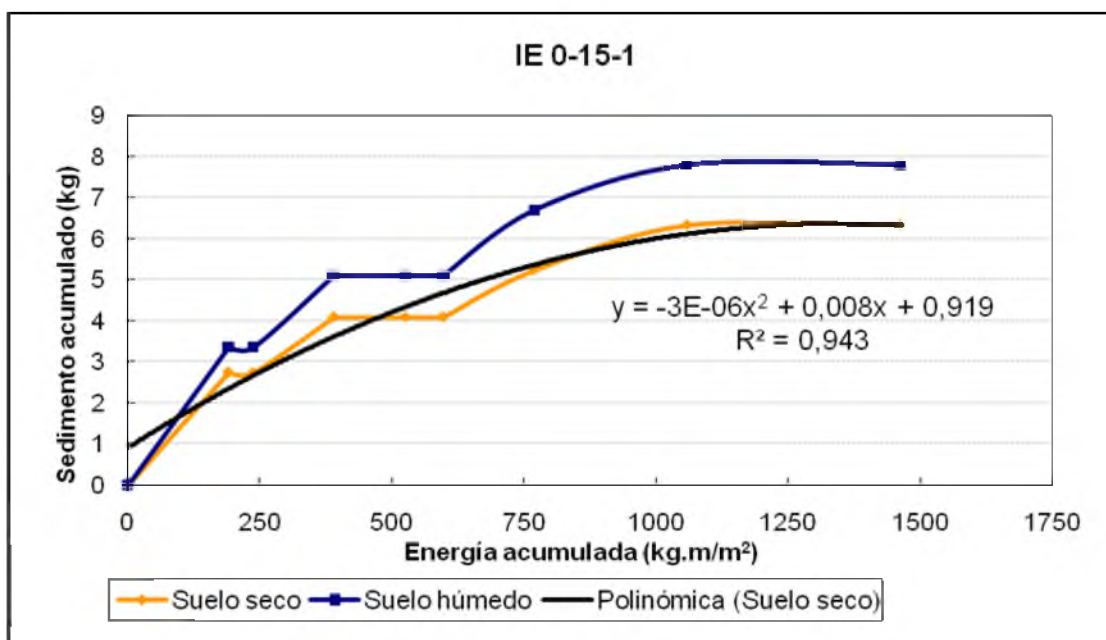


Figura 4.22. Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela IE 0-15-1.

Fuente: El autor.

Como muestra la Figura 4.22 la energía acumulada en la estación del Chopo para el periodo de prueba en esta parcela fue de $1\,463\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$. En total se recolectaron 5,2 kg de sedimento seco, en la geomembrana IE 0-15-1. Esto hace que la tasa de pérdida de suelo en esta parcela sea de 0,03 ton/ha

La parcela **IE 0-15-2** se encuentra ubicada en la misma finca que la parcela IE 0-15-1, sin embargo presenta cobertura completa de pasto y gran cantidad de piedras principalmente en su parte alta, además se encuentra al lado del límite de la propiedad lo cual provoca que el paso de ganado por esa zona no sea frecuente. Estas características combinadas hacen que no se genere erosión o que el movimiento del suelo a lo largo del terreno sea muy lento. Debido a estas características no se encontró suelo sobre la geomembrana durante ninguno de los muestreos semanales.

Por su parte la parcela experimental **P 0-15 MC1** forma parte de un terreno dedicado a la producción ganadera muy bien cuidado, con un establecimiento y desarrollo del pasto excelente, como se aprecia en la Figura 4.20 A. Durante las visitas semanales se comprobó que como parte de su manejo se realizan rotaciones periódicas de ganado entre los diferentes potreros, además se fertiliza con cierta frecuencia, evitando de esta manera el agotamiento de los mismos y garantizando una cobertura adecuada durante todo el año.

Estas distintas condiciones entre las parcelas evidencian la importancia que tiene el manejo adecuado de los terrenos productivos, a través de un cálculo apropiado de la carga animal que se puede mantener y buenas prácticas de manejo con énfasis en la protección del suelo y disminución de la erosión para lograr una producción sostenida durante todo el año. La Figura 4.6 muestra las cantidades acumuladas de suelo seco y húmedo para cada una de las parcelas ubicadas en pastos de 0% - 15%. Además se evidencia de los resultados obtenidos en las parcelas de pasto con pendientes más bajas que adicionalmente al tipo de cobertura vegetal, el porcentaje de cobertura sobre el suelo influye en el efecto protector que ejerce, lo cual indica que debe ser una variable importante a tomar en cuenta en estudios de esta naturaleza.

Debido a la particularidad de la parcela IE 0-15-1, el promedio de la tasa erosiva en los potreros con pendiente de 0% - 15% es de 0,01 ton/ha lo cual es prácticamente nulo o imperceptible. Esto da un total de 14,3 toneladas de suelo para las zonas en la cuenca baja

que cumplen con estas condiciones de uso y cobertura que corresponden a una superficie total de 1 354 ha. Los valores de masa de suelo erosionado para estas parcelas se muestran en la Figura 4.23.

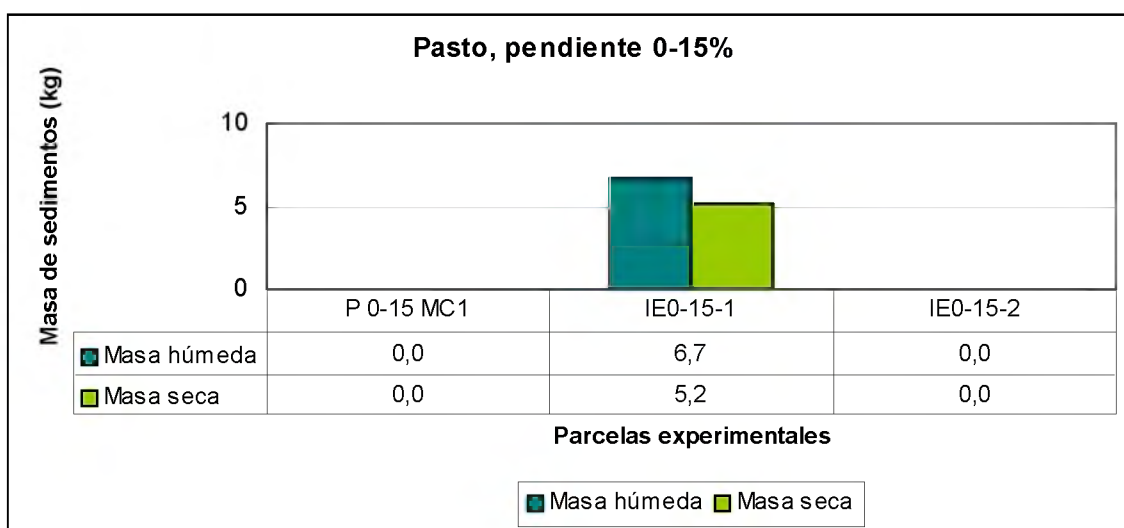


Figura 4.23. Resultados obtenidos en las parcelas de pasto con pendiente de 0% - 15%.

Fuente: El autor.

4.5.3 Parcelas con pendiente de 15% - 30%

Las parcelas sobre uso de suelo de pastos con este rango de pendientes se ubicaron en una sola finca, por lo que las condiciones de carga animal y manejo no varían entre ellas. En este caso la similitud entre la cobertura del pasto sobre la zona de prueba fue alta, entre 95 y 100%.

A pesar de que sí se evidenció pérdida de suelo, en las dos parcelas que presentaron erosión el sedimento se recolectó solamente una vez, como el resultado de una acumulación importante de energía, por lo que no existe la posibilidad de graficar un comportamiento de la tasa erosiva en correspondencia con la precipitación o la energía. La parcela **P 15-30 C1** no registró ninguna muestra de suelo sobre la geomembrana.

Se recolectaron en total 2,4 kg de sedimento para ambas parcelas. Los valores de cada una se muestran en la Figura 4.24. En promedio, se encontró una producción de 0,01

ton/ha, el mismo encontrado en la zona con cobertura de pastos y pendiente de 0% - 15%. Sin embargo, debido a que su área total en la microcuenca media – baja es mucho menor al de pastos con pendientes iguales o menores al 15% (755 ha), se estima que los terrenos cubiertos de pasto con pendiente de 15% - 30% producen sólo 7 ton de sedimento seco.

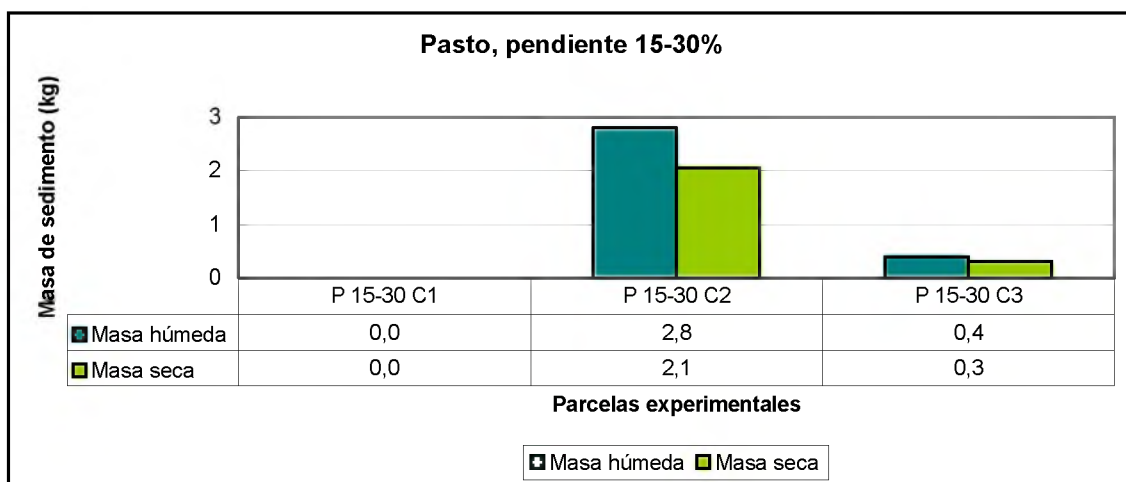


Figura 4.24. Resultados obtenidos en las parcelas de pasto con pendiente de 15% - 30%.

Fuente: El autor.

4.5.4 Parcelas con pendiente de 30% - 45%

Las parcelas experimentales ubicadas dentro de este rango de pendientes se ubicaron dentro de un área cercana, sin embargo al pertenecer a dos fincas distintas las condiciones de cobertura y manejo varían.

Los terrenos con uso de pasto con pendientes entre 30% - 45% sí presentaron erosión en todos los casos, sin embargo, los valores encontrados continúan siendo muy bajos, con un máximo del orden de 12 kg y la cantidad de periodos en los cuales se produjo pérdida de suelo comprobable a través de su acumulación sobre la geomembrana fue baja en todas las parcelas.

El sitio de la microcuenca media-baja con cobertura de pastos y pendiente entre 30% - 45% que se puede caracterizar de manera más adecuada es la parcela **P 30-45 C1**, donde se recolectó sedimento en cuatro oportunidades.

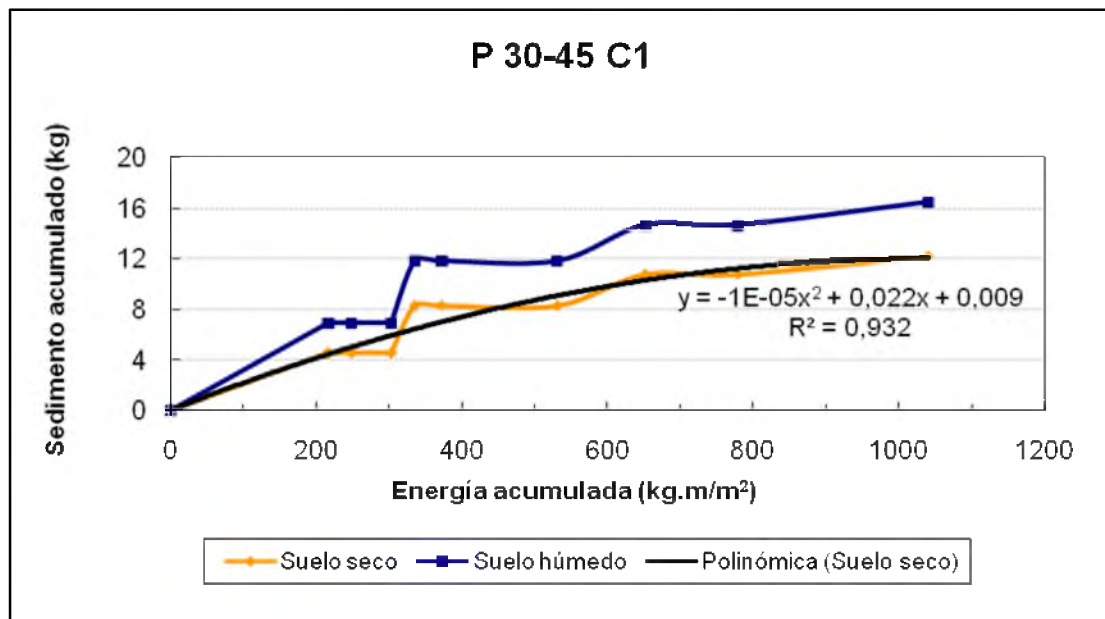


Figura 4.25. Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela P 30-45 C1.

Fuente: El autor.

La parcela **P 30-45 C1** tiene como estación pluviográfica más cercana Coyol, en la comunidad de Los Ángeles, que presentó un acumulado de energía de 1 040 kg·m/m², aunque se debe mencionar que hace falta el registro de casi todo el mes de Julio por problemas en la estación, lo que trae consigo pérdida de información de la energía, por lo que el valor real de la energía total acumulada es mayor al presentado. A pesar de esto se muestra la misma tendencia que en las parcelas de pasto anteriores, con un aumento en la energía necesaria para producir erosión al final de la época lluviosa, indicada por el cambio en la pendiente de la gráfica.

En el caso particular de esta parcela experimental se presentó además un leve aumento en su cobertura vegetal del pasto como resultado de las lluvias, lo que introduce un factor adicional en la relación entre energía y erosión, ya que la protección del suelo aumentó al final del periodo de estudio. Además se puede apreciar que después de cada etapa de correspondencia entre energía de la precipitación y producción de sedimentos aparece un periodo de cero erosión, en el que toda la energía de la lluvia se consume en el

proceso de desprendimiento. En total se recolectaron poco más de 12 kg de suelo seco en esta parcela.

La parcela **P 30-45 C2** presentó sedimento acumulado en su geomembrana sólo una vez y en cantidad muy baja. Su cobertura vegetal se mantuvo muy bien a lo largo de la duración de la prueba y se dio rotación del ganado en la zona. Sin embargo, a pesar de esto y de la excelente variedad de pasto sembrada (*Brachiaria brizantha*) el desarrollo del follaje no llegó a un nivel óptimo. La estación de influencia para medir la precipitación que se dio en esta parcela es Quebrada Lavas, no obstante, debido a problemas de vandalismo y robo, gran cantidad de la información que pudo generar no se logró, así que se utilizó la estación del Coyal que igualmente se encuentra a poca distancia.

Finalmente, la parcela **MC 30-45** a pesar de su gran extensión superficial sólo presentó acumulación de sedimento en la geomembrana una vez. Pertenece a la misma finca que la parcela experimental P 0-15 MC1 y tiene también un muy buen desarrollo foliar del pasto, debido en gran parte a las adecuadas medidas que se implementan en materia de fertilización y rotación, como ya se mencionó.

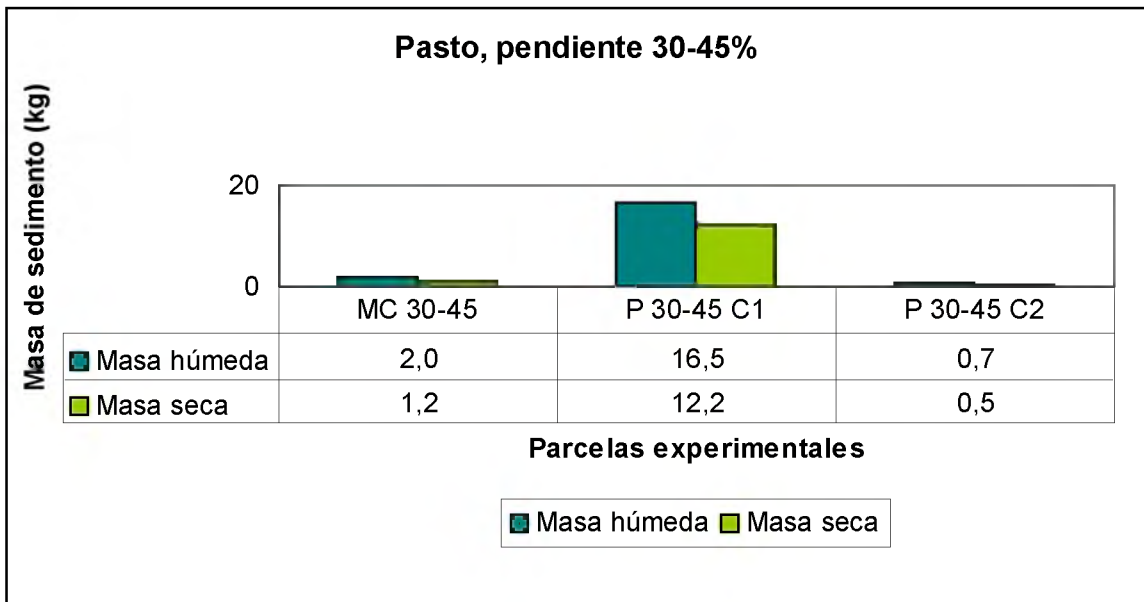


Figura 4.26. Resultados obtenidos en las parcelas de pasto con pendiente de 30% - 45%.

Fuente: El autor.

En total, las parcelas evaluadas en pasto con pendiente entre 30% - 45% generaron casi 14 kg de sedimento seco, distribuido como se muestra en la Figura 4.27, para una media de 0,03 ton/ha. Esta pequeña cantidad, significa que los potreros de la microcuenca media-baja con este rango de pendiente produjeron en total alrededor de nueve toneladas de sedimento en sus 293 ha.

Tabla 4.4. Valores totales encontrados para las parcelas de pasto en la microcuenca media-baja.

Fuente: El autor.

Pendiente (%)	Parcela	Área (m ²)	Suelo recolectado (kg)	Erosión (ton/ha)	Promedio (ton/ha)	Área total (ha)	Sedimento total (ton)
0-15	P 0-15 MC1	1362,1	0,0	0,00	0,01	1354	14,3
	IE0-15-1	1651,7	5,2	0,03			
	IE0-15-2	2179,2	0,0	0,00			
15-30	P 15-30 C1	7387,4	0,0	0,00	0,01	755	7,1
	P 15-30 C2	823,3	2,1	0,03			
	P 15-30 C3	986,6	0,3	0,00			
30-45	MC 30-45	2622,7	1,2	0,01	0,03	293	9,0
	P 30-45 C1	1488,1	12,2	0,08			
	P 30-45 C2	975,1	0,5	0,01			
15-30	IE ESTU	835,0	1786,3	21,4	0,1	0,1	2,8

Como se observa en la Tabla 4.4 la tasa erosiva y la estimación de los totales de sedimento producidos durante la época lluviosa del año 2009 en pastos con pendiente de 0% - 30% es casi imperceptible y con pendiente entre 30% - 45% muy baja por lo que su aporte corresponde a una mínima porción de la cantidad estimada de 1 000 000 de toneladas métricas para el año 2007 en embalse Sandillal. Esta tasa erosiva corresponde a lo que la caracterización de la FAO define como erosión leve (0 ton/ha/año - 10 ton/ha/año). En la parte baja de la microcuenca del río Santa Rosa, las zonas de pasto con pendientes entre 0% - 45% y en condiciones normales de cobertura, produjeron un total de 30 toneladas de sedimento seco.

4.6 Bosques

4.6.1 Caracterización

Las áreas de bosque en la parte baja de la microcuenca presenta un desarrollo vegetativo característico de un bosque tropical seco, bosque húmedo premontano transición a tropical y bosque húmedo tropical transición a seco. Estos son bosques con baja densidad foliar y una capa superficial de materia orgánica de regular a escasa como se muestra en la Figura 4.27. Las parcelas experimentales no se ubicaron en bosque primario, si no en zonas de bosque secundario o intervenido y en terrenos del ICE dedicados a la regeneración. La textura de los suelos se determinó mediante submuestras del sedimento recolectado y se encontró suelos desde francos, con buen porcentaje de materia orgánica hasta arcillo arenosos.



Figura 4.27. Condiciones del bosque tropical seco ubicado en propiedad ICE, cerca del embalse Sandillal.

Fuente: El autor.

Los promedios de lluvia anuales en esta zona son considerablemente más bajos que los presentados en la parte media alta de la microcuenca, estableciendo una diferencia estacional muy marcada donde el periodo seco se extiende de tres meses y medio a seis meses.

Las pruebas con el penetrómetro brindaron datos de 360 a 400 N/cm² desde la superficie hasta una profundidad de 5 cm, y de 420 a 500 N/cm² hasta una profundidad de 20 cm, máxima en la que se pudo evaluar la compactación del suelo. Esto demuestra una mayor uniformidad en la estructura del suelo en el bosque, que la encontrada en los pastos.

Además a profundidades mayores el suelo del bosque demuestra estar menos compactado que el de los pastizales. En las parcelas experimentales ubicadas bajo cobertura de bosque se obtuvo resultados en todas las parcelas experimentales. Para la obtención de resultados y su respectivo análisis se utilizó el mismo procedimiento que en las zonas cubiertas de pasto.

4.6.2 Parcelas con pendiente de 0% a 15%

Las parcelas con pendientes de 0% -15% se ubicaron en las cercanías del Centro de Producción Arenal y el embalse Sandillal, las cuales presentan buena cobertura de árboles en los tres casos.

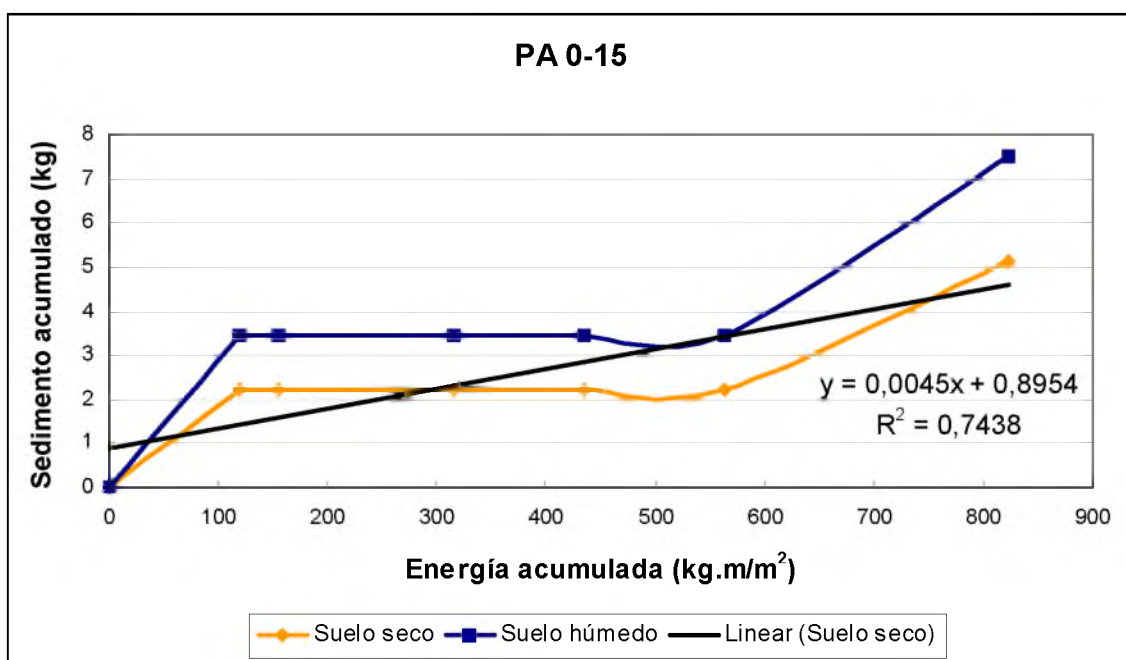


Figura 4.28. Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela PA 0-15.

Fuente: El autor.

En la parcela **PA 0-15** ubicada cerca del Centro de Producción Arenal, sólo se recogió sedimento en dos oportunidades. El orden de suelo sobre el que se colocó esta parcela es el de los inceptisoles y su zona de vida es el bosque húmedo premontano.

El gráfico en la Figura 4.29 representa la variación del fenómeno erosivo y la energía de la precipitación en esta parcela. Al igual que otras parcelas, la información para calcular la lluvia que se precipitó sobre su área de estudio corresponde a la registrada en la estación Quebrada Lavas, pero, a causa de los problemas ya citados, se utilizó la información registrada por la estación del Coyol, debido a su cercanía con el área de estudio.

El comportamiento general en esta parcela es que la pérdida de suelo sólo responde a cambios o acumulación de cantidades importantes de precipitación. Se requirió de $119 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ para desprender y mover los primeros 2 kg de sedimento hasta la geomembrana, pero a partir de ese punto, la energía se acumula en gran cantidad, principalmente mediante precipitaciones erosivas de poca energía con sólo tres eventos importantes: el 5 de Octubre ($102 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$), el 9 de Octubre ($89 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$) y el 5 de noviembre ($71 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$), datos que se muestran en el Anexo B. La mayor parte de esta energía (que no incide directamente sobre el suelo, sino sobre el dosel del bosque, donde las gotas se reagrupan en otras más grandes) se transmite al suelo y genera sólo el proceso de desprendimiento, ya que debido a su pendiente, el movimiento de las partículas desprendidas es lento, lo que hace que se presente ese desfase entre energía y erosión.

Debido a esto en muchas parcelas de bosque la relación entre estas dos variables no es directa. A veces el suelo se encuentra suelto, listo para ser arrastrado por escorrentía o en mayor medida por salpicadura, y cuando esta etapa finaliza, se requieren grandes cantidades de energía para desprender nuevo suelo y moverlo gradualmente pendiente abajo. Además, cabe destacar que en las parcelas de bosque la erosión por salpicadura fue el proceso dominante, situación que se comprobó en el campo por la capa de partículas de suelo desprendidas que quedaba en ambas caras de la geomembrana después de eventos importantes de precipitación. La energía total acumulada fue de $824 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ la cual generó una masa de suelo seco de poco más de 5 kg.

La parcela **PS 0-15 1**, ubicada a la orilla del embalse Sandillal presenta muy buena cobertura en el dosel y principalmente excelente presencia de materia vegetal muerta sobre el suelo, condiciones que incidieron en que sólo se recogieran 0,7 kg de suelo seco, durante la desinstalación de la geomembrana. La estación pluviográfica más cercana es Sandillal,

donde se registró una energía acumulada de $528 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$, durante la duración de la prueba, la menor cantidad entre todas las estaciones utilizadas.

La parcela PS 0-15-3, se localizó a orillas del río Santa Rosa, muy cerca del puente que comunica Tilarán con Cañas, sobre la ruta nacional 142. A lo largo del periodo analizado en el estudio, siguiendo la pendiente de la gráfica de la Figura 4.29 se muestra que la energía requerida para realizar todo el conjunto del proceso erosivo presenta mucha variabilidad, con dos periodos bien marcados de desprendimiento como el principal proceso erosivo.

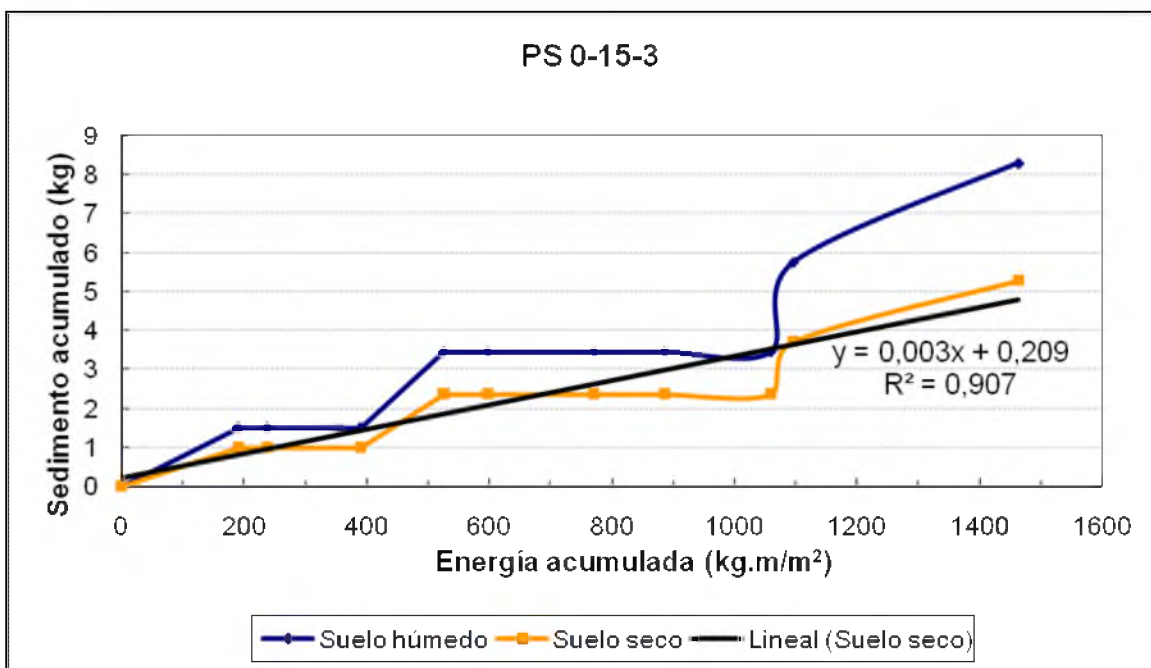


Figura 4.29. Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela PS 0-15-3.

Fuente: El autor.

Los registros de precipitación utilizados son los de la estación del Chopo ubicada muy cerca de la parcela, en el margen opuesto del río Santa Rosa. A pesar de que acumuló una energía de casi $1\ 463 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ el total de sedimento seco recogido fue de 5,3 kg.

Cabe destacar que en esta parcela se encontró evidencia de la gran importancia de la erosión por salpicadura, pues la geomembrana presentó una capa fina de suelo trasladado por el salpique de las gotas de lluvia durante todas las semanas, además, a pesar de la

cantidad de suelo recogido, no se encontró evidencia de escorrentía superficial en la superficie del suelo, en su mayor parte cubierto por gran cantidad de enredaderas y hojas secas.

En total en las parcelas de bosque con pendiente de 0% - 15% se recolectaron 11 kg de sedimento seco, con una producción media de 0,07 ton/ha. Esto significa que la producción de sedimento en el total de la superficie de bosque que cumple estas condiciones de pendiente es de 38 toneladas.

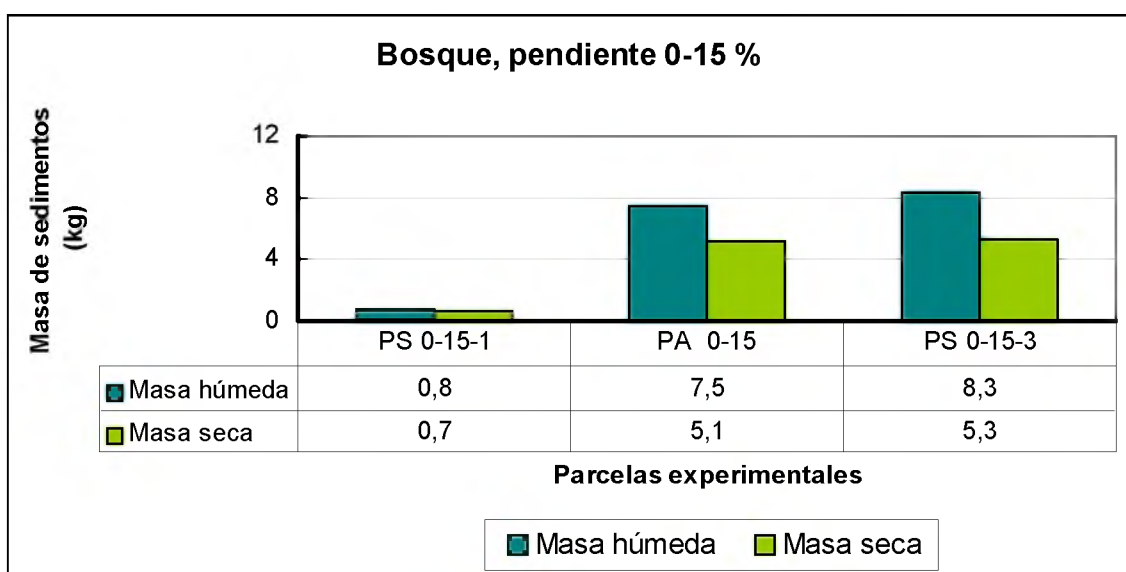


Figura 4.30. Pérdida total de suelo en las parcelas experimentales de bosque en pendiente de 0% -15%.

Fuente: El autor.

Como se observa en la Figura 4.30 a pesar de que existe variabilidad entre las parcelas experimentales, en esta zona se presenta baja erosión, según lo esperado debido a su cobertura y pendiente suave. Sin embargo los resultados encontrados muestran mayor vulnerabilidad al desprendimiento del suelo en bosque que en pasto bajo las mismas condiciones de pendiente.

4.6.3 Parcelas con pendiente de 15% a 30%

Las parcelas de bosque con pendientes entre 15% - 30% se colocaron cerca de los Centros de Producción Arenal y Miguel Pablo Dengo y el embalse Sandillal. La distribución de la cobertura fue variable, presentando una mejor condición en las parcelas PA 15-30 y PS 15-30-2. La parcela PA 15-30 está ubicada sobre un suelo del orden de los inceptisoles, mientras que las otras dos parcelas experimentales se encuentran sobre alfisoles.

La parcela **PA 15-30** es similar a la parcela PA 0-15, en cuanto a tipo de cobertura vegetal, ya que por su cercanía ambas están dentro de la zona de vida bosque húmedo premontano. Así mismo, su tasa erosiva fue baja, con gran cantidad de energía acumulada y muy poco suelo removido.

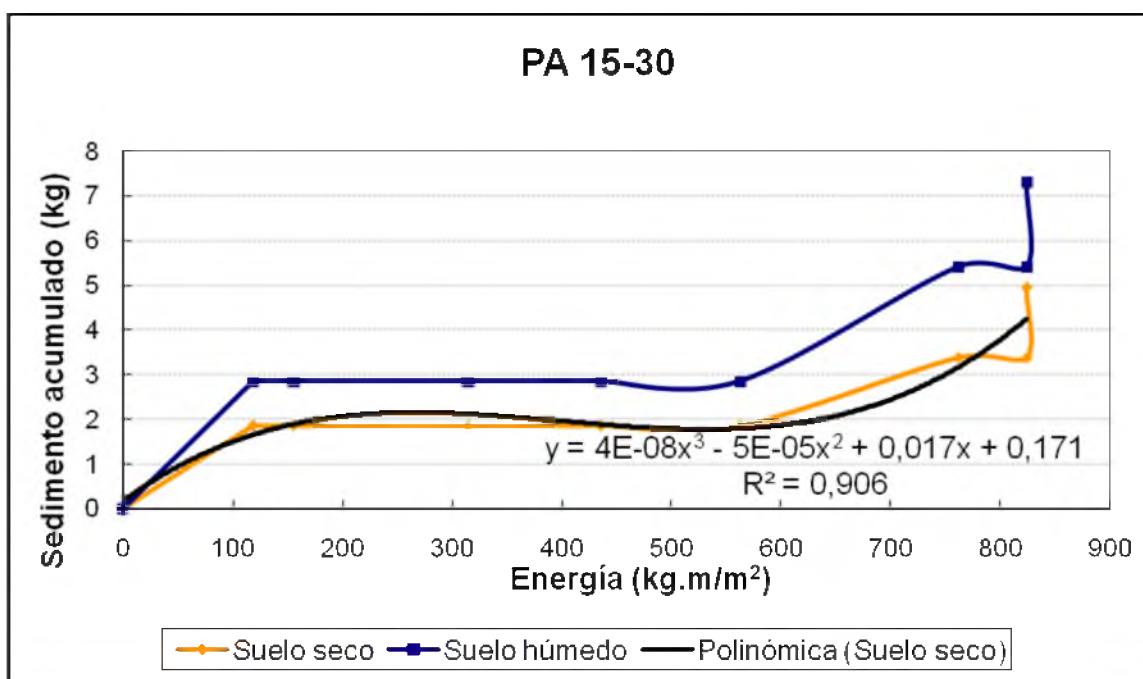


Figura 4.31. Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía acumulada de la lluvia para la parcela PA 15-30.

Fuente: El autor.

La parcela PA 15-30, representada en la Figura 4.31, muestra una tendencia similar a la encontrada en la PA 0-15, con aumento constante de la energía y la erosión a lo largo

del periodo de estudio, sin embargo al final de la prueba se presenta una disminución de la energía de la lluvia, la cual no produce un descenso en la tasa erosiva. Esto demuestra que se da un proceso de desprendimiento muy superior al de transporte, y después de una tormentas erosivas con alta energía (4 de noviembre: $68 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ y 5 de noviembre $71 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$) quedó gran cantidad de partículas de suelo desprendido, vulnerables a las siguientes precipitaciones. En esta parcela, se encontró sedimento en la geomembrana en tres fechas, por lo que la caracterización es un poco más precisa que en el caso de la parcela PA 0-15.

Como se observa en la Figura 4.31, se requirió de $119 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ para remover los primeros 2 kg de suelo seco, punto donde comienza un proceso de desprendimiento en el cual la precipitación produce una energía acumulada que llega hasta los $563 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$. A partir de este valor la energía acumulada por las lluvias erosivas se refleja en una producción de sedimentos a una tasa similar a la encontrada al inicio de la prueba hasta llegar a los $752 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ que corresponde al inicio de un nuevo periodo de desprendimiento.

La parte final de la gráfica es importante, donde se ve un gran cambio en la producción de sedimento con un ligero aumento en la energía. Este fenómeno se explica debido a la gran cantidad de suelo desprendido previamente, y que sólo en parte se logró mover hasta la geomembrana con las precipitaciones anteriores. Por lo tanto, permanece aún buena parte del suelo ya desprendido, arrastrado hasta lugares cercanos a la geomembrana, pero sin llegar a ella, que se encuentran vulnerables a la energía de posteriores eventos para avanzar por la pendiente. Incluso puede haber cierta cantidad de suelo que aún requiera más energía y no se pudo cuantificar durante el estudio a pesar de que su desprendimiento sí se dio en ese lapso. En total, se recolectaron casi 5 kg de sedimento seco en esta parcela. Se utilizaron los registros de precipitación de la estación el Chopo.

La diferencia entre las dos parcelas ubicadas en las inmediaciones del Centro de Producción Arenal es mínima, mediante un análisis de varianza usando Tukey con 0,05, se obtiene que ambas se encuentran dentro del 5%, por lo que en la práctica se puede decir que sus resultados son iguales.

Durante el estudio la parcela PS 15-30-1 sólo generó erosión cuantificable en dos oportunidades, por lo que no se contó con información suficiente y adecuada para elaborar un grafico de su comportamiento erosivo. Ubicada cerca de la casa de máquinas del Centro de Producción Miguel Pablo Dengo B., posee una buena cobertura de árboles y una importante capa de materia vegetal muerta sobre el suelo. Presentó muy poca erosión por salpicadura, al contrario, en las oportunidades en que el sedimento llegó hasta la geomembrana, se encontró evidencia de escorrentía superficial en forma de pequeños surcos perpendiculares a la dirección de la pendiente. Su estación meteorológica para registro de lluvias fue Chopo, la energía acumulada fue de 1 463 kg·m/m². Se recogió una masa total de sedimento seco de 8,8 kg.

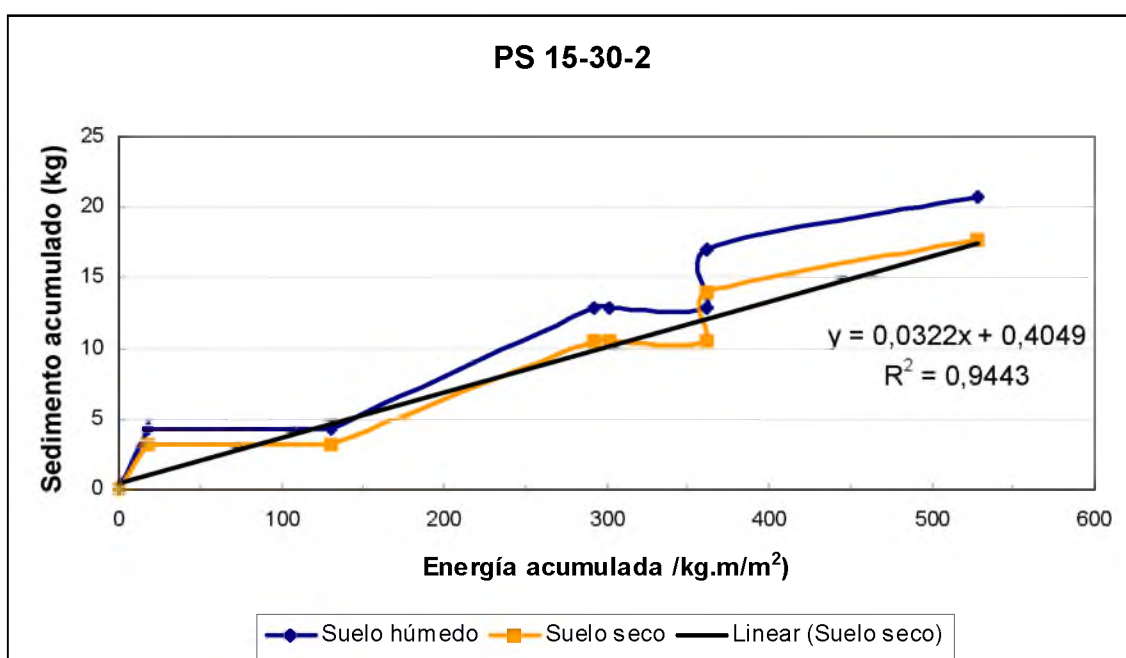


Figura 4.32. Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela PS 15-30-2.

Fuente: El autor.

La parcela experimental PS 15-30-2 ubicada cerca del embalse Sandillal presentó una característica especial dentro de las parcelas ubicadas dentro de la microcuenca media-baja. El comportamiento del porcentaje acumulado de sedimento generado por el área de prueba fue muy parecido al de la energía de la lluvia, aunque su relación particular varía a lo largo del periodo analizado. Cabe destacar que la estación Sandillal, fue la que evidenció una mayor disminución de la lluvia durante el periodo del estudio, volviendo a sus valores

normales hasta el mes de noviembre. En esta parcela experimental no se encontró evidencia de escorrentía superficial generada por la lluvia, por lo que la totalidad del sedimento encontrado fue desprendido y transportado por la acción directa de la gota de lluvia, conocido como erosión por salpicadura, condición que se ilustra en la Figura 4.33.



Figura 4.33. Erosión por salpicadura presentada en la geomembrana de la parcela experimental PS 15-30-2.

Fuente. El autor.

Como se muestra en la Figura 4.32 la parcela PS 15-30-2 la pendiente de la gráfica de energía vs erosión es similar en gran parte de su trazo, lo que indica que los periodos en que presentaron las fases de transporte y sedimentación, se tuvo una respuesta similar a la energía de la lluvia. Se nota además que con las primeras lluvias erosivas se comenzó a desprender y movilizar el suelo, sin requerir mucha energía. Al igual que en la parcela PA 15-30 se presentan dos periodos donde el desprendimiento del suelo es el proceso dominante, segmentos claramente identificables en la gráfica, con pendiente igual a cero que se localizan entre cada una de las fases de arrastre y sedimentación.

La tasa erosiva encontrada fue de 0,1 ton/ha, con un total de sedimento seco recolectado en las parcelas de poco más de 31 kg. En total, las zonas de bosque con pendiente entre 15% - 30% que corresponden a un área de 430 ha produjeron un estimado de 45 toneladas durante el periodo de prueba. La Figura 4.34 representa los totales de suelo acumulado estas parcelas.

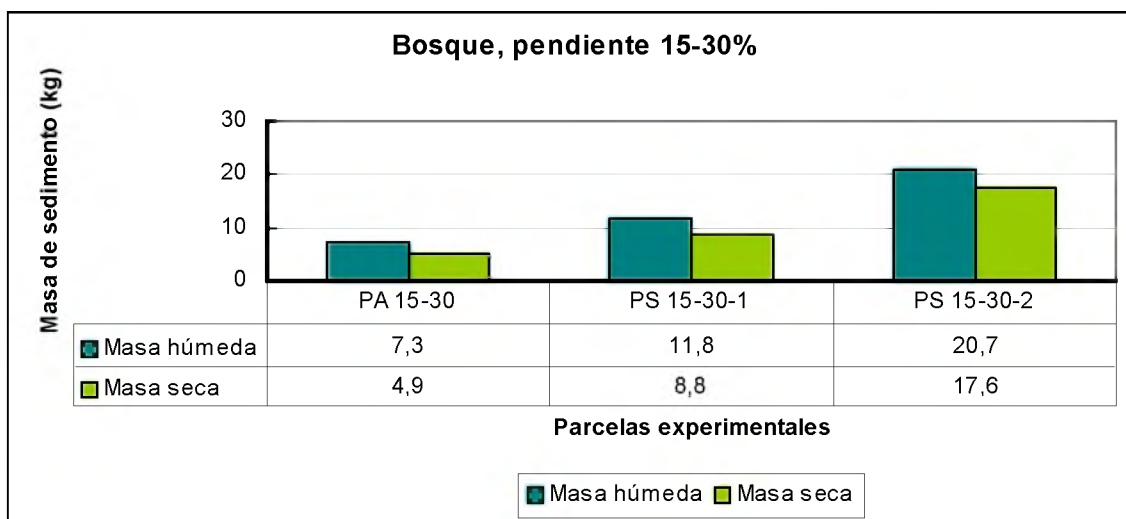


Figura 4.34. Pérdida total de suelo en las parcelas experimentales de bosque en pendiente de 15% -30%.

Fuente. El autor.

La producción de sedimento en las parcelas dentro de este rango de pendiente es mayor, en promedio, a la obtenida en las parcelas con pendiente de 0% - 15%. Esta diferencia es notoria para las parcelas ubicadas en los alrededores del embalse Sandillal, principalmente debido a condiciones de baja cobertura vegetal muerta sobre el suelo y la textura del suelo en esta zona que presenta contenidos de arcilla mayores, según las muestras tomadas para cada parcela experimental.

Además al analizar los datos obtenidos para los rangos de pendiente 0% - 15% y 15% -30% se observa que probablemente la condición combinada de suelos del orden de los inceptisoles y una zona de vida de bosque húmedo premontano hace que el terreno sea menos vulnerable al fenómeno erosivo, en comparación con la zona con bosque tropical seco, esto en gran parte debido a la excelente cobertura a nivel de dosel y sotobosque que presenta el bosque húmedo premontano.

4.6.4 Parcelas con pendiente entre 30% y 45%

Las parcelas con cobertura boscosa y pendiente de 30% - 45% se ubicaron totalmente en las cercanías del embalse Sandillal. La calidad y porcentaje de la cobertura boscosa a nivel del dosel varía entre parcelas, aunque la cobertura de arbustos, vegetación baja y materia vegetal sobre el suelo fue pobre, con excepción de la parcela PS 30-45-3.

Las parcelas ubicadas en bosque, con la pendiente más alta analizada presentaron mucha relación entre energía de la lluvia y erosión. La parcela experimental **PS 30-45-1** muestra un aumento continuo en la energía hasta mediados del mes de noviembre, que muestra el inicio de la temporada seca en la región pacífico norte.

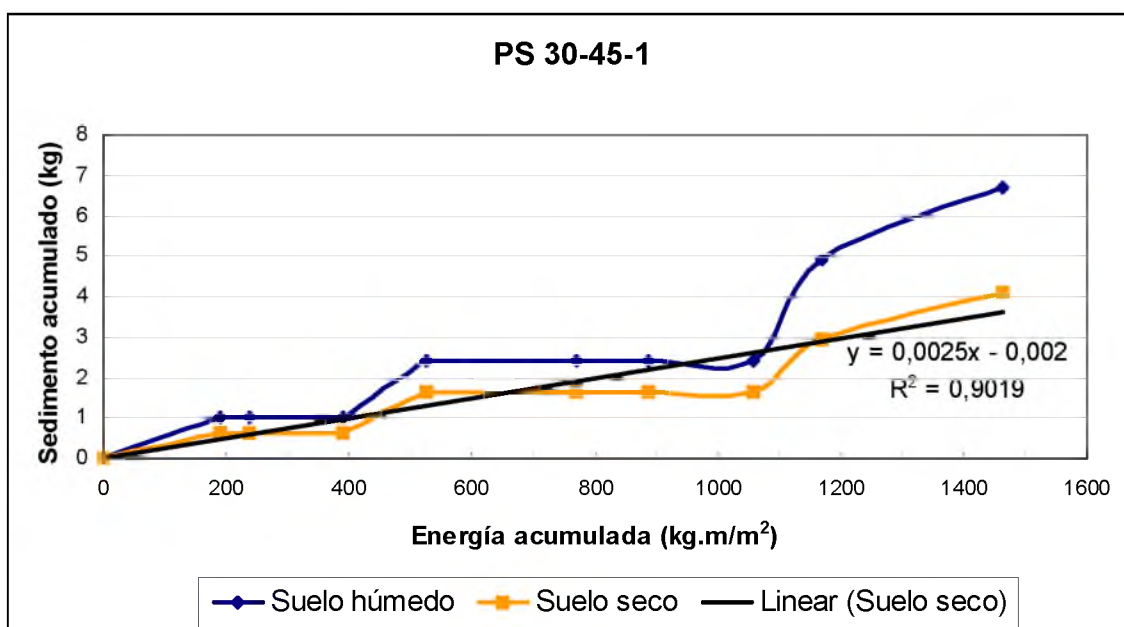


Figura 4.35. Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela PS 30-45-1.

Fuente. El autor.

Esta parcela presenta la cantidad más baja de sedimento recolectado, su tasa erosiva aparece también como la menor de las tres. La estación donde se tomaron los registros de precipitación es también el Chopo, sin embargo, como su instalación fue anterior a las otras dos, recibió mayor cantidad de eventos de precipitación lo cual que la energía acumulada llegara hasta los 1 463 kg·m/m², como se aprecia en la Figura 4.36.

A partir de la primera recolección de sedimento la gráfica presenta un segmento de pendiente igual a cero donde comienza un proceso de acumulación de energía invertida en desprendimiento del suelo hasta acumular de $390 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, periodo durante el cual sólo se presentó un evento de precipitación con un aporte importante de energía, el cual contribuyó a desprender una importante cantidad de suelo. El lapso siguiente presentó las fases de desprendimiento arrastre y sedimentación antes de otra fase de desprendimiento en su mayoría caracterizada por lluvias no erosivas y tormentas erosivas de poca energía cinética total. El periodo final de la prueba se caracterizó por un nuevo arrastre del material y su sedimentación en la geomembrana, con sólo una tormenta erosiva, presentada el día 5 de noviembre con una energía de $108 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. En total se recolectaron $4,1 \text{ kg}$ de sedimento seco.

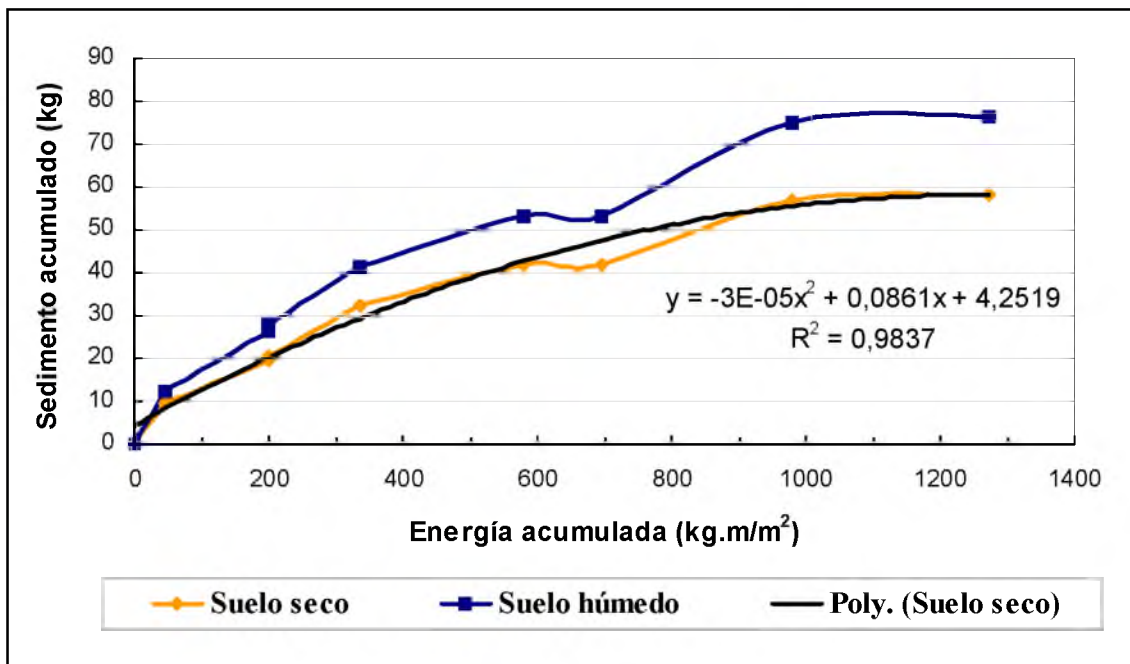


Figura 4.36. Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela PS 30-45-2.

Fuente: El autor.

La parcela **PS 30-45-2** presentó un comportamiento más complejo, el cual sin embargo es de más utilidad para describir la relación entre energía y erosión, debido a que se cuenta con mayor número de muestreos, un total de siete.

Como particularidades, esta parcela presenta un suelo franco limoso muy suelto, con baja compactación, la cobertura boscosa no es completa, la vegetación a nivel de sotobosque es casi inexistente y existe poca materia vegetal en el suelo, por lo que éste se encuentra muy expuesto. Sin embargo, esta parcela no representa un caso aislado, sino que caracteriza el área que se encuentra entre el tanque de oscilación y la planta del Centro de Producción Miguel Pablo Dengo B., donde incluso en sectores con pendiente igual o mayor al 45% y una textura de suelo más arcillosa, es frecuente la presencia de movimientos en masa importantes.

Durante las visitas semanales se logró ver la evidencia de pequeños surcos de escorrentía y acumulación de agua en las zonas cóncavas de la geomembrana, se observó también una capa de partículas de suelo desprendido en la cara hacia arriba de la pendiente del terreno. No obstante según las características del suelo recogido, se encontró que el fenómeno dominante fue la erosión por escorrentía, ya que la mayor parte del suelo sobre el geotextil estaba en su cara horizontal bajo los puntos donde se encontraba acumulada el agua de escorrentía.

En total, las lluvias erosivas registradas en la estación del Chopo generaron una energía acumulada de $1\,272\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ como se muestra en la Figura 4.36. Se puede observar que la curva que relaciona la erosión con la energía mantiene una pendiente más fuerte durante la primera parte de la prueba y luego tiende a estabilizarse.

La tasa erosiva en la parcela PS 30-45-2 varió a lo largo del periodo de prueba, no obstante, los procesos de desprendimiento, transporte y sedimentación se dieron simultáneamente con la acción de la energía, excepto por un breve periodo de en el que no se recolectó material que se presentó entre el 10 y el 17 de setiembre, incluyendo un evento de precipitación importante el 11 de setiembre con $135\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ energía que sólo fue suficiente para desprender el suelo e iniciar su movimiento sin llegar hasta la geomembrana. Al igual que en otras parcelas el proceso de transporte al final de la prueba requiere de mayor energía, lo que corresponde a una pendiente menor en la curva. A partir de toda la energía acumulada, la masa de suelo seco erosionado fue de 58 kg.

La parcela experimental PS **30-45-3** presentó sedimento acumulado en su geomembrana solo en tres fechas. Durante todo el periodo bajo la influencia del fenómeno

del Niño no se generó sedimento cuantificable, siendo hasta el 8 de octubre cuando se encontró sedimento sobre su geomembrana.

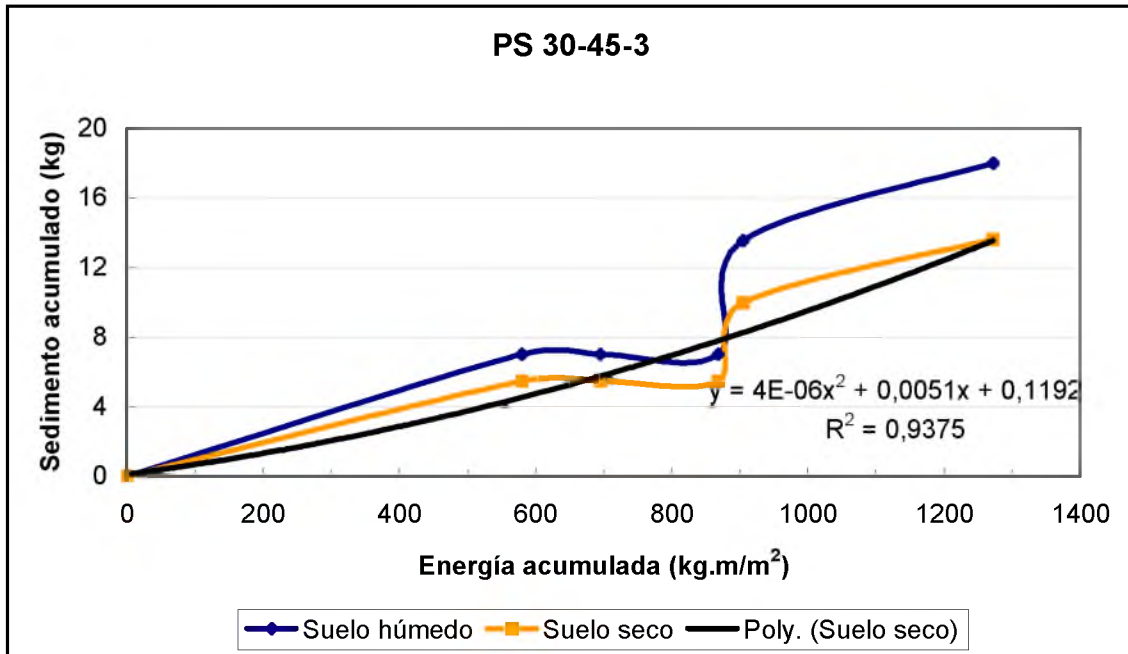


Figura 4.37. Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela PS 30-45-3.

Fuente: El autor.

La parcela **PS 30-45-3** está ubicada cerca de la PS 30-45-2, sobre un suelo del orden de los alfisoles, la textura del mismo es franco limosa. La cobertura de los árboles es casi completa sobre la zona de aporte a esta geomembrana, lo que trae consecuentemente un aumento importante en la cantidad de vegetación muerta sobre el suelo, que lo protege del impacto de la lluvia. De ahí que la masa de su producción de sedimento sea considerablemente menor, alrededor de la tercera parte de lo generado en PS 30-45-2, aún cuando su superficie es mayor.

Se obtuvo una energía acumulada de 1 272 kg·m/m² como se muestra en la Figura 4.37, en la estación pluviográfica del Chopó. Se puede observar que la pendiente de la curva que relaciona la erosión con la energía mantiene un valor similar tanto al inicio del periodo de estudio, como en su etapa final. Se presentó un lapso intermedio donde el desprendimiento de las partículas superficiales del suelo fue el proceso dominante, entre los

580 kg·m/m² y 868 kg·m/m² en el que la energía se mantiene en aumento, sin embargo no se obtiene erosión cuantificable en la geomembrana.

Después de este periodo de desprendimiento se encontró una gran cantidad de sedimento generado a partir de una pequeña precipitación presentada el 26 de octubre de sólo 36,7 kg·m/m² que fueron suficientes para transportar 6,5 kg de suelo hasta la geomembrana, que se reflejan en una elevada pendiente de la curva. Esto evidencia que el transporte del suelo desprendido no es inmediato en las parcelas de bosque, ya que la escorrentía superficial es mínima en la mayoría de los casos. En muchos casos los eventos de precipitación erosivos desprenden grandes cantidades de suelo que se mueven por tramos a lo largo de la pendiente.

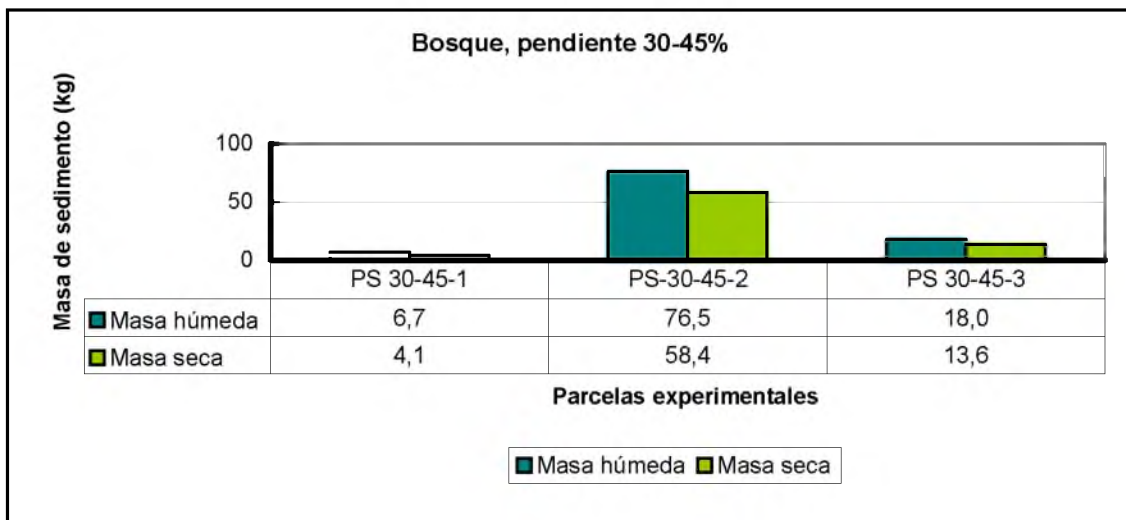


Figura 4.38. Pérdida total de suelo en las parcelas experimentales de bosque en pendiente de 30% -45% de la microcuenca media-baja.

Fuente: El autor.

Las parcelas de bosque dentro del rango más alto de pendientes evaluado, mostraron mucha variabilidad entre sí, como se aprecia en la Figura 4.31. La mayor tasa erosiva se presenta en la parcela PS 30-45-2. Debido a la alta variabilidad entre estas parcelas, un análisis estadístico mediante la prueba de Tukey ($P < 0,05$) muestra que no existe diferencia significativa entre los resultados encontrados.

En total se recogieron 101 kg de suelo seco en las tres parcelas. La tasa media de erosión fue de 0,7 ton/ha, lo que equivale a una producción total de las zonas boscosas con pendiente entre 30 y 45% de 156,5 toneladas. La producción total de sedimento estimada para las zonas boscosas de la microcuenca baja por rango de pendientes se sintetiza en la Tabla 4.5. Como se muestra, la diferencia de la tasa erosiva entre rangos de pendiente fue notoria, presentando una tendencia a aumentar conforme se incrementa la pendiente, sin embargo la alta variabilidad entre los resultados encontrados origina que no exista diferencia significativa para la producción de sedimentos entre rangos de pendiente para las parcelas ubicadas en bosque. En total se estima que la superficie total de bosque en la microcuenca baja evaluada en el estudio produjo 240 toneladas.

Tabla 4.5. Valores totales encontrados para las parcelas de bosque en la microcuenca media-baja.

Fuente: El autor.

Pendiente (%)	Parcela	Área (m ²)	Suelo recolectado (kg)	Erosión (ton/ha)	Promedio (ton/ha)	Área total (ha)	Sedimento total (ton)
0-15	PS 0-15-1	513,0	0,7	0,01	0,07	536	38,1
	PA 0-15	444,7	5,1	0,12			
	PS 0-15-3	627,4	5,3	0,08			
15-30	PA 15-30	551,2	4,9	0,09	0,11	430	45,2
	PS 15-30-1	634,5	8,8	0,14			
	PS 15-30-2	2015,6	17,6	0,09			
30-45	PS 30-45-1	283,1	4,1	0,15	0,72	217	156,5
	PS-30-45-2	332,6	58,4	1,76			
	PS 30-45-3	516,7	13,6	0,26			

4.7 Evaluación de la erosión en cárcava

Debido a los síntomas de erosión presentes en las fincas de microcuenca media-baja, se decidió ubicar una parcela experimental, como un caso especial de una parcela ubicada en tipo de uso que fue de pasto, pero que por ser un paso de ganado y un curso de agua temporal, se ha desarrollado una cárcava (Figura 4.39). En total, del área de aporte a esta parcela (835 m²), solo alrededor de un 20% se encuentra cubierto por pasto el cual tiene poco desarrollo foliar. Este porcentaje, con el tiempo poco a poco se va a ir reduciendo debido al crecimiento de la cabecera de la cárcava.



Figura 4.39. Parcela experimental IE ESTU. A, B) Vista de la parcela experimental donde se aprecia la formación de la cárcava. C) Acción de la geomembrana, retención del suelo erosionado en la cárcava. D) Geomembrana limpia para la cuantificación de nuevo material erosionado.

Fuente. El autor.

Para la parcela IE ESTU, se contó con la mayor cantidad de datos disponibles para describir el comportamiento de la energía de la precipitación y el sedimento en las parcelas ubicadas en microcuenca media-baja, representado en la Figura 4.40.

Desde el 14 de julio al 7 de agosto, la gráfica no muestra valor alguno de energía, de hecho la estación pluviográfica del Chopo registra 0,0 mm de precipitación en ese lapso, sin embargo, se recolectaron 101,5 kg de sedimento durante ese periodo. Durante todas las visitas realizadas a esta parcela experimental durante esas fechas se observó personalmente el efecto del viento sobre el suelo desprendido y sin cobertura vegetal, el cual fue removido y transportado hasta la geomembrana, con importante acumulación durante los periodos de fuerte viento. Por lo tanto se puede afirmar que la totalidad de ese suelo fue transportado debido a erosión eólica, que no se aborda en esta investigación acerca del potencial erosivo, pero que por las condiciones que se presentan dentro del área de estudio, representa un proceso erosivo importante en algunos sectores y temporadas del año.

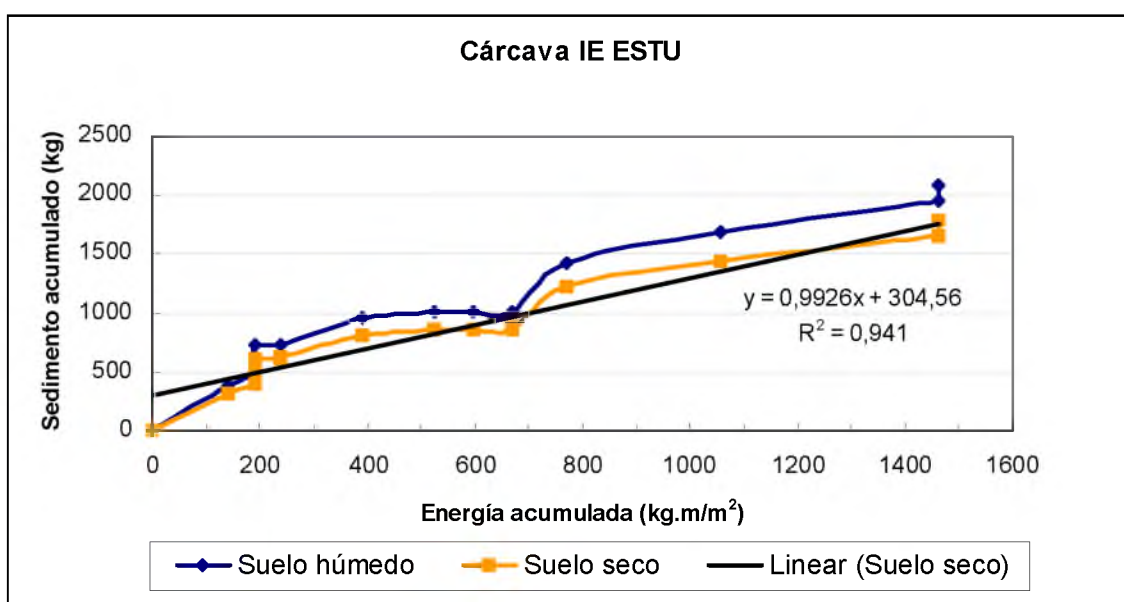


Figura 4.40. Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela IE ESTU.

Fuente: El autor.

Durante el mes de octubre se presentaron precipitaciones prácticamente iguales a las de la media histórica para este periodo, por lo que los valores de energía alcanzan sus máximos a partir de ese mes. Al final del periodo de prueba se encontró una masa de 132 kg de sedimento a pesar de que no se presentaron tormentas erosivas. La precipitación durante ese periodo fue baja, sin embargo, su acción junto con la de la intensidad de los vientos durante ese periodo se combinaron para erosionar esa cantidad de suelo encontrado.

Sin embargo, se reitera que el viento se trata de una variable no evaluada dentro del estudio. La energía acumulada en la estación del Chopo para el periodo de prueba en esta parcela fue de $1\,463\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$.

El coeficiente de correlación indica que la tendencia polinomial de grado 2 presenta una buena aproximación de la cantidad de suelo desprendido como consecuencia de la energía liberada por las gotas de lluvia durante una tormenta erosiva, bajo condiciones de poca cobertura vegetal. Se puede apreciar una primera fase con pendiente mayor, durante las dos primeras fechas de recolección que reflejan una alta respuesta de las partículas del suelo a la energía de la lluvia. La siguiente fase presenta una tasa erosiva continua sin ningún aumento de energía cuantificable, debido a que las partículas desprendidas por las anteriores precipitaciones son vulnerables a la erosión eólica y a las pocas lluvias que se presentaron en ese periodo, que no tienen suficiente energía para considerarse erosivas, como ya se mencionó. Se identifican de esta forma la alternación de los procesos de desprendimiento, transporte y sedimentación, aún cuando existen factores externos como el viento y el paso del ganado en puntos aguas arriba de la geomembrana que varían la relación entre la energía de la lluvia y el sedimento encontrado en la geomembrana.

Esta parcela produjo un total de $1\,786\text{ kg}$ de sedimento seco, para una relación de $21,4\text{ ton/ha}$. En total, la cárcava tiene una superficie de $1\,321\text{ m}^2$, por lo que su producción total de sedimento seco durante el periodo de prueba fue de $2\,826\text{ kg}$. Debido a lo pronunciado de la pendiente aguas abajo de la geomembrana y a las condiciones del suelo, se estima que la mayor parte de los sedimentos generados dentro de esta área, llegan directamente al cauce de la quebrada Papaturo, durante eventos importantes de precipitación.

Es importante mencionar que en la microcuenca media-baja sí se encontró un importante número de terrenos pequeños con muy poca o ninguna cobertura dentro de los potreros, que tienen el potencial de generar una tasa de producción de sedimentos similar a la encontrada en la parcela estudiada.

4.8 Descripción cualitativa del estado de las riberas

A partir de diversas visitas realizadas a las riberas de los ríos y quebradas dentro de la microcuenca, se observó que, principalmente los terrenos ubicados en la parte media y alta presentan pendientes fuertes, que en caso de movimientos en masa y erosión por escorrentía, representarían un aporte inmediato de gran cantidad de sedimentos a los cursos de agua.

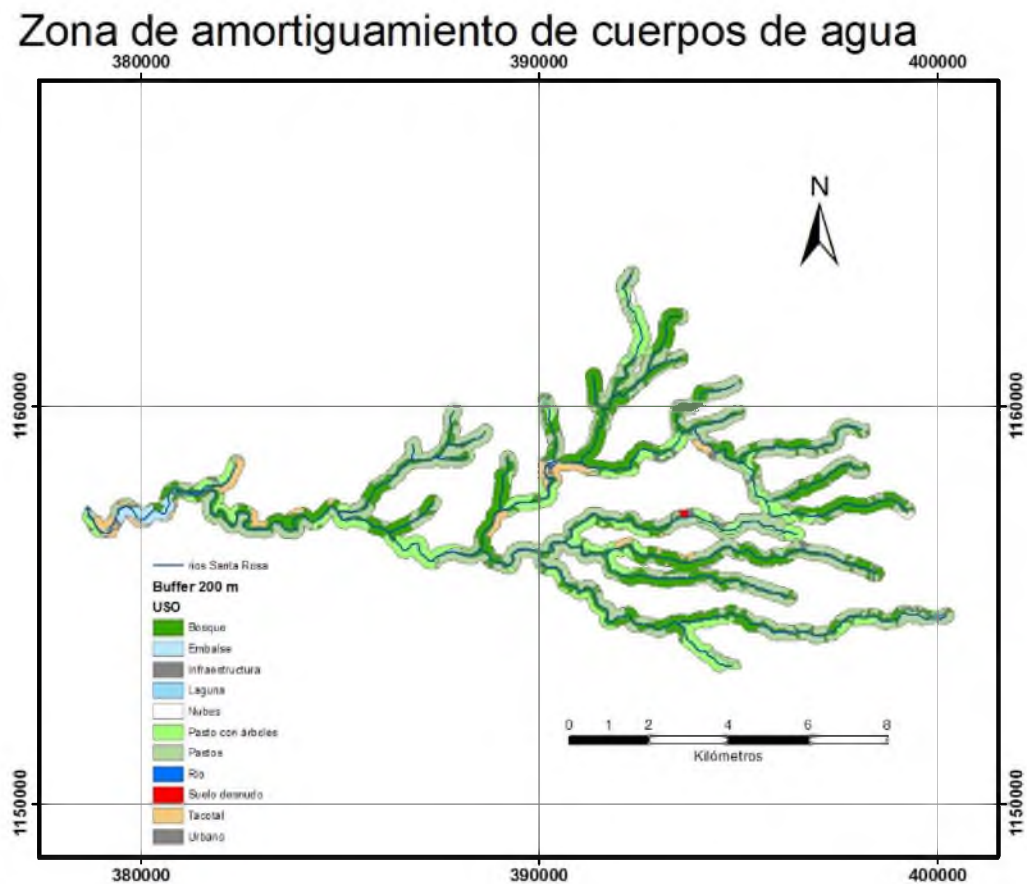


Figura 4.41. Tipos de uso de suelo en la zona de amortiguamiento de cuerpos de agua de la microcuenca del río Santa Rosa.

Fuente: El autor.

Sin embargo a partir de la utilización de fotografías aéreas y utilizando herramientas SIG, se encontró que la cobertura del suelo en estas zonas es buena, con presencia en mayor proporción los usos de bosque, pasto y pasto con árboles como se muestra en la Figura 4.41. De esta manera se encuentra que los sitios más vulnerables se

presentan en la microcuenca media y alta, con pendientes superiores al 45% y que presentan poca cobertura vegetal, lo cual se demuestra con la cantidad de deslizamientos que hay en esta zona, que corresponde al mayor porcentaje de los deslizamientos encontrados. El estado de las riberas de los principales cursos de agua dentro de la microcuenca del río Santa Rosa es en su mayoría bueno, con adecuada protección forestal en cuenca alta a pesar de la vocación pecuaria de la zona.

La cobertura en la cuenca media es regular, presentando importantes zonas con pastos, tacotal o suelo desnudo en lugares donde ya ha ocurrido un movimiento en masa importante.

El punto final del cauce principal del río Santa Rosa, antes del embalse Sandillal, presenta una condición excelente, debido a la protección que le da el boque de la finca “El Chopo” y la reforestación que se ha llevado a cabo en los terrenos del ICE aledaños al embalse Sandillal.

En la Figura 4.42 se muestra el mapa de pendientes para la zona de amortiguación de 200 m hacia ambos márgenes en los principales cursos de agua de la microcuenca del río Santa Rosa. Se puede apreciar que la zona más vulnerable es la cuenca media, donde se presenta mayor cantidad de sectores con pendientes superiores al 45%. Esta situación se explica en gran parte porque en este sector hay mayor cantidad de deslizamientos y taludes desprotegidos con pérdida frecuente de material.

La cuenca baja presenta una cobertura vegetal de regular a buena, sin embargo, debido a que el rango de pendientes en las riberas de esta zona presenta valores menores a los de cuenca alta y media, el riesgo de erosión es menor, presentándose como fenómeno modelador el socavamiento de la ribera por parte del río o quebrada.

Zona de amortiguamiento de cuerpos de agua

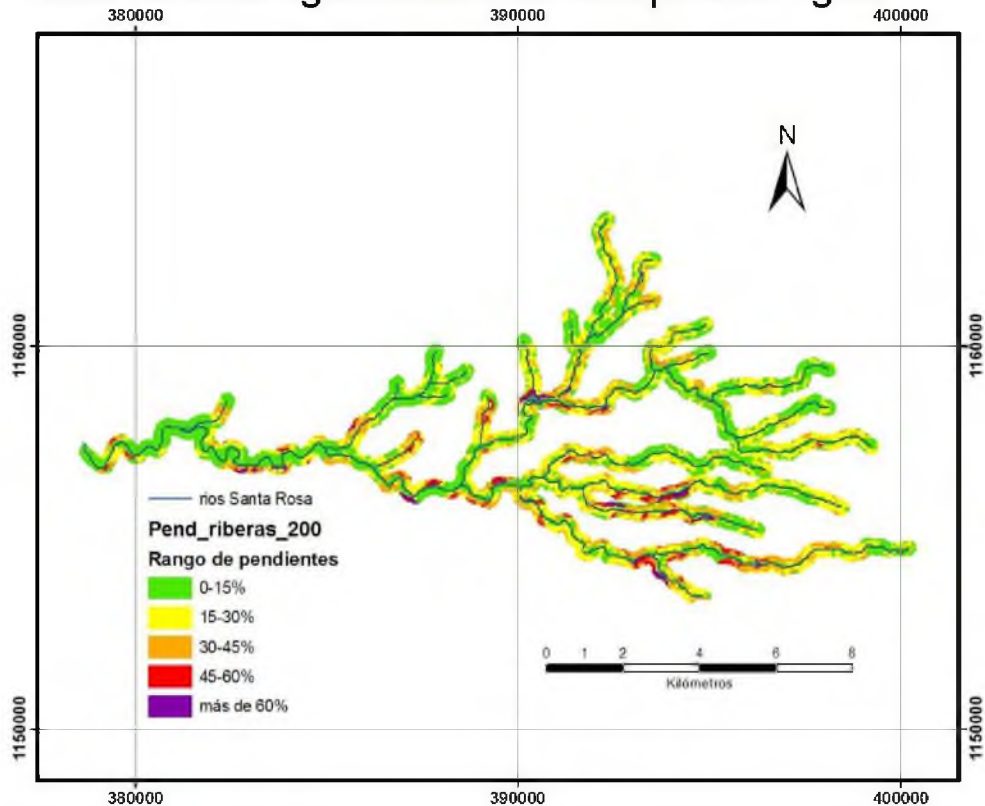


Figura 4.42. Pendiente presentada en la zona de amortiguamiento de cuerpos de agua de la microcuenca del río Santa Rosa.

Fuente: El autor.

Pese a las condiciones de cobertura, se encontraron puntos importantes que presentan movimientos en masa o suelo descubierto que deben ser tomados en cuenta para implementar medidas de mitigación y corrección. Además de ser zonas de aporte continuo y directo de sedimentos a los embalses, algunos pueden comprometer la seguridad de la población y la estabilidad de estructuras viales. Las zonas más críticas se describen a continuación. Su ubicación dentro de la microcuenca del río Santa Rosa y sus condiciones se ilustran en las siguientes figuras.

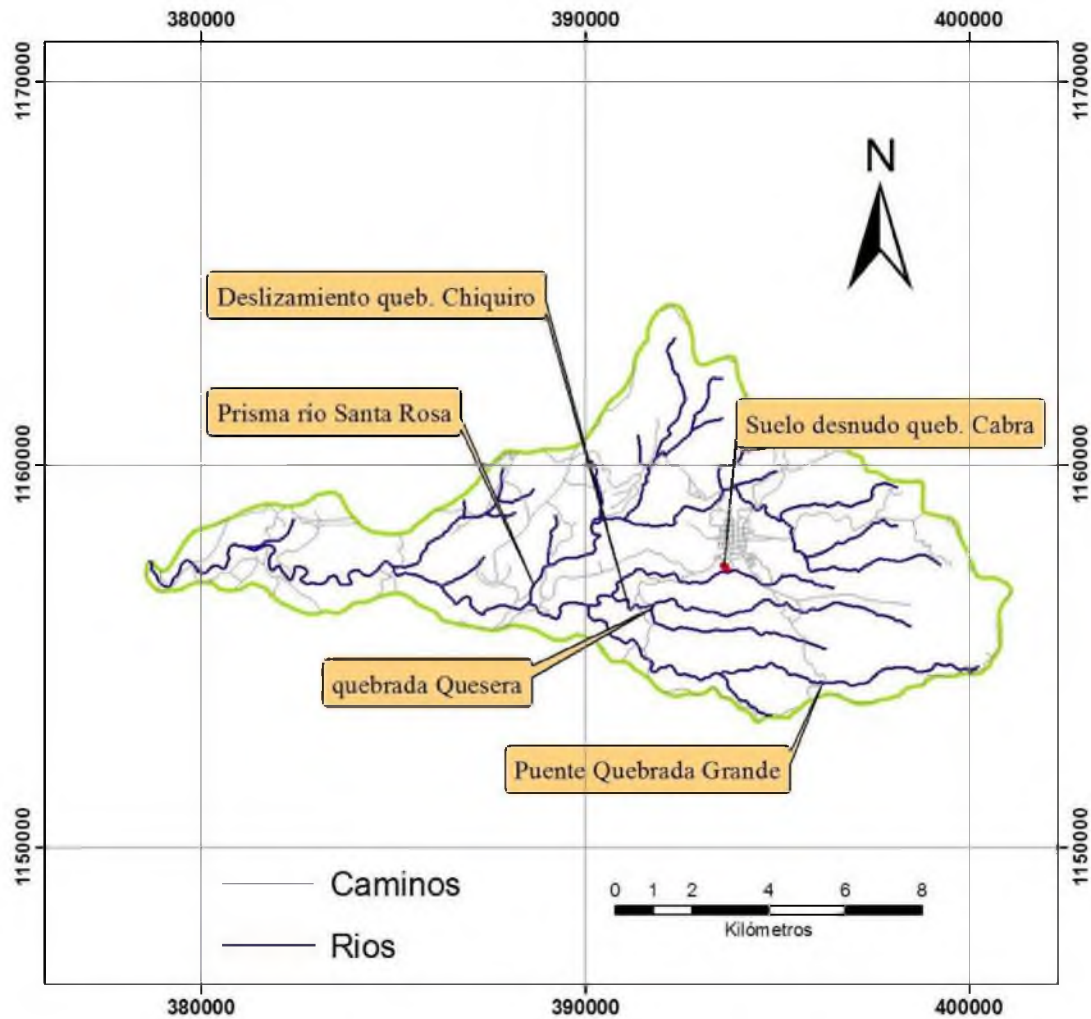


Figura 4.43. Ubicación de sitios de riesgo en las riberas de los cursos de agua en la microcuenca del río Santa Rosa.

Fuente: El autor.

1. Ambos márgenes de la quebrada Grande a la altura del puente que comunica la comunidad homónima con Tilarán, sobre la ruta 145. Bajo el puente se tiene suelo desnudo con una pendiente superior al 100% y sobre el margen derecho existe una zona de gran inestabilidad justo sobre la carretera a la entrada del puente, debido a un corte con pendiente inadecuada, donde incluso ya se presentaron deslizamientos durante la época lluviosa de 2009. En el margen izquierdo se tiene un sector de suelo expuesto a ambos lados de la carretera, debido a un gran deslizamiento que tuvo lugar en 2008. El sector más crítico está hacia arriba de la vía,

pues el talud aún no ha llegado a su pendiente adecuada, por lo que continuará desprendiéndose y llevando material a la cuneta y la calzada. La parte hacia abajo de la carretera ha recuperado parte importante de su cobertura vegetal, sin embargo por su alta pendiente sigue siendo importante su aporte directo de suelo a la quebrada.



Figura 4.44. Estado de la ribera y el cauce de quebrada Grande en la zona del puente que comunica la comunidad del mismo nombre con Tilarán, Marzo 2009.

Fuente: El autor.

2. Margen izquierda del río Santa Rosa 300 m antes de su confluencia con la quebrada Grande. En este lugar se encuentra un prisma de suelo desprendido de aproximadamente 50x15x20 m, que corresponde a un volumen estimado de suelo de 7 500 m³. La totalidad del bloque se encuentra suelto, con un desnivel de 2 m hacia debajo de la superficie original del terreno, lo cual lo convierte en una masa inestable a eventos de precipitación muy fuertes, que podrían provocar que se desplace en su totalidad y bloquear la mayor parte del cauce del río. Esta situación generaría además un efecto de presa, con consecuencias negativas para el embalse Sandillal y la seguridad de la población cercana a su margen aguas abajo, en caso de su rompimiento y posterior arrastre de todo el material acumulado en el sitio y la gran cantidad de troncos y piedras que quedaron en el cauce y las llanuras de inundación producto del invierno de 2008. Además del prisma se tiene una gran área de suelo sin cobertura con una pendiente muy fuerte, que constantemente se desprende y cae al río.



Figura 4.45. Movimiento en masa, con gran cantidad de suelo expuesto, sobre el cauce principal del río Santa Rosa, unos 300 m aguas arriba de la confluencia con quebrada Grande.

Fuente: El autor.

3. Margen izquierdo de la quebrada Quesera cerca del puente en la vía Tilarán-Líbano, donde se presenta un corte de 90° con gran cantidad de suelo expuesto y pequeñas porciones de suelo desprendido. En este punto también el cauce muestra una acumulación importante de troncos y raíces que limitan el paso del agua para la época lluviosa, aumentando la incidencia de esta sobre la orilla desprotegida.



Figura 4.46. Zona inestable, con riesgo de movimiento en masa en la ribera de quebrada Qesera aledaña al puente de la ruta Tilarán –Líbano.

Fuente: El autor.

4. Deslizamiento en potrero, orilla derecha de la quebrada Chiquiro, unos 300 m aguas abajo del punto anterior. Presenta terreno expuesto de gran superficie, con una pendiente fuerte y tendencia a ampliar su corona por reptación. Su aporte es directo a la quebrada.



Figura 4.47. Deslizamiento presentado cerca del cauce de la quebrada Chiquiro en su margen derecho.

Fuente. El autor.

5. Un lote de suelo descubierto ubicado cerca de barrio El Carmen. Su superficie es de 4,58 ha de las cuales 3,87 se encuentran dentro de los 200 metros del área de amortiguamiento hacia el margen derecho de la quebrada Cabra. Durante la visita realizada al lugar se comprobó que se trata de un proyecto urbanístico abandonado. Considerando que no tiene una cubierta vegetal adecuadamente establecida, su tasa de desprendimiento es alto, aunque la tasa de transporte sea moderada debido a su baja pendiente. A su vez este sector representa un área importante de aporte dada su cercanía con el cauce de la quebrada y la ausencia de un “buffer” apropiado.

A lo largo de todos los cauces y llanuras de inundación en las regiones media y baja de la microcuenca se encuentran grandes cantidades de material arrastrado en forma de carga de sedimentos en el lecho, como producto de la disminución en la pendiente sobre el cauce o estrechamiento del mismo a causa de alguna estructura, con su consecuente pérdida de capacidad de transporte, en este caso por saltación y arrastre en el lecho. Este material está compuesto principalmente por arena, grava de diversos grosores, piedras, troncos y ramas, ya que los limos, arcillas y parte de la materia orgánica se mueven como sólidos suspendidos y son arrastrados con mucha facilidad distancias mayores. Debido a su tamaño y masa, el movimiento de estos se realiza bajo condiciones especiales en el río, por lo cual es más lento y se dificulta así su llegada a las estructuras hidráulicas aguas abajo.

Sin embargo, la aparición de este tipo de material en las cercanías de guías y compuertas, puede generar problemas severos. La Figura 4.48 muestra la ubicación de algunos puntos donde se encuentra actualmente material acumulado en los cauces de quebrada Grande y río Santa Rosa, que son los dos cursos de agua principales dentro de la microcuenca.

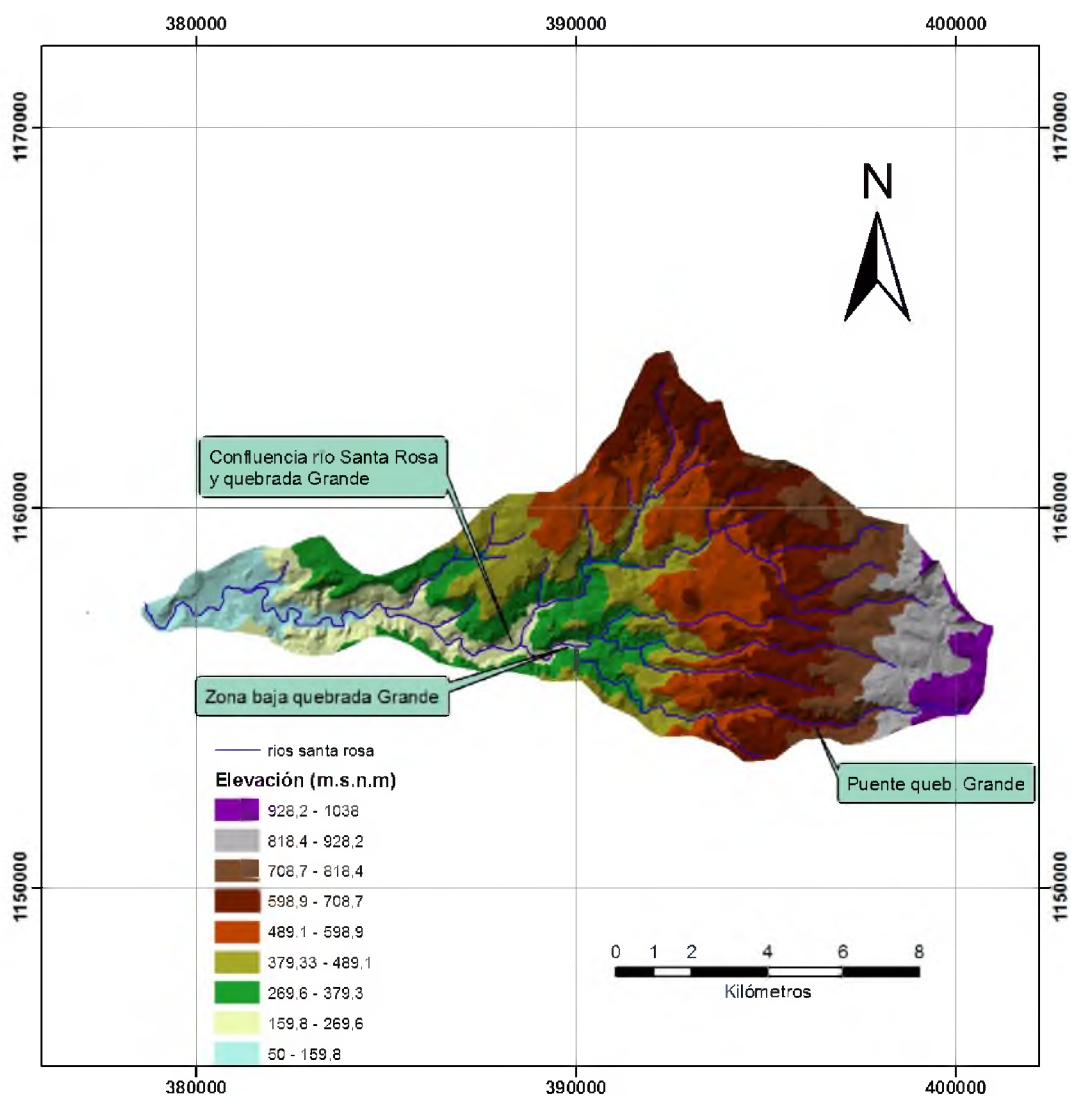


Figura 4.48. Ubicación de algunos sitios con acumulación importante de material en los cauces de cursos de agua principales en la microcuenca del río Santa Rosa.

Fuente: El autor.

Los puntos indicados en la Figura 4.48 se ilustran en las siguientes figuras, donde se puede apreciar la cantidad y tamaño de troncos, piedras y arena acumulados en estos sitios.



Figura 4.49. Banco de arena y sedimentos retenidos por los troncos depositados sobre el cauce de quebrada Grande, en las cercanías del puente sobre la ruta Tilarán – Quebrada Grande, Octubre, 2009.

Fuente: El autor.



Figura 4.50. Troncos, arena y piedras, acumulados en el cauce de quebrada Grande aguas arriba de su confluencia con el río Santa Rosa.

Fuente: El autor.



Figura 4.51. Troncos de gran tamaño, dejados durante el invierno anterior en la confluencia del río Santa Rosa y quebrada Grande.

Fuente: El autor.

Existe un riesgo importante de alteración de las funciones y desempeño de ciertas estructuras hidráulicas, como guías y compuertas, si piedras o troncos de gran tamaño se llegan a amontonar cerca de las mismas. En las figuras del Anexo 6 se muestra la acumulación de troncos encontrada durante el último monitoreo de sedimentos realizado en el embalse Santa Rosa en julio de 2009. Además se evidencia un problema presentado por el depósito de troncos bajo unas compuertas ubicadas en este embalse.

4.9 Mapa de vulnerabilidad generado a partir de la tasa erosiva medida

La relación gráfica entre potencial erosivo y energía de la lluvia se muestra en detalle en los apartados 4.5 y 4.6. A partir de los valores encontrados, en conjunto con los obtenidos en la tesis del Ing. Aguilar se crea un mapa de vulnerabilidad que se muestra en la Figura 4.52. Se realizó una modificación dentro de la clase de erosión baja de la FAO haciendo una subdivisión para generar un factor de vulnerabilidad 1, que indica erosión

nula o prácticamente inapreciable. Los restantes factores siguen los rangos de clasificación definido por este organismo.

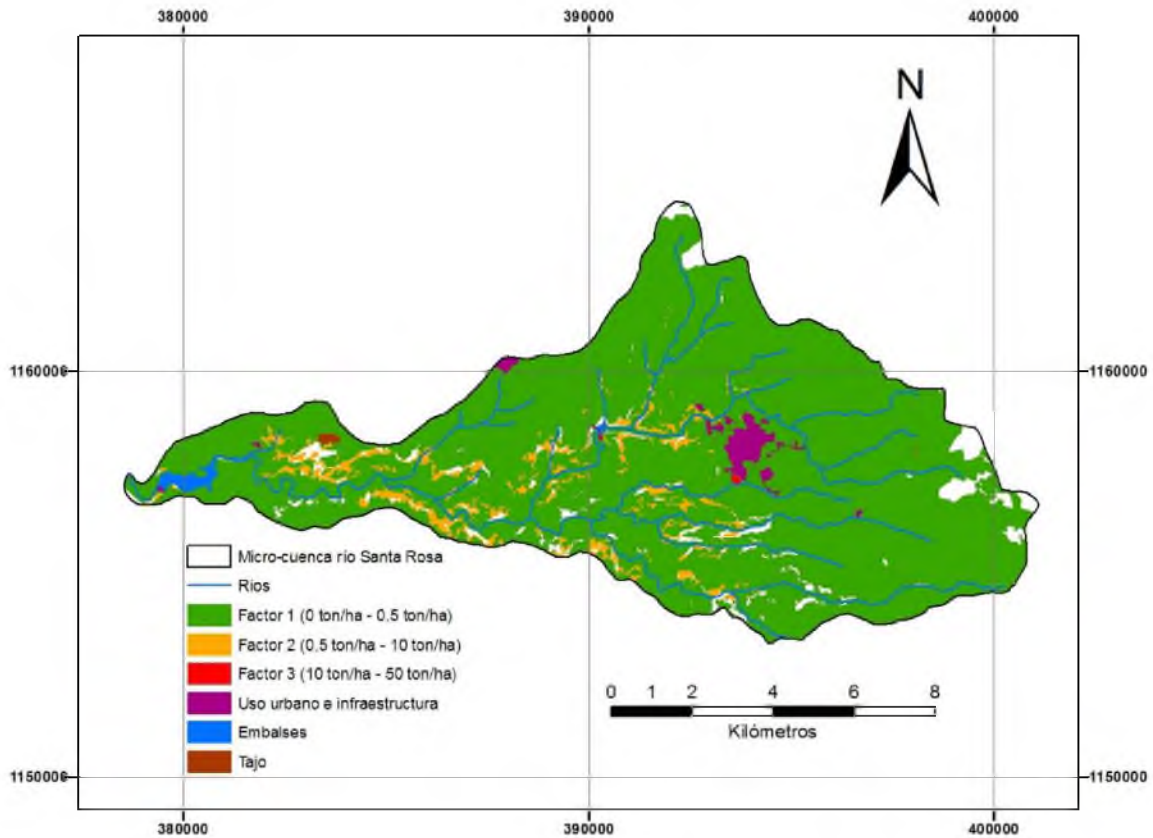


Figura 4.52. Mapa de vulnerabilidad generado para la microcuenca del río Santa Rosa.

Fuente: El autor.

Las áreas indicadas con color blanco no se evaluaron en el estudio pues presentan pendientes mayores a las analizadas en el estudio o son áreas con uso no definido.

A partir de la información que muestra el mapa de la Figura 4.52 se encontró que un 87% de la superficie de la microcuenca presenta una vulnerabilidad al fenómeno erosivo dentro del factor 1 (9061 ha). Esto significa que se producen menos de 0,5 ton/ha en estos sitios, que corresponden a las zonas de uso de suelo de pasto y pasto con árboles con pendientes entre 0% y 45% a lo largo de toda la microcuenca y a las áreas con tipo de uso de suelo de bosque y tacotal con pendientes entre 0% y 45% en la microcuenca media – alta y pendientes de 0% a 30% en la microcuenca media – baja.

El factor de vulnerabilidad 2, definido para una tasa erosiva desde 0,5 ton/ha hasta 10 ton/ha, lo que según el criterio de la FAO se define como erosión baja. Sólo un 5,2% de la superficie total de la microcuenca (547,4 ha) cumple con esta condición, que se presenta en suelos bajo uso de bosque y tacotal en pendientes de 30% a 45% en la microcuenca media – baja.

Según lo encontrado por Cervantes y Vahrson (1992) existe diferencia mínima en la escorrentía y pérdida de suelo entre uso de suelo de pastos y pasto con árboles, por lo que se le asignó un potencial erosivo similar, para la elaboración del mapa. Además, en vista de que la mayoría de las parcelas ubicadas en bosque no están en bosque primario y que en los mapas de Aguirre y Araya (2007) se clasifican las áreas de regeneración forestal como tacotal, y debido a que la variabilidad entre los valores de erosión encontrados no están en función de esta característica, se asignó el valor encontrado en bosque a las áreas denominadas como tacotales. Las visitas de validación al campo corroboraron las características de este tipo de uso del suelo en las cercanías del puente sobre el río Santa Rosa en la ruta 142 Cañas – Tilarán – La Fortuna y alrededores del embalse Sandillal.

La superficie clasificada con factor de vulnerabilidad 3, corresponde a las 4,6 ha de suelo desnudo ubicado en el margen izquierdo de la quebrada Cabra, cerca de barrio El Carmen en la ciudad de Tilarán, que se mencionaron en el apartado anterior. Los valores estimados se calcularon basados en los medidos en la parcela experimental IE-ESTU y los taludes de camino con baja cobertura vegetal analizados por Aguilar (2010).

Las zonas de infraestructura y uso urbano no se incluyen dentro del estudio por sus características de poco suelo descubierto, que presentan altos valores de escorrentía pero poca erosión. Vale la pena destacar que el efecto negativo de esta zona es el aporte rápido del agua de escorrentía a los cursos de agua de la microcuenca, lo que aumenta el caudal generando mayor capacidad de transporte de sedimentos aportados por zonas con otros tipos de uso del suelo.

El área del tajo El Chopo, cubre una superficie de 13,6 ha. Aunque presenta todos los rangos de pendientes posibles, el tajo forma una depresión por sí mismo, lo cual provoca que la gran mayoría del sedimento que produce no salga al exterior, exceptuando el que proviene de los almacenamientos temporales de material ya procesado, al lado Oeste.

CAPÍTULO 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

5.1.1 Microcuenca media - baja

Las áreas representativas de la microcuenca media-baja del río Santa Rosa corresponden a las zonas bajo usos de suelo de bosque y pasto con un rango de pendiente de 0% - 45%, las cuales representan un 66% del área total.

Los valores encontrados para erosión hídrica indican erosión baja en todas las áreas bajo estudio según el criterio de la FAO. Para el tipo de uso de suelo de pasto se determinó un potencial erosivo entre 0,01 ton/ha y 0,03 ton/ha, mientras tanto en el bosque se midió una tasa erosiva entre 0,07 ton/ha y 0,7 ton/ha.

Para las áreas evaluadas la estimación de producción total de sedimento durante el periodo de estudio fue de 270 toneladas, lo cual resulta un valor muy bajo comparado con el total acumulado en el embalse Sandillal.

El proceso dominante en el bosque es la erosión por salpicadura, según se comprobó y documentó por lo que si bien se tiene mayor vulnerabilidad a la erosión, el movimiento del suelo desprendido es muy lento, en contraste con lo que se presenta en pasto, donde se alcanzan altos valores de escorrentía, que hacen que el material transportado se mueva rápidamente, en especial bajo condiciones de cobertura pobre.

Se encontró una tendencia al aumento en la vulnerabilidad a los procesos erosivos conforme la pendiente del terreno es mayor, siendo esta característica más notable en los terrenos bajo uso de suelo de bosque con respecto al uso de pasto.

Condiciones climáticas como época seca prolongada, además del sobrepastoreo y falta de fertilización, provoca que la cobertura de pasto no pueda establecerse al 100% en algunos de los potreros de la microcuenca media - baja.

A pesar de su condición general se encontró una importante cantidad de sitios con síntomas de erosión severa en las zonas bajo uso de pastos. Para la parcela demostrativa IE ESTU se midió una tasa erosiva de 21,4 ton/ha, indicando erosión moderada en suelo con formación de cárcava.

En las zonas de pasto y en la cárcava se encontró que al inicio de la época lluviosa se requiere de menor energía para desprender y transportar el suelo, a diferencia de lo que se presenta hacia el final del periodo lluvioso.

5.1.2 Microcuenca del río Santa Rosa

Las riberas de los cursos de agua en la zona de estudio del río Santa Rosa presentan una adecuada protección boscosa en la parte alta. Su vulnerabilidad se debe en gran parte a su pendiente, que es mayor en la parte media de la microcuenca.

Se encontraron cinco puntos importantes de atención en las riberas de ríos, los cuales no sólo son fuente potencial y directa de sedimentos a los embalses del C.G. ArCoSa, además en algunos casos puede comprometer la integridad de infraestructura vial y vidas humanas.

Existe una cantidad importante de material vegetal y rocoso acumulado a lo largo de las cauces del río Santa Rosa y quebrada Grande. Se comprobó que cuando este material llega hasta las estructuras hidráulicas del ICE puede generar problemas en el desempeño de compuertas, rejillas y guías.

El aporte principal de sedimentos a los embalses Santa Rosa y Sandillal no proviene de las áreas de bosque o zonas productivas (pastos), si no de deslizamientos, riberas de ríos áreas con suelo descubierto y taludes de caminos, que en su mayoría son de contribución directa a los principales cursos de agua de la microcuenca, pues muestran altas tasas erosivas, con respecto a las mostradas en los tipos de uso de suelo de pasto y bosque de toda la microcuenca.

Un 92 % de la superficie total de la microcuenca del río Santa Rosa presenta una tasa de erosión baja menor a 10 ton/ha, correspondiente a pendientes de 0% a 45% en suelo bajo uso de pastos, bosque, pasto con árboles y tacotal.

5.2 Recomendaciones

Ejecutar un plan piloto de una finca con severos síntomas de erosión, basado en la Ley 7 779 Uso, manejo y conservación de suelos, para realizar un manejo adecuado de la misma implementando obras de bioingeniería y BMP's, con el fin de implementarlo a nivel de microcuenca e incluso a nivel de la cuenca del embalse Arenal y disminuir los puntos que presentan síntomas graves de erosión y mitigar su potencial erosivo.

Profundizar el estudio a nivel de puntos críticos en riberas con el fin de definir los procedimientos apropiados para implementar técnicas de bioingeniería dirigidas a la restauración de riberas de ríos.

Realizar estudios que involucren el análisis de la compactación, capacidad de infiltración y porcentaje de escorrentía presentados en los suelos bajo tipo de uso de pastos, para evaluar su influencia en las avenidas máximas instantáneas y caudales máximos en los principales cursos de agua dentro de la microcuenca, además de estimar su aporte volumétrico al caudal del río Santa Rosa, con su consecuente aumento en su capacidad de transporte de sedimentos.

5.3 Temas de estudio futuros

A partir de las experiencias obtenidas a lo largo del desarrollo de este proyecto, se mencionan algunas líneas de estudio o investigaciones adicionales que pueden servir para complementar futuros trabajos de investigación dedicados a los fenómenos erosivos en la zona.

- Estudios en colaboración con profesionales o estudiantes en geología o geotecnia para evaluar las características geológicas en taludes de caminos y riberas de ríos, con el fin de buscar causas de su inestabilidad adicionales a problemas de suelo y cobertura vegetal.

- Influencia e impacto de la erosión eólica en zonas susceptibles como taludes desprotegidos, áreas de suelo desnudo o zonas productivas en proceso de degradación.
- Buenas prácticas de manejo en fincas de producción pecuaria extensiva enfocadas en la conservación del suelo y la reducción de la erosión.
- Estudio para la determinación del porcentaje de escorrentía en pastos y su aporte al caudal pico durante eventos de precipitación importantes.
- Evaluación de la eficiencia de geomembranas como método para el control de la erosión en sitios de suelo desnudo.

CAPÍTULO 6. Bibliografía

Aguilar Álvarez, R. “Evaluación de la producción potencial de erosión en la microcuenca media-alta del río Santa Rosa, Tilarán, Guanacaste”. Tesis. Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2010.

Aguirre, J; Araya, J. “Caracterización general de la microcuenca del Río Santa Rosa” Centro Nacional de Planificación Eléctrica. Instituto Costarricense de Electricidad. 2007.

Apolo Berrú, W. “Evaluación de la escorrentía superficial y la erosión en un pastizal con árboles aislados en La Suiza, Turrialba, Costa Rica”. Tesis. Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 1980.

Bermúdez, M. M. “Erosión hídrica y escorrentía superficial en el sistema de café (Coffea arabica L.), poró (Erythrina poeppigiana (Walpers)) y laurel (Cordia alliodora (R. & P.) Cham) en Turrialba, Costa Rica”. Tesis. Universidad de Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, San José, 1980.

Carrol R. G., Rodencal J. y Collin, J. G. “Geosynthetics in erosion control – the principles” Geosynthetics in Filtration, Drainage and Erosion Control, Elsevier Science Publishers Ltd., Estados Unidos de Norteamérica, 1992.

Cervantes, C. y Vahrson, W.G. “Características físicas y pérdida de nutrimentos de las parcelas de erosión de Cerbatana de Puriscal, Costa Rica” Agronomía Costarricense, Costa Rica, Vol 16 (1), 1992.

Colotti, E. “Aplicabilidad de los datos de lluvia horaria en el cálculo de la erosidad” Primera Edición, Fondo Editorial de Humanidades y Educación, Venezuela, 2004.

Corporación Nacional Forestal (CONAF), Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA). “Manual de control de erosión”. Primera Edición, Trazo, Ltda. Santiago de Chile, 1998.

Cubero, D. “Manual de manejo y conservación de suelos y aguas” Ministerio de Agricultura y Ganadería, Segunda Edición, Editorial UNED, Costa Rica, 1996.

Gómez Delgado F. “Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentos en tres cuencas de Costa Rica” Tesis. Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2002.

Gunatilake, H. y Gopalakrishnan, C. “The economics of reservoir sementation: A case of study of Mahaweli reservoirs in Sri Lanka” Water Resources Development, Estados Unidos de Norteamérica, Volumen 15 (4), 1999.

Gutiérrez Díaz, M. **“Determinación del índice de erosividad de las lluvias y su relación con la cobertura vegetal, suelos y pendientes, para la cuenca del Río Grande de Térraba, Costa Rica”** Tesis. Universidad de Costa Rica – Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica, 1987.

Instituto Costarricense de Electricidad, **“Complejo hidroeléctrico Arenal, Miguel Pablo Dengo B. v Sandillal”**, Costa Rica, 2006. Disponible en la red en: www.grupoice.com

Kirkby M. J., Morgan R. P. C. **“Erosión del Suelo”**, Primera Edición, Limusa, México, 1984.

López Cárdenas de Llano, F. **“La ingeniería en los procesos de desertificación”**, Primera Edición, Editorial Grupo TRAGSA, España, 2003.

Marchamalo Sacristán, M. **“Ordenación del territorio para la producción de servicios ambientales hídricos. Aplicación a la cuenca del río Birrís (Costa Rica)”**, Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2004.

Morgan, R. P. C. **“Erosión y conservación del suelo”**, Primera Edición, Ediciones Mundi-Prensa, España, 1997.

Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). **“Manual de ordenación de cuencas hidrográficas. Estabilización de laderas con tratamientos del suelo y la vegetación”**. Guía FAO conservación 13/1. Roma, 1988.

Porras Murillo, G. **“Uso de la vegetación para la estabilización de taludes”**, Tesis. Universidad de Costa Rica, San José, 2000.

Prado Segura, R. **“Manual de instalación de barreras con geotextil silt fence para la medición de la erosión en parcelas experimentales”** Proyecto Plantón-Pacayas. Documento técnico N° 4: Área Aguas y Suelos. 2007.

Prado Segura, R. **“Metodología ajustada para la determinación de pérdidas de suelo en cultivos anuales y pastos”** Tesis. Universidad de Costa Rica, San José, 2009.

Schmidt, G. y Otaola-Urrutxi, M. **“Aplicación de técnicas de bioingeniería en la restauración de ríos y riberas”**, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Primera Edición, España, 2002.

Theisen, M. S. “The role of geosynthetics in erosion and sediment control: an overview” **Geosynthetics in Filtration, Drainage and Erosion Control**, Elsevier Science Publishers Ltd., Estados Unidos de Norteamérica, 1992.

TRAGSA. **“Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión”**, Segunda Edición, Ediciones Mundi-Prensa, España, 1998.

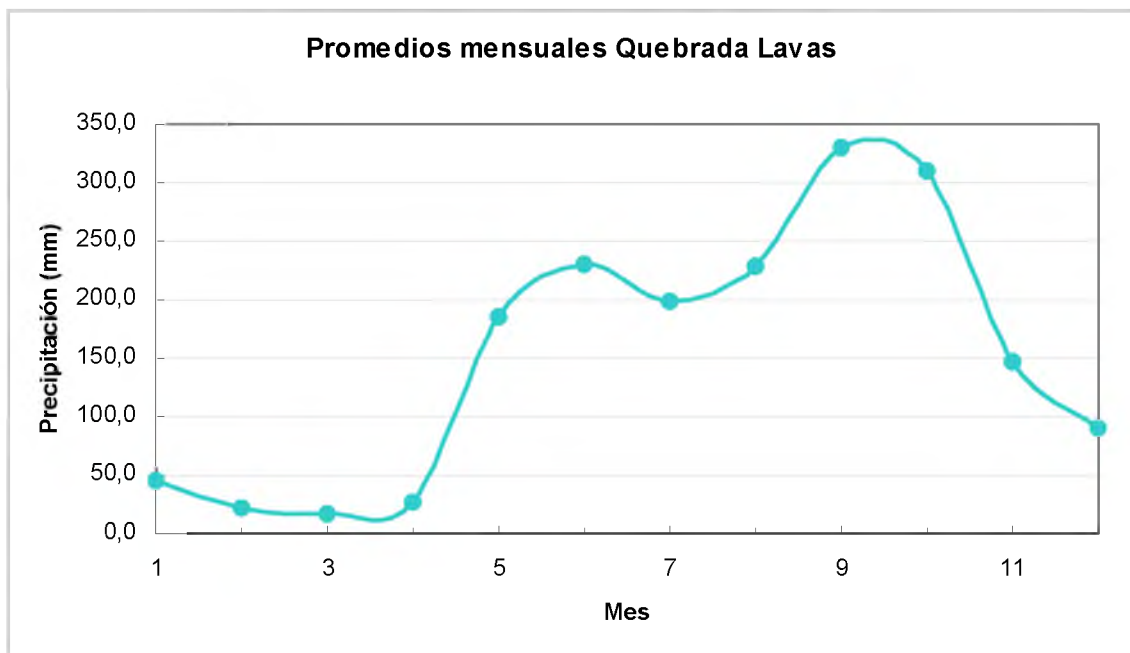
Ureña Ferero, M. **“Determinación de áreas susceptibles a erosión hídrica en la microcuenca hidrográfica tropical del río Navarrito, Cartago, Costa Rica”**, Tesis. Universidad de Costa Rica, 1999.

Vega, G. Y Stolz W. **“El fenómeno de “El Niño” su impacto en la economía de Costa Rica”**, Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, Costa Rica, 1997. Disponible en la red en:
http://www.cne.go.cr/CEDO/fenomeno_del_nino.htm

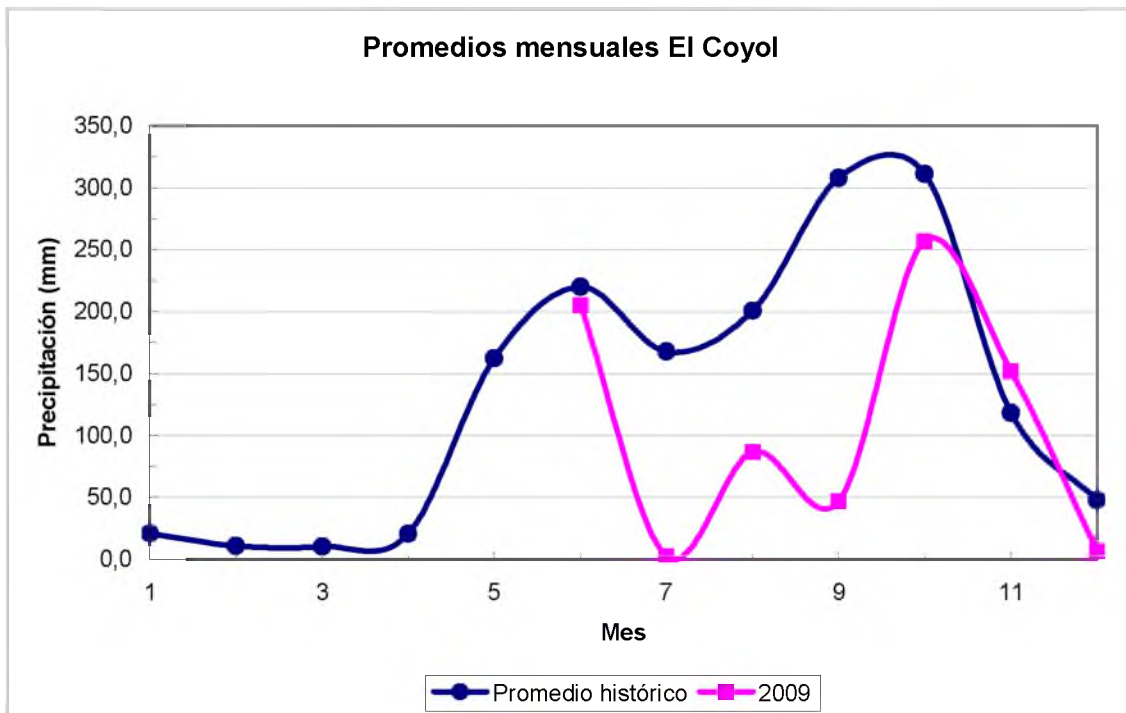
Anexos

Anexo A. Comparación entre los promedios históricos de precipitación mensual y los presentados durante el periodo Jun-Dic, 2009

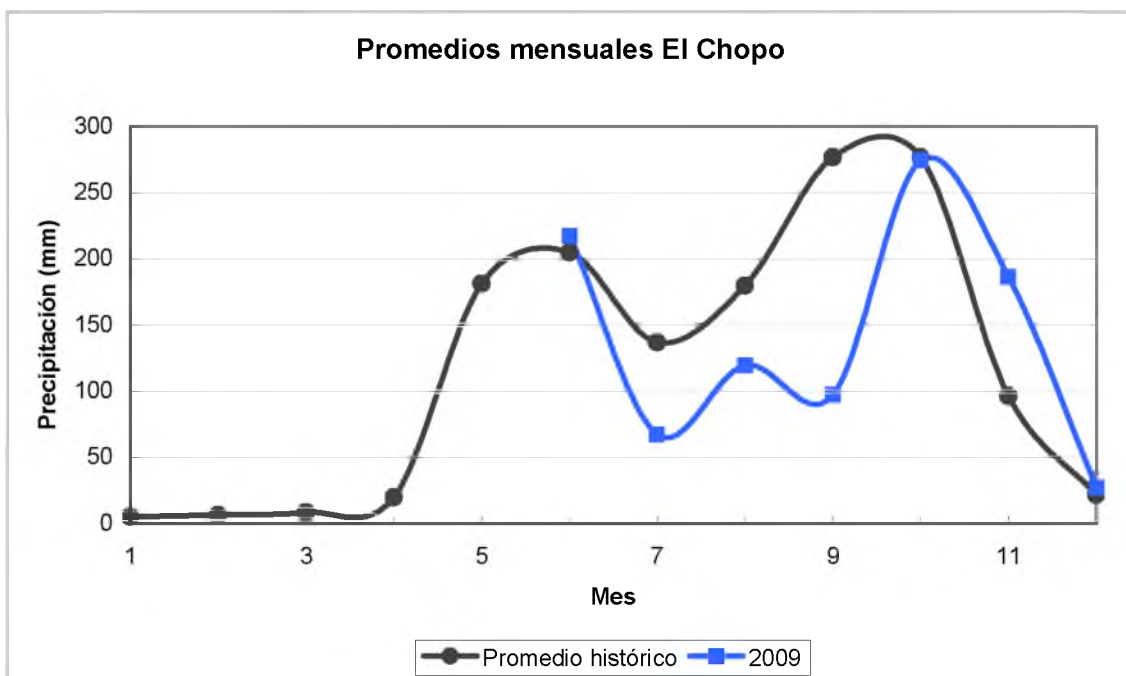
Las siguientes figuras muestran el comportamiento histórico de las lluvias de enero a diciembre (promedios mensuales) comparadas con las precipitaciones del 2009 para los meses de prueba, de junio a diciembre, para mostrar el efecto de reducción en las lluvias producido por el fenómeno del Niño, para cada una de las estaciones meteorológicas en la microcuenca media-baja.



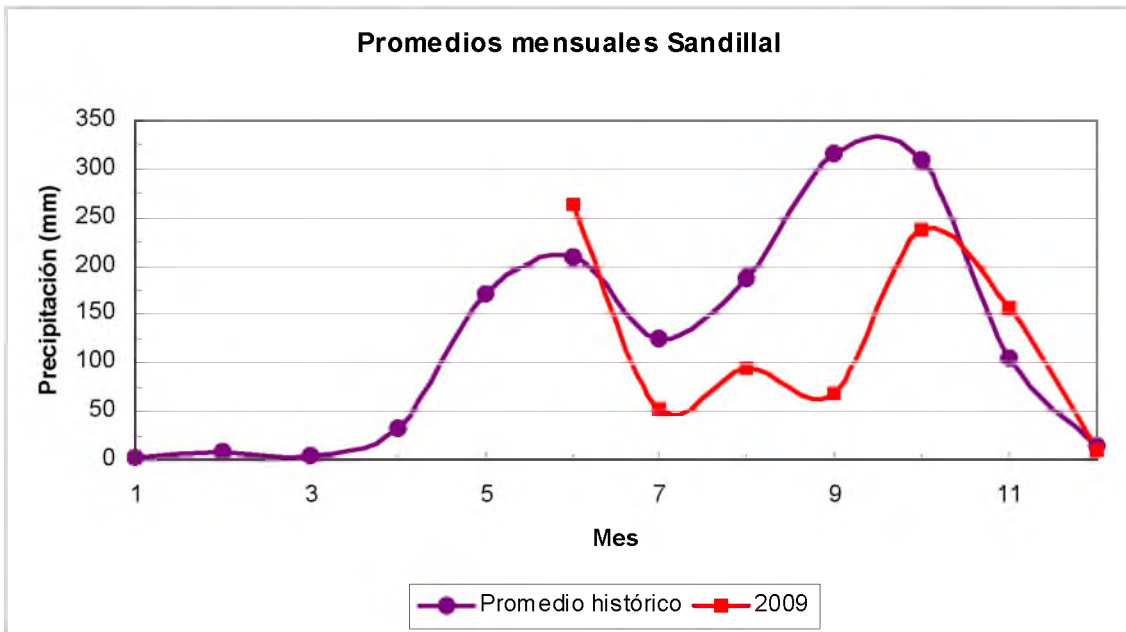
Promedios históricos de lluvias para la estación Quebrada Lavas. Ubicación: finca Alfonso Chavarría.



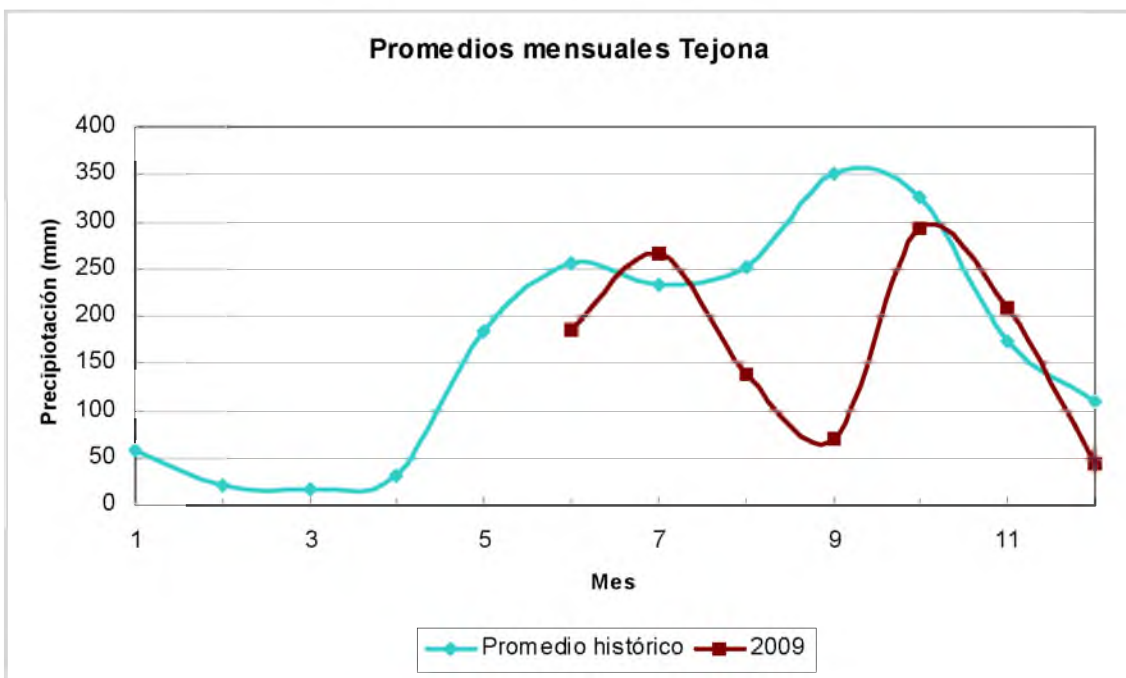
Comparación de promedios históricos de lluvias para la estación El Coyol. Ubicación: Los Ángeles, Tilarán.



Comparación de promedios históricos de lluvias para la estación El Chopo. Ubicación: Puente del río Santa Rosa.



Comparación de promedios históricos de lluvias para la estación Sandillal. Ubicación: Embalse Sandillal.



Comparación de promedios históricos de lluvias para la estación Tejona. Ubicación: Inmediaciones del C.P. Tejona.

Anexo B. Datos de energía de la precipitación y factor de erosividad R para las estaciones de la zona de influencia de la microcuenca media baja

Fecha	69552 Tejona		76021 Chopo		76040 Sandillal		76024 Coyol	
	Factor R	Energía (kg·m/m ²)	Factor R	Energía (kg·m/m ²)	Factor R	Energía (kg·m/m ²)	Factor R	Energía (kg·m/m ²)
05-jun	8,4	44,7	33,9	96,8	12,8	58,4	18,1	59,1
08-jun			8,0	35,7				
12-jun					60,5	94,6		
13-jun	9,3	45,8	4,2	33,1	17,1	62,5		
16-jun	17,4	52,6						
20-jun	4,9	29,3			7,9	34,4		
23-jun	14,0	56,0	22,8	57,4	44,6	82,0		
26-jun					20,4	71,6		
28-jun	25,5	65,2	4,3	30,1				
30-jun	5,8	31,1	54,6	109,6	78,3	117,7	154,7	216,0
03-jul	14,7	56,7						
06-jul	37,5	93,5	13,8	50,6				
10-jul	13,6	56,8						
16-jul	30,9	148,4						
21-jul	26,4	84,2						
04-ago	8,9	50,1						
15-ago			12,9	46,9				
18-ago					18,3	66,6		
20-ago	6,8	51,3					3,1	32,0
26-ago			66,7	152,6	112,6	226,1	12,3	54,5
11-sep			96,3	135,3	19,0	72,0	3,4	32,2
24-sep	3,2	28,5	30,4	72,1	10,6	44,3	5,0	37,2
02-oct			29,7	71,2			12,8	57,1
03-oct	13,3	48,5						
05-oct	5,8	40,8	51,3	102,1	150,9	165,1	40,9	102,0
08-oct			28,7	63,6			7,9	32,4
09-oct	2,9	28,7	12,1	51,8	4,2	33,4	33,7	88,5
10-oct					5,5	31,1		
19-oct	4,9	34,4	24,9	62,8			9,8	40,8
20-oct			14,5	84,0	46,7	141,4	8,8	54,1
21-oct	8,6	77,4	2,4	26,1	13,4	28,6		
23-oct	60,6	42,1						
25-oct	12,6	112,6					2,6	32,4
26-oct			7,5	36,7				
31-oct	15,2	70,6						
01-nov	35,6	68,1			13,5	42,8	5,1	33,3
02-nov							2,8	26,1
04-nov	5,4	84,4	24,6	74,4	14,7	62,8	12,9	68,4
05-nov	6,3	42,9	54,2	107,8	12,2	48,9	19,1	70,7
07-nov	15,9	42,7	82,7	185,1	125,3	189,7	8,0	62,6
08-nov	4,0	74,7						
15-nov	7,6	46,5						
19-nov	0,9	25,3						
26-nov	11,6	55,7						

Anexo C. Propiedades físicas de la geomembrana

Propiedades físicas del material utilizado.

PROPIEDADES	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	SILT FENCE
FISICAS			
Resistencia a la Tracción "Grab" (L/T)	ASTM-D-4632	N	1700/1020
Elongación a la Tracción "Grab"	ASTM-D-4632	%	18
Resistencia al Reventado "Mullen"	ASTM-D-3786	kPa	3400
Resistencia a la Perforación	ASTM-D-4833	N	560
Resistencia al Desgarre Trapezoidal	ASTM-D-4533	N	400
Resistencia a los Rayos Ultravioleta	ASTM-D-4355	% @ 500 hrs	90
HIDRÁULICAS			
Permisividad	ASTM-D-4491	sec ⁻¹	0,5
Flujo del Agua	ASTM-D-4491	l/sec/m ²	35
Abertura Aparente de Poros (AOS)	ASTM-D-4751	mm	0,425

Anexo D. Datos obtenidos para la generación de gráficas de energía y sedimentos en las parcelas experimentales

Parcela IE ESTU

Fecha	Masa húmeda acumulada (kg)	Masa seca acumulada (kg)	Precipitación acumulada (mm)	Energía total acumulada (kJ)	Energía acumulada (%)
26/06/2009	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
03/07/2009	386,8	320,5	82,9	139,7	9,5
14/07/2009	480,9	405,1	120,4	190,3	3,5
28/07/2009	606,8	518,0	120,4	190,3	0,0
07/08/2009	720,5	619,5	147,6	190,3	0,0
20/08/2009	720,5	619,5	187,0	237,2	3,2
26/08/2009	728,0	626,7	198,5	237,2	0,0
01/09/2009	953,3	815,4	267,1	389,8	10,4
10/09/2009	953,3	815,4	275,8	389,8	0,0
17/09/2009	1005,3	863,6	331,9	525,1	9,3
25/09/2009	1005,3	863,6	363,6	597,2	4,9
03/10/2009	1005,3	863,6	390,9	668,4	4,9
08/10/2009	1418,6	1219,8	419,8	770,5	7,0
22/10/2009	1692,9	1434,0	588,1	1058,8	19,7
12/11/2009	1946,3	1651,3	820,8	1462,7	27,6
25/11/2009	1949,6	1654,2	824,4	1462,7	0,0
16/12/2009	2085,5	1786,3	824,9	1462,7	0,0

Parcela IE 0-15

Fecha	Masa húmeda acumulada (kg)	Masa seca acumulada (kg)	Precipitación acumulada (mm)	Energía total acumulada (kJ)	Energía acumulada (%)
26/06/2009	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28/07/2009	3,4	2,7	80,1	190,3	13,0
07/08/2009	3,4	2,7	151,0	190,3	0,0
12/08/2009	3,4	2,7	152,6	190,3	0,0
20/08/2009	3,4	2,7	192,0	237,2	3,2
01/09/2009	5,1	4,1	267,1	389,8	10,4
10/09/2009	5,1	4,1	275,8	389,8	0,0
17/09/2009	5,1	4,1	331,9	525,1	9,3
25/09/2009	5,1	4,1	363,6	597,2	4,9
30/09/2009	5,1	4,1	364,2	597,2	0,0
08/10/2009	6,7	5,2	439,4	770,5	11,8
22/10/2009	7,8	6,3	588,1	1058,8	19,7
12/11/2009	7,8	6,3	820,8	1462,7	27,6
25/11/2009	7,8	6,3	824,4	1462,7	0,0
16/12/2009	7,8	6,3	824,9	1462,7	0,0

Parcela P 30-45 C1

Fecha	Masa húmeda acumulada (kg)	Masa seca acumulada (kg)	Precipitación acumulada (mm)	Energía total acumulada (kJ)	Energía acumulada (%)
24/06/2009	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21/07/2009	6,9	4,5	127,3	216,0	20,8
28/07/2009	6,9	4,5	127,3	216,0	0,0
04/08/2009	6,9	4,5	132,9	216,0	0,0
12/08/2009	6,9	4,5	144,3	216,0	0,0
19/08/2009	6,9	4,5	164,0	216,0	0,0
25/08/2009	6,9	4,5	187,9	248,0	3,1
01/09/2009	6,9	4,5	216,1	302,5	5,2
10/09/2009	6,9	4,5	220,5	302,5	0,0
18/09/2009	11,8	8,3	244,2	334,7	3,1
25/09/2009	11,8	8,3	262,5	371,9	3,6
08/10/2009	11,8	8,3	346,0	530,9	15,3
19/10/2009	14,7	10,8	406,3	651,7	11,6
29/10/2009	14,7	10,8	507,0	779,0	12,2
17/11/2009	16,5	12,2	662,4	1040,1	25,1

Parcela PA 0-15

Fecha	Masa húmeda acumulada (kg)	Masa seca acumulada (kg)	Precipitación acumulada (mm)	Energía total acumulada (kJ)	Energía acumulada (%)
16/07/2009	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18/09/2009	3,5	2,2	116,9	118,7	14,4
23/09/2009	3,5	2,2	117,2	118,7	0,0
30/09/2009	3,5	2,2	135,5	155,9	4,5
06/10/2009	3,5	2,2	209,5	314,9	19,3
13/10/2009	3,5	2,2	270,3	435,7	14,7
19/10/2009	3,5	2,2	279,0	435,7	0,0
29/10/2009	3,5	2,2	379,7	563,1	15,4
19/11/2009	7,5	5,1	535,1	824,2	31,7
04/12/2009	7,5	5,1	543,8	824,2	0,0

Parcela PA 15-30

Fecha	Masa húmeda acumulada (kg)	Masa seca acumulada (kg)	Precipitación acumulada (mm)	Energía total acumulada (kJ)	Energía acumulada (%)
16/07/2009	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18/09/2009	2,9	1,9	116,9	118,7	14,4
23/09/2009	2,9	1,9	117,2	118,7	0,0
30/09/2009	2,9	1,9	135,5	155,9	4,5
06/10/2009	2,9	1,9	209,5	314,9	19,3
13/10/2009	2,9	1,9	270,3	435,7	14,7
19/10/2009	2,9	1,9	279,0	435,7	0,0
29/10/2009	2,9	1,9	379,7	563,1	15,4
06/11/2009	5,4	3,4	482,2	761,6	24,1
19/11/2009	5,4	3,4	535,1	824,2	7,6
04/12/2009	7,3	4,9	543,8	824,2	0,0

Parcela PS 0-15-3

Fecha	Masa húmeda acumulada (kg)	Masa seca acumulada (kg)	Precipitación acumulada (mm)	Energía total acumulada (kJ)	Energía acumulada (%)
25/06/2009	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21/07/2009	1,5	1,0	134,6	190,3	13,0
28/07/2009	1,5	1,0	147,1	190,3	0,0
04/08/2009	1,5	1,0	148,1	190,3	0,0
12/08/2009	1,5	1,0	153,1	190,3	0,0
20/08/2009	1,5	1,0	192,5	237,2	3,2
26/08/2009	1,5	1,0	204,0	237,2	0,0
01/09/2009	1,5	1,0	267,6	389,8	10,4
08/09/2009	1,5	1,0	276,3	389,8	0,0
17/09/2009	3,5	2,4	332,4	525,1	9,3
24/09/2009	3,5	2,4	334,9	525,1	0,0
30/09/2009	3,5	2,4	364,7	597,2	4,9
07/10/2009	3,5	2,4	439,4	770,5	11,8
15/10/2009	3,5	2,4	495,6	885,9	7,9
22/10/2009	3,5	2,4	588,6	1058,8	11,8
29/10/2009	5,8	3,7	635,0	1095,5	2,5
12/11/2009	8,3	5,3	821,3	1462,7	25,1
09/12/2009	8,3	5,3	825,4	1462,7	0,0

Parcela PS 15-30-2

Fecha	Masa húmeda acumulada (kg)	Masa seca acumulada (kg)	Precipitación acumulada (mm)	Energía total acumulada (kJ)	Energía acumulada (%)
07/07/2009	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19/08/2009	4,3	3,2	60,7	18,3	3,5
26/08/2009	4,3	3,2	75,2	18,3	0,0
01/09/2009	4,3	3,2	124,3	130,8	21,3
08/09/2009	4,3	3,2	129,9	130,8	0,0
17/09/2009	4,3	3,2	171,6	130,8	0,0
24/09/2009	4,3	3,2	173,6	130,8	0,0
08/10/2009	12,9	10,5	266,2	292,4	51,9
15/10/2009	12,9	10,5	298,5	302,1	1,9
22/10/2009	12,9	10,5	394,3	362,2	11,4
29/10/2009	17,0	13,9	424,1	362,2	13,2
12/11/2009	20,7	17,6	584,5	527,8	31,4
10/12/2009	20,7	17,6	586,9	527,8	0,0

Parcela PS 30-45-1

Fecha	Masa húmeda acumulada (kg)	Masa seca acumulada (kg)	Precipitación acumulada (mm)	Energía total acumulada(kJ)	Energía acumulada (%)
25/06/2009	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21/07/2009	1,0	0,6	134,6	190,3	13,0
28/07/2009	1,0	0,6	148,7	190,3	0,0
04/08/2009	1,0	0,6	148,1	190,3	0,0
12/08/2009	1,0	0,6	153,1	190,3	0,0
20/08/2009	1,0	0,6	192,5	237,2	3,2
26/08/2009	1,0	0,6	204,0	237,2	0,0
01/09/2009	1,0	0,6	267,6	389,8	10,4
08/09/2009	1,0	0,6	276,3	389,8	0,0
17/09/2009	2,4	1,7	332,4	525,1	22,9
24/09/2009	2,4	1,7	334,9	525,1	0,0
08/10/2009	2,4	1,7	439,9	770,5	16,8
15/10/2009	2,4	1,7	495,6	885,9	7,9
22/10/2009	2,4	1,7	591,6	1058,8	11,8
05/11/2009	4,9	2,9	694,2	1169,8	44,1
12/11/2009	6,7	4,1	821,3	1462,7	20,0
09/12/2009	6,7	4,1	825,4	1462,7	0,0

Parcela PS 30-45-2

Fecha	Masa húmeda acumulada (kg)	Masa seca acumulada (kg)	Precipitación acumulada (mm)	Energía total acumulada (kJ)	Energía acumulada (%)
07/07/2009	0	0	0	0	0
19/08/2009	12,45	9,346759816	80,6	46,94	3,68894652
26/08/2009	12,45	9,346759816	97,4	46,94	0
01/09/2009	26,55	19,4985551	161	199,49	11,98868325
10/09/2009	27,75	20,62767272	169,7	199,49	0
17/09/2009	41,3	32,38417156	225,8	334,83	10,63617431
24/09/2009	41,3	32,38417156	228,3	334,83	0
08/10/2009	53,15	41,96979428	333,3	580,2	19,28327243
15/10/2009	53,15	41,96979428	389	695,6	9,069118629
05/11/2009	75,05	56,89810801	587,6	979,57	31,38590907
12/11/2009	76,54	58,38406538	714,7	1272,45	23,01701442
09/12/2009	76,54	58,38406538	718,8	1272,45	0

Parcela PS 30-45-3

Fecha	Masa húmeda acumulada (kg)	Masa seca acumulada (kg)	Precipitación acumulada (mm)	Energía total acumulada (kJ)	Energía acumulada (%)
16/07/2009	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
08/10/2009	7,0	5,5	319,0	580,2	45,6
15/10/2009	7,0	5,5	374,7	695,6	9,1
22/10/2009	7,0	5,5	467,7	868,5	13,6
29/10/2009	13,6	10,0	514,1	905,2	25,5
12/11/2009	18,0	13,6	700,4	1272,5	28,9
10/12/2009	18,0	13,6	704,5	1272,5	0,0

Anexo E. Zonas de protección de las riberas en la microcuenca del río Santa Rosa



Zona de pasto con buffer de amortiguación en los cauces de la parte alta de la microcuenca, finca del Sr. Jesús Murillo.



Zona de protección boscosa en la parte baja del cauce principal del Río Santa Rosa, finca El Chopo.

Anexo F. Problemas ocasionados por material de origen vegetal en las estructuras hidráulicas del C.G. ArCoSa.

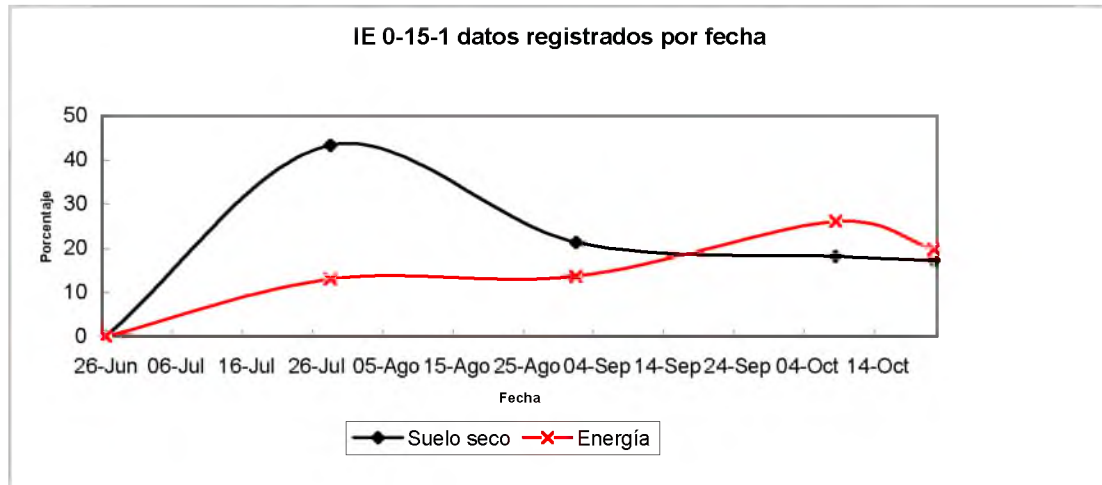


Troncos acumulados en estructuras del embalse Santa Rosa.

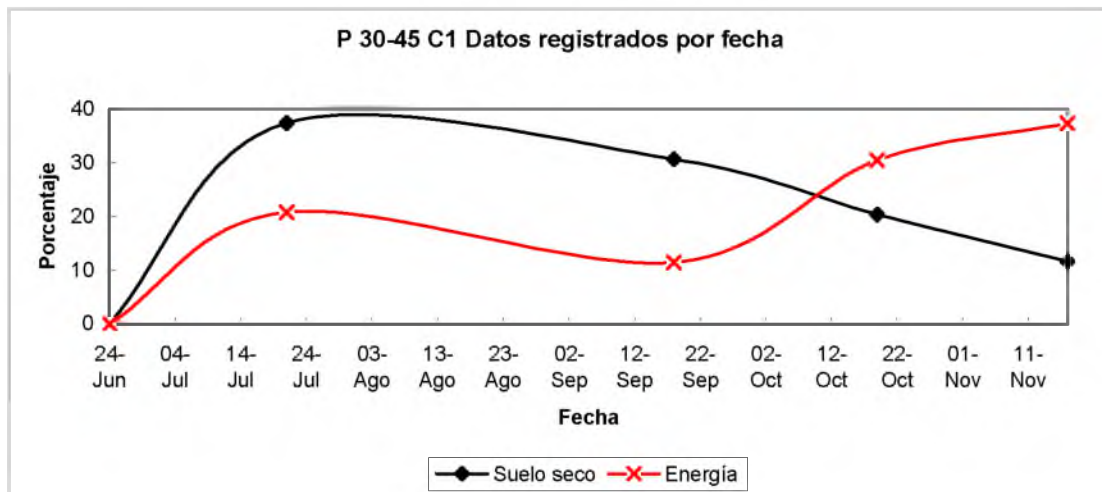


Apertura incompleta de compuertas, en la zona aledaña a la toma de aguas del C.P. Ing. Miguel Pablo Dengo B. en el embalse Santa Rosa.

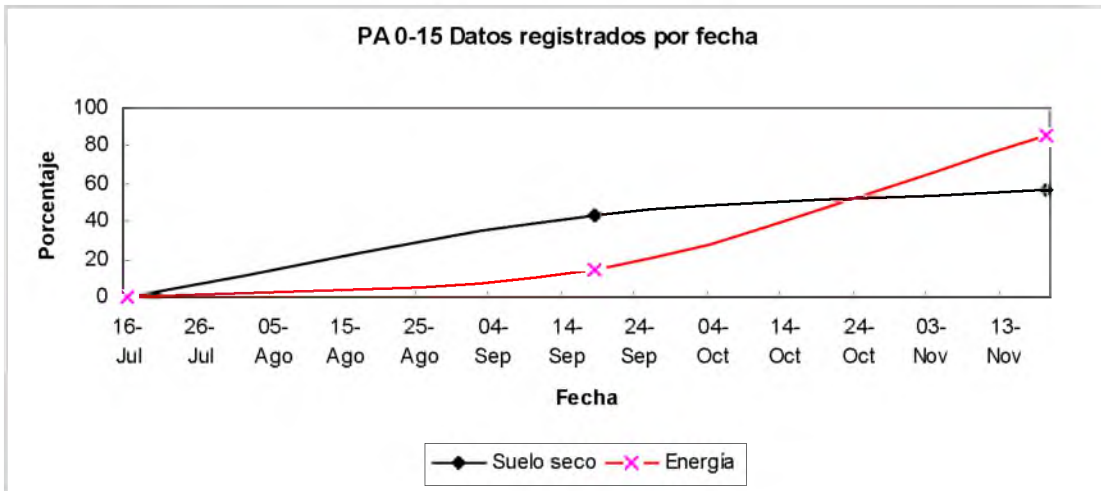
Anexo G. Variación porcentual de la energía y la masa de sedimento seco recolectado en la geomembrana de las parcelas experimentales a lo largo del periodo de prueba.



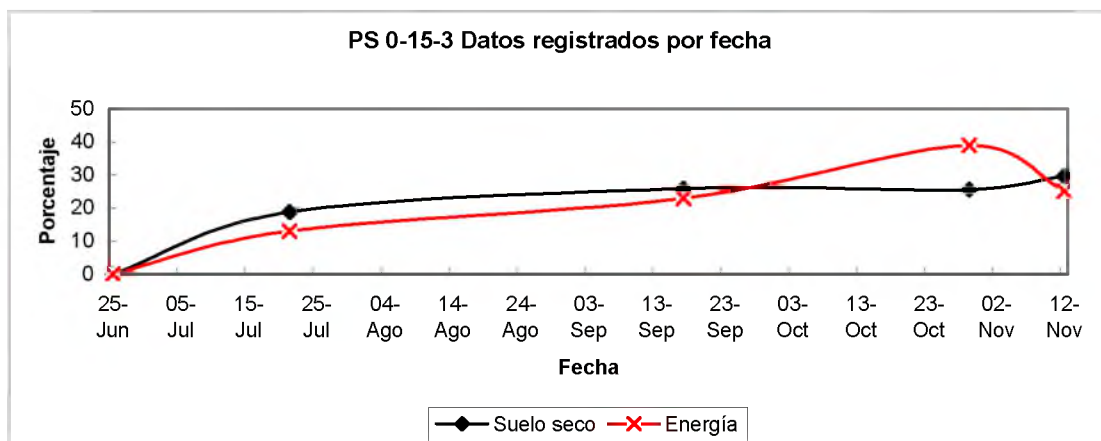
Variación porcentual de la energía de la lluvia y la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela IE 0-15-1.



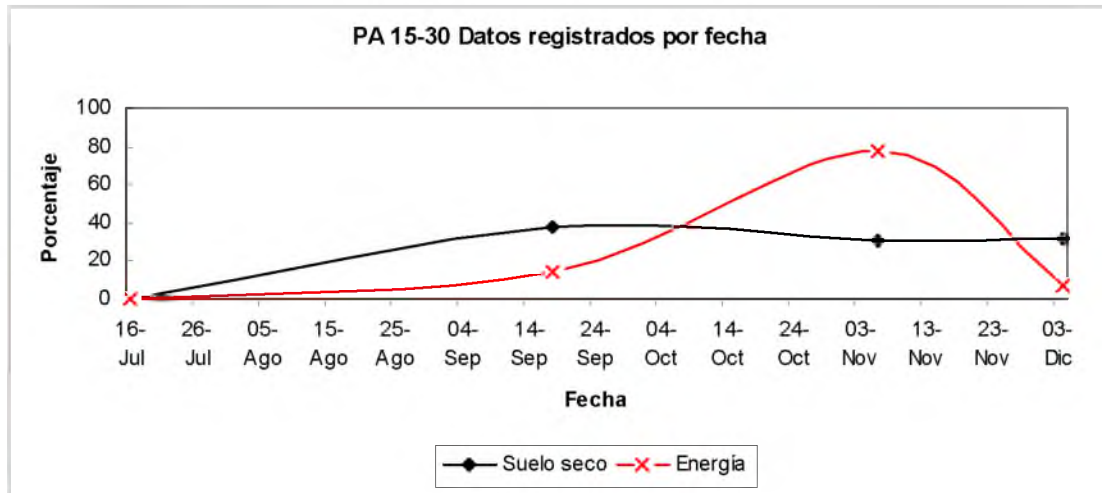
Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela P 30-45 C1.



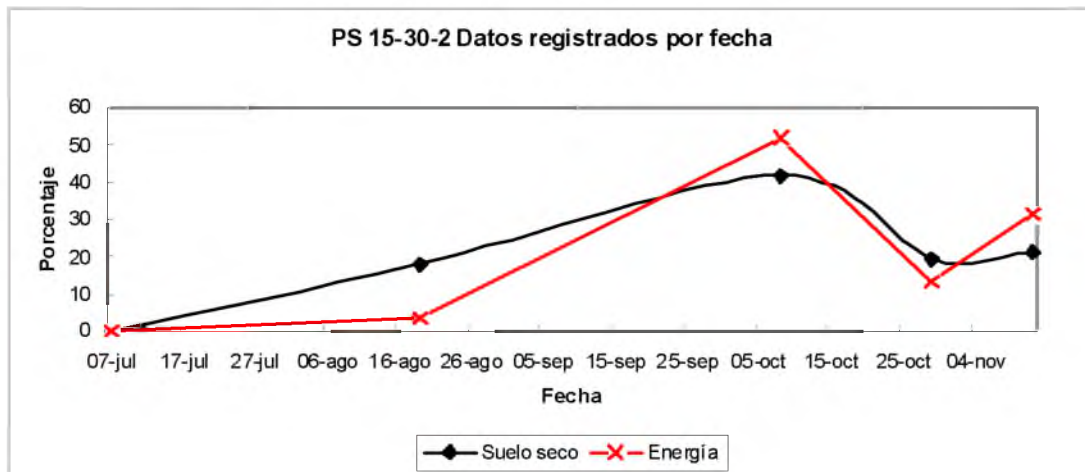
Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela PA 0-15.



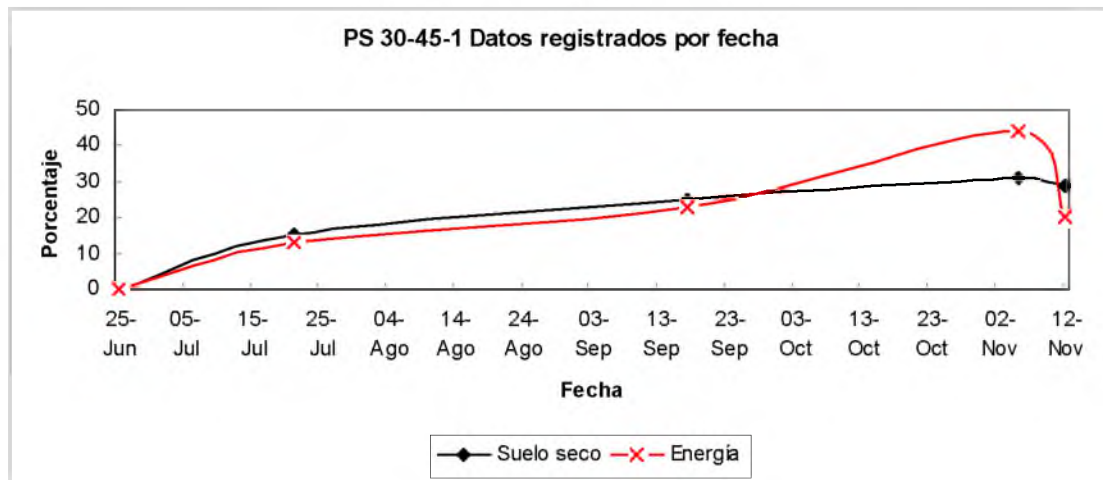
Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela PS 0-15-3.



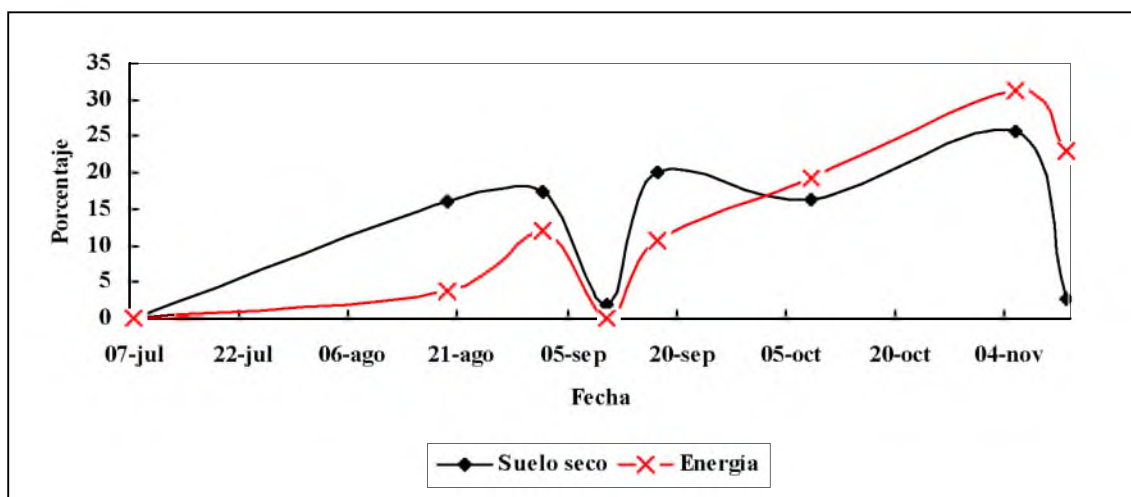
Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela PA 15-30.



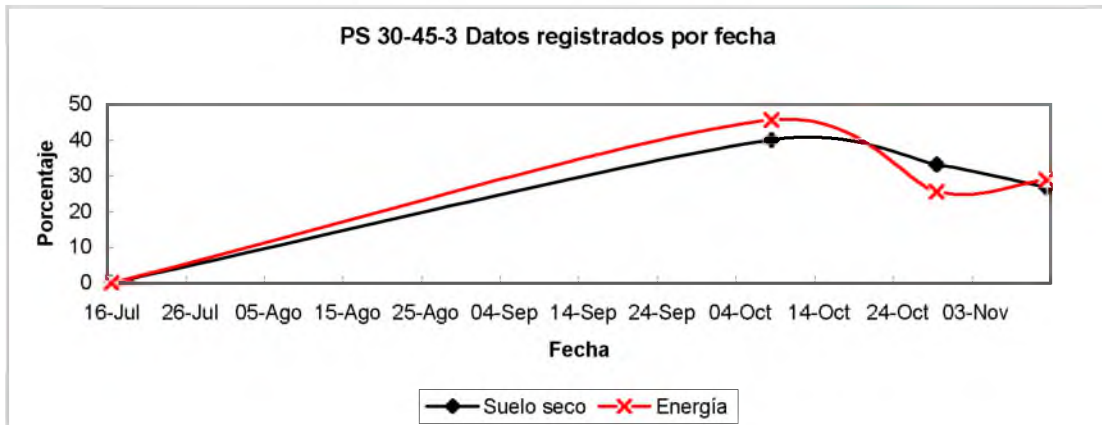
Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela PS 15-30-2.



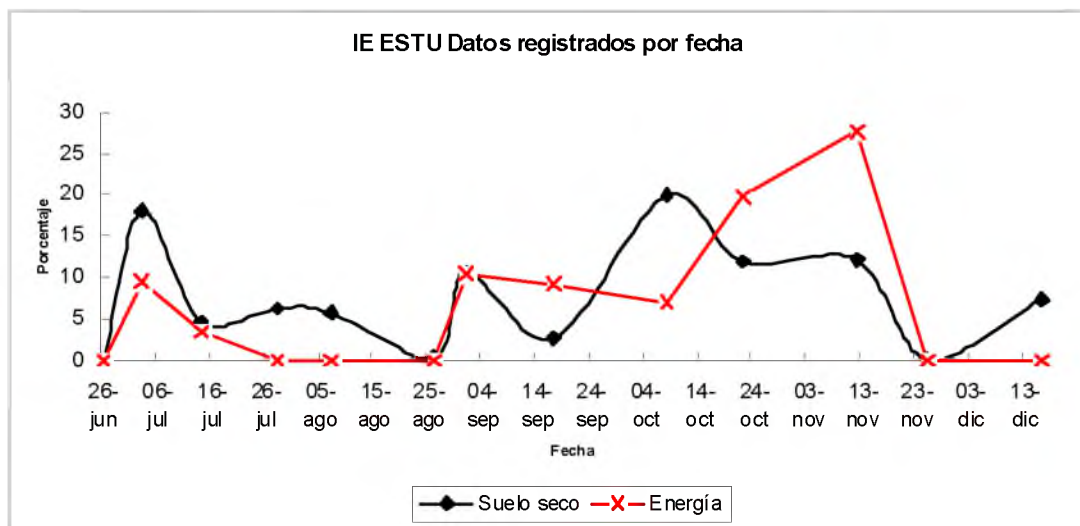
Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela PS 30-45-1.



Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela PS 30-45-2.



Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela PS 30-45-3.



Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela IE ESTU.

Anexo H. Recomendaciones de técnicas de conservación para riberas de ríos

Existen técnicas de bioingeniería o combinaciones de técnicas para la protección, estabilización y refuerzo en las laderas de las riberas de ríos. A continuación se mencionan algunas, cuya aplicación específica depende de las características del sitio que presente los problemas de erosión o inestabilidad.

1. Empalizada de la orilla del cauce y protección de la ribera con geomembrana y estanquillado para la revegetación de la ribera.

Esta técnica al igual que la siguiente que representa una combinación de varias metodologías, es más recomendable para sitios con pendiente suave en las orillas y riberas, pues está enfocada principalmente en la protección de márgenes contra el socavamiento y protección del suelo.



Primeras fases del proceso de estancillado combinado con utilización de geotextiles.

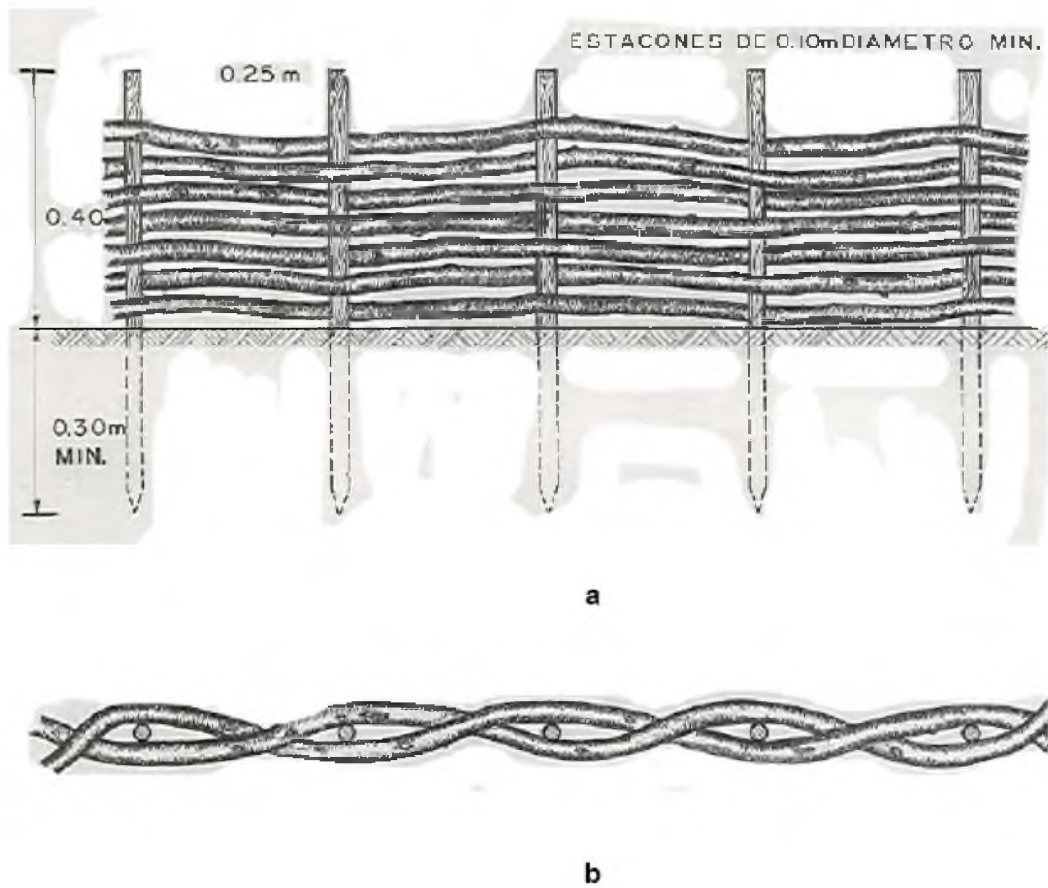


Estanquillado del margen del río.



Estabilización de la cobertura vegetal.

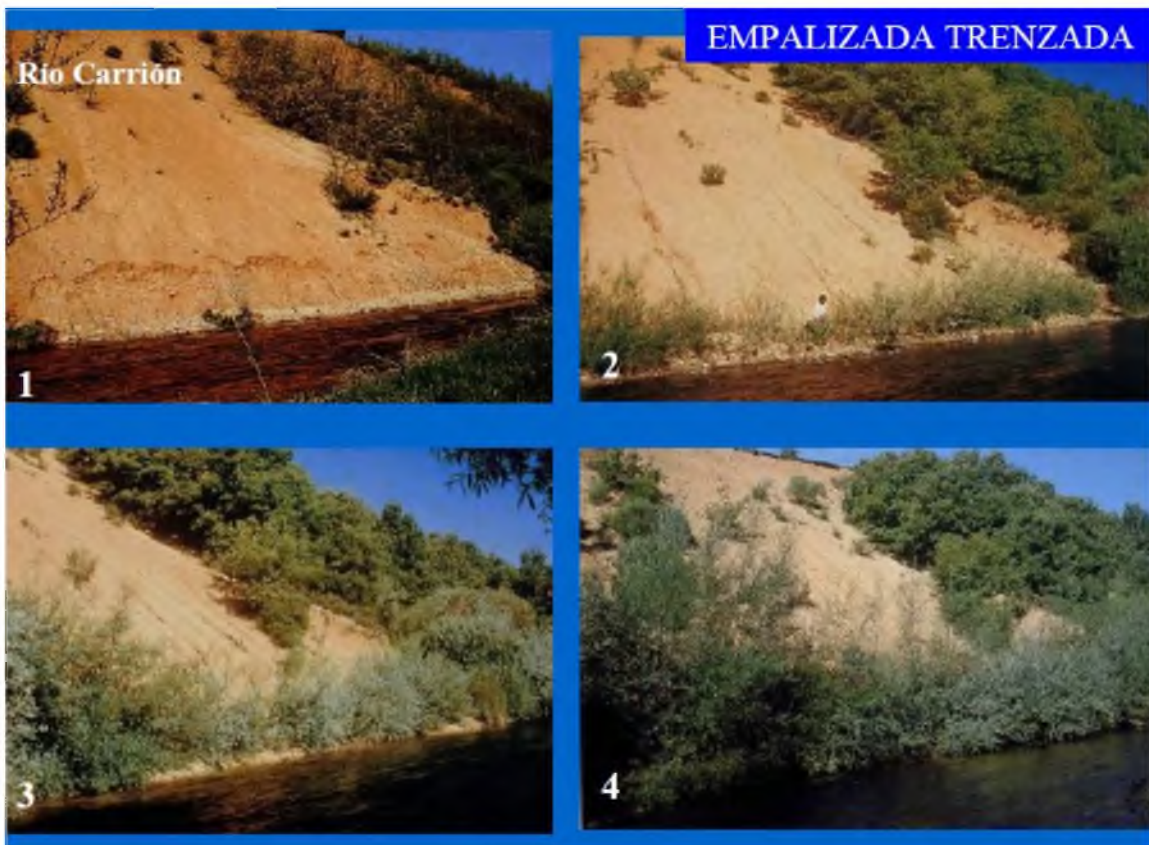
La siguiente figura muestra las vistas lateral y en planta respectivamente del sistema de empalizada trenzada y algunas indicaciones de dimensiones mínimas para que trabaje de forma adecuada.



Dimensionamiento de estaquillado.

2. Empalizada trenzada para protección de la parte baja de la ribera y regeneración de la vegetación natural.

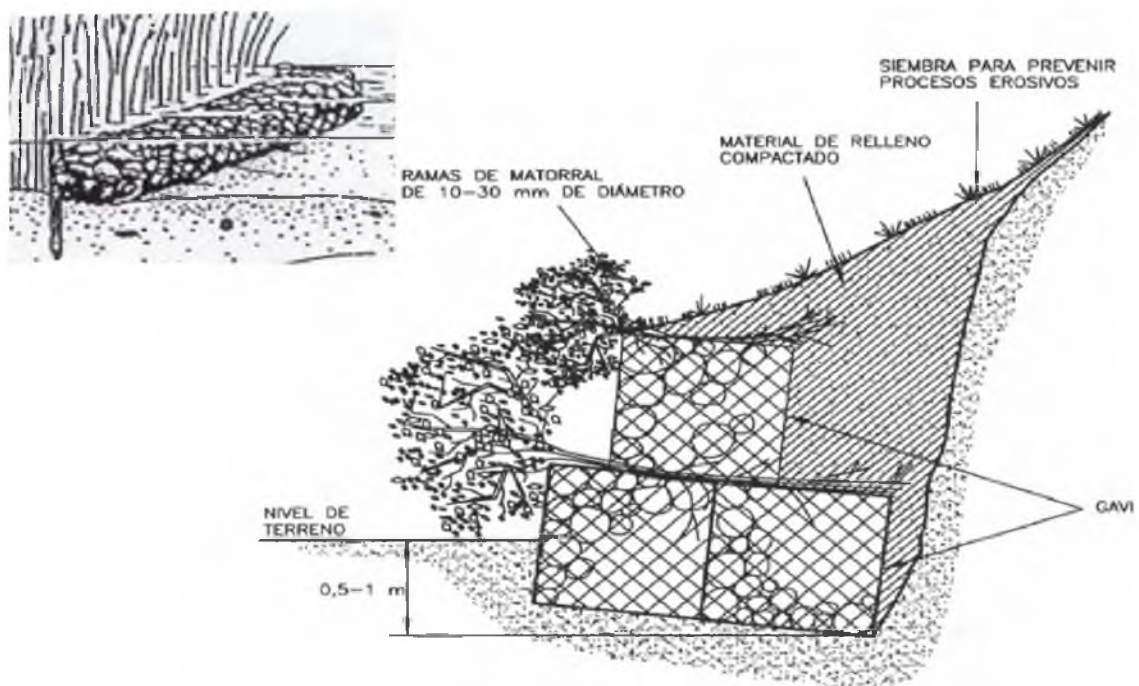
Esta técnica se puede utilizar combinada con otras técnicas como la protección del talud con geomembrana e hidrosiembra de especies herbáceas o la siembra de filas de fajas en los sectores más vulnerables de la ribera, con el fin de cortar la pendiente y acelerar el proceso de revegetación y afirmamiento de la superficie del suelo.



Fases de revegetación de ribera utilizando la técnica de la empalizada trenzada en los márgenes del río.

3. Gaviones vegetados

Esta combinación de técnicas es eficiente para estabilizar el pie del talud y reducir la inclinación del terreno, no se recomienda si existen tensiones laterales. La altura recomendada del gavión es 1,5 m incluyendo la cimentación.



Colocación y dimensionamiento de gaviones rígidos combinados con vegetación.

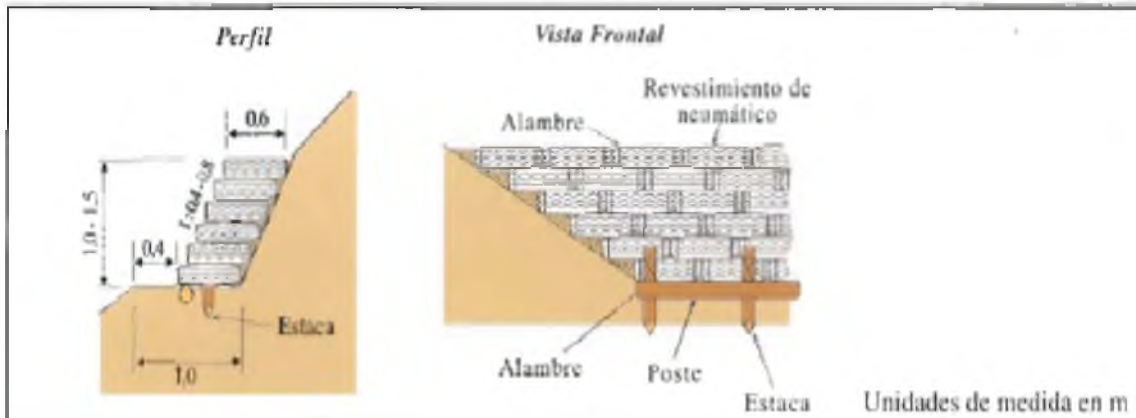
4. Retención con llantas rellenas de tierra combinada con protección de la ladera mediante geotextiles.

Su objetivo es la estabilización de los taludes, estabilizar el área de contacto entre el talud y el cauce, evitar la socavación en la base de las riberas y regular el impacto lateral del flujo directo del curso de agua.

Resulta una alternativa económica y amigable con el ambiente al reutilizar las llantas viejas, las cuales rellenas de tierra sirven como soporte para laderas de taludes y riberas, el geotextil brinda protección al suelo mientras se establece la cobertura herbácea.



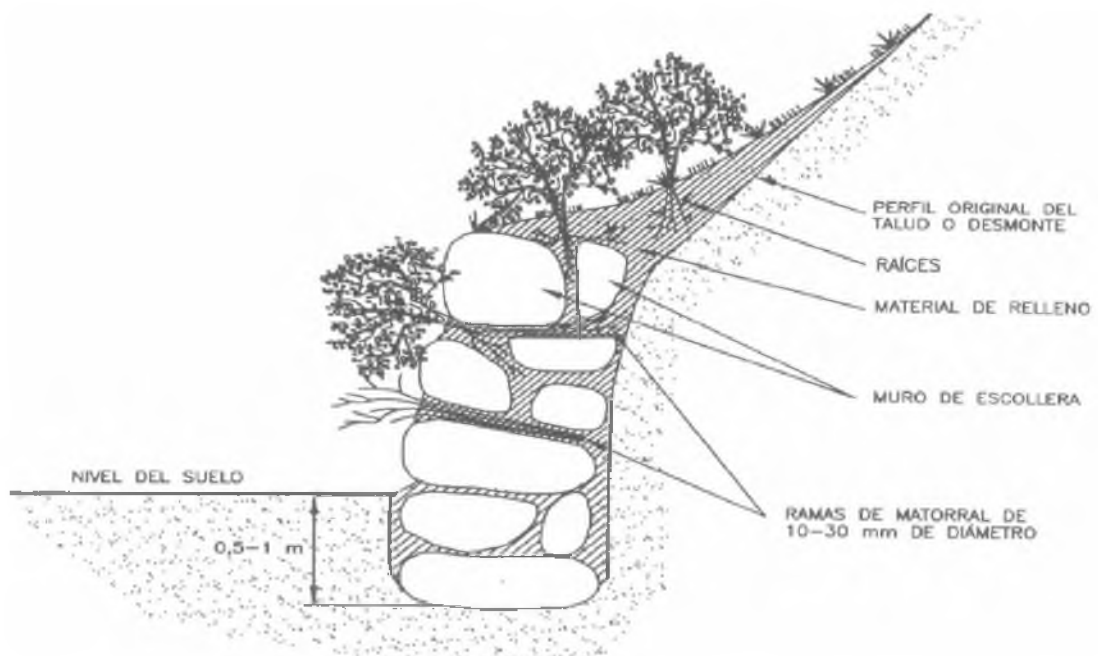
Ejemplo de barrera de retención utilizando llantas y geomembranas.



Diseño del sistema de retención con llantas.

5. Muro de roca con vegetación

Sirve como soporte adicional a otras técnicas o estructuras, no recomendada en caso de que existan cargas laterales. Su altura máxima recomendada es de 2 m.



Esquema y dimensionamiento del muro de piedra.

6. Fajinas

Esta técnica se utiliza en la estabilización de riberas y taludes, mediante la siembra de hileras de estacas vivas de algún tipo de vegetación nativa que tenga una gran facilidad de rebrote. Se favorece el amarre del suelo mediante la salida de las raíces en los brotes y el corte de la pendiente mediante el tipo de siembra, con fajas o filas de estacas bien entrelazadas.



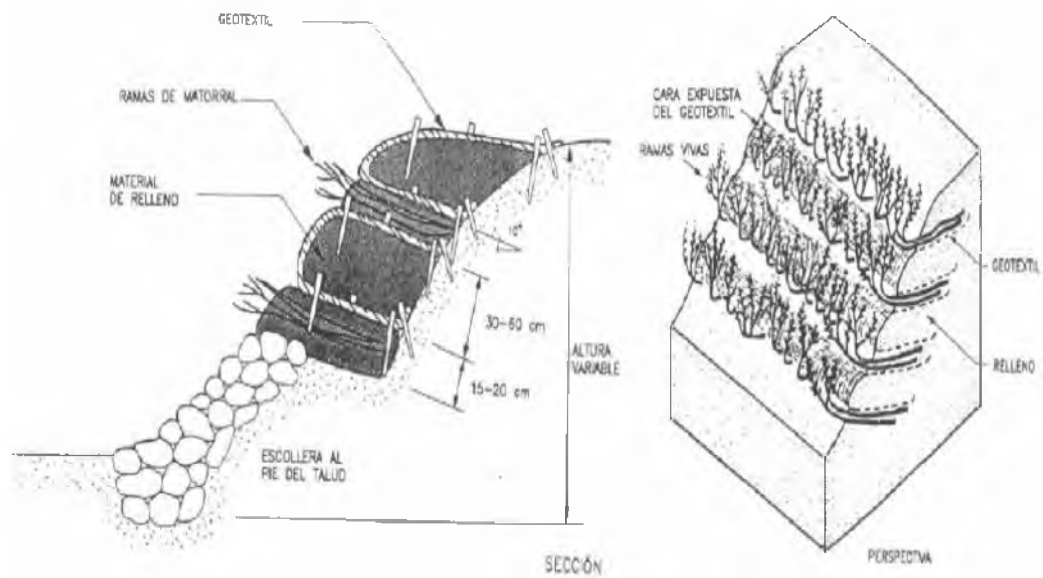
Fajinas en pendiente de moderada a fuerte después de su instalación.



Sistema de fajinas ya establecido con regeneración de la cobertura vegetal.

7. Tierra reforzada

Esta técnica resulta útil en riberas con pendiente suave y no expuestas a crecidas frecuentes o muy violentas.



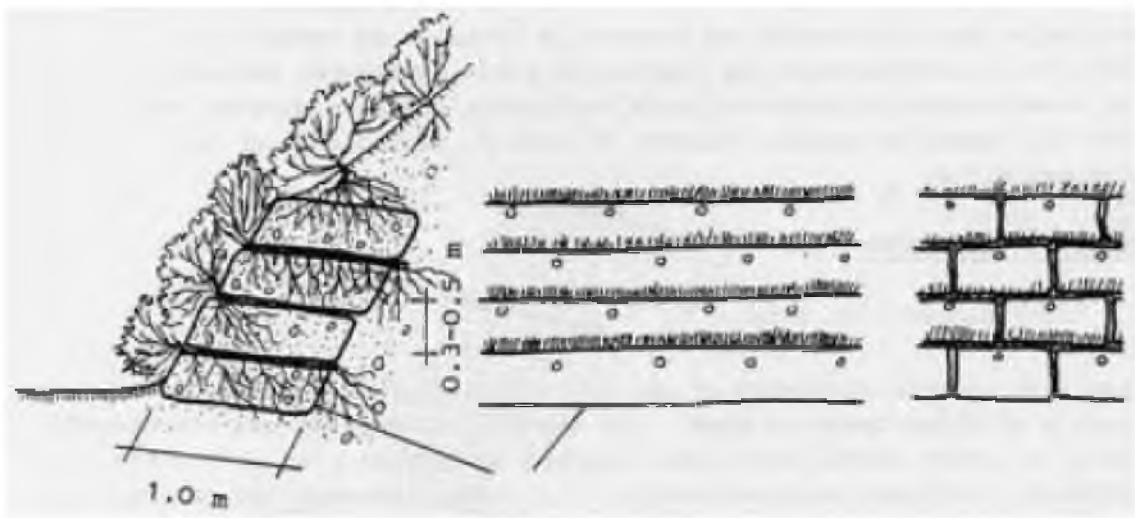
Esquema del método de tierra reforzada.



Ejemplo de utilización del sistema de tierra reforzada en combinación con estacas de vegetación.

8. Gaviones flexibles combinados con otras técnicas

Se requieren geotextiles o geomembranas hechos de materiales que no se pudran, son muy resistentes a la tensión. Como relleno se recomienda utilizar materiales de grano fino, excepto los gaviones flexibles de geosintéticos ya diseñados para este propósito.



Croquis de la colocación del gavión flexible y la vegetación.



Gavión flexible tipo saco relleno de arena combinado con estacas enraizadas para reforzar una margen erosionada.



Gavión pre vegetado durante su instalación.

Anexo I. Vegetación recomendada o sugerida para el control de la erosión en Centroamérica (tomado de Porras Murillo, 2000)

Nombre	Altura promedio (m)	Suelos	Propagación	Consideraciones especiales	Zonas ecológicas
Acacia amarilla (<i>Cassia siamea</i>)	18	Ácidos o alcalinos; arcillosos o arenosos	Semilla, planta	Soporta 4 - 8 meses de estación seca	0 - 1500m, trópico cálido
Acacia (<i>Acacia Mangium</i>)	30	Rango amplio	Semilla, estaca	Especie pionera, excelente en recuperación de suelos	30 - 1100m, 21 - 27°C, 700 - 4300 mm (bs-T, bh-T, bmh-T, bmh-P)
Aliso o Jaúl (<i>Alnus acuminata</i>) (<i>Alnus jondensis</i>)	10 - 30	Frescos, cerca de ríos, sitios húmedos	Planta, estacas	Soporta heladas breves e inundaciones	1300 - 3500m, 7 - 35°C, 500 - 5000 mm, bs-MB, bh-MB, bmh-MB, bf-M,
Aripin (<i>Caesalpinia verticillata</i>)	5 - 20	Rango amplio	Semilla, planta	La especie rebrota	0 - 500m, 1000 - 2000mm, 24 - 28°C (bmh-P, bs-T, bh-T)
Bracatinga (<i>Mimosa Scabrella</i>)	12 - 20	Suelos bien drenados arenosos y francos	Planta	Es limitado por suelos muy compactados	600 - 1800m, 18 - 22°C, 1100 - 3500 mm (bh-T, bh-MB, bh-P, bmh-P)
Casuarina (<i>Casuarina equisetifolia</i>)	15 - 30	Rango amplio	Semilla, estaca adulta	Se la comen los animales, tolera 6 - 8 meses de sequía	0 - 2300m, 10 - 35°C, 750 - 5000 mm, todas las zonas.
Cuje o Guaba (<i>Inga Spp.</i>)	10 - 20	Ácidos y cálidos, bien drenados	Semilla, planta	La especie rebrota	0-1000m, altas y lluviosas, templadas costeras.
Aro (<i>Trichantera Gigante</i>)	8 - 10	Drenaje bueno a lento, textura franca, franco arcilloso, franco arenoso	Estaca, semilla	La especie rebrota	600 - 1700m, 19 - 24°C, 1400 - 2800mm (bs-T, bh-T, bh-PM, bmh-PM)

Nombre	Altura promedio (m)	Suelos	Propagación	Consideraciones especiales	Zonas ecológicas
Arrayán (<i>Myrcia Popayanensis</i>)	10	Drenaje bueno a deficiente, franco arcilloso	Semilla		1100 - 2200m, 14 - 22°C, 1500 - 3000mm (bh-PM, bmh-PM, bh-MB, bmh-MB)
Bayeto (<i>Jacaranda Caucana</i>)	25	Drenaje bueno a imperfecto, franco arcilloso	Estaca, semilla		400 - 1700m, 18 - 24°C, 1500 - 3000mm (bh-PM, bmh-PM, bh-MB, bmh-MB)
Balsa (<i>Ochroma Pyramidata</i>)	25	Drenaje bueno, arcilloso, limoso, franco arenoso	Semilla		0 - 1700m, 20 - 30°C, 1000 - 2500mm (bs-T, bh-T, bmh-T, bh-PM, bmh-PM)
Chaporuto (<i>Erythrina edulis</i>)	8 - 10	Drenaje bueno a imperfecto, franco arcilloso	Estaca, semilla		600 - 1800m, 17 - 25°C, 1500 - 2800mm (bs-T, bh-T, bh-PM, bmh-PM)
Poró (<i>Erythrina Poeppigiana</i>)	20 - 25	Drenaje regular, franco arcilloso, francos	Estacas de ramas, semilla	Se recupera de podas frecuentes, puede dañar al ganado.	600 - 1700m, 20 - 28°C, precipitación 1000 - 3000 mm) (bs-T, bh-T, bh-PM, bmh-PM)
Cedro amarillo (<i>Pseudotsamanea Guachapale</i>)	25	Drenaje bueno, limoso, arenoso, franco arcilloso	Semilla		0 - 1300m, 20 - 30°C, precipitación 1000 - 3000 mm) (bs-T, bh-T, bh-PM, bmh-PM)
Cedro (<i>Cedrela odorata</i>)	40	Drenaje lento a algo excesivo, franco arenoso, arenoso franco, arcilloso	Estaca, semilla		0 - 1500m, 17 - 32°C, 1000 - 3000 mm (bs-T, bh-T, bh-PM, bmh-PM)
Ceiba (<i>Erythrina Fusca</i>)	20	Drenaje lento a algo excesivo, franco arcilloso	Estacas, rebrote, semilla		450 - 1400m, 18 - 27°C, 800 - 3000mm) (bs-T, bh-T, bh-PM, bmh-PM)

Nombre	Altura promedio (m)	Suelos	Propagación	Consideraciones especiales	Zonas ecológicas
Espavei (<i>Anacardium excelsum</i>)	40	Drenaje bueno a imperfecto, franco arcilloso, franco arenoso, limoso	Semilla	Se recupera muy bien de podas muy fuertes	0 - 1300m, 21 - 27°C, 500 - 4500 mm, (bs-T, bh-T, bmh-T, bs-PM, bh-PM, bmh-PM)
Eucalipto (<i>Eucalyptus saligna</i>)	40 - 55	Arenoso, franco arenoso drenaje bueno	Semilla, estaca		75 - 1800m, 18 - 26°C, 900 - 3500 mm, (bs-T, bh-T, bmh-T, bs-PM, bh-PM, bmh-PM)
Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>)	40	Drenaje bueno, suelos húmedos y profundos, franco arenosos, franco arenoso, franco	Rebrote y semilla		500 - 2200m, 5 - 35°C, 1000 - 4000mm (bs-T, bh-PM, bmh-PM, bh-MB, bmh-MB)
Guachipelin (<i>Diplospora robinoides</i>)	5 - 9	Rango amplio	Semilla, planta	Alcanza 23m en buen sillo, rebrota bien	0 - 1500, altas y lluviosas templadas costeras
Guácimo (<i>Guazuma Ulmifolia</i>)	8 - 30	Drenaje lento a excesivo, textura muy amplia	Estaca, semilla		0 - 1500m, 20 - 30°C, 500 - 2500mm (bms-T, bs-T, bh-T, bs-PM, bh-PM, bmh-PM)
Guamo (<i>Inga densiflora</i>)	10 - 17	Buen drenaje	Semilla		300 - 1700m, 18 - 30°C, 1500 - 2500mm (bs-T, bh-T, bh-PM, bmh-PM)
Madre cacao o Madero negro (<i>Gliricidia Septium</i>)	10 - 12	Rango amplio	Semilla, planta estaca	Tolera 6 - 8 meses de sequía	0 - 1400m, 20 - 30°C, 1500 - 3000mm (bs-T, bh-T, bh-PM, bmh-PM)

Nombre	Altura promedio (m)	Suelos	Propagación	Consideraciones especiales	Zonas ecológicas
Melina (<i>Gmelina arborea</i>)	20 - 30	Drenaje bueno, crece mal en suelos secos, suelos profundos, texturas amplias (excepto suelos arenosos secos), suelos ácidos	Rebrote semilla		0 - 1000m, 18 - 35°C, 750 - 4000mm (bms-T, bs-T, bh-T)
Nim (<i>Azadirachta indica</i>)	18	Rango amplio, pobre	Semilla, planta	No nativo, tolera suelos salinos encharcados	500 - 1500m, bajas y calidas
Nogal (<i>Juglans Neotrópica</i>)	20 - 30	Drenaje bueno, franco, limoso franco arenoso, suelos sueltos	Semilla		1600 - 2500m, 14 - 22°C, 1000 - 3000mm (bh-PM, bnh-PM, bh-MB, bnh-MB)
Pochote (<i>Bombacopsis quinatum</i>)	30	Suelos profundos, franco, arenosos franco arcilloso, buen drenaje	Semilla, estaca	Crecimiento limitado ante exceso de humedad o pendientes altas	0 - 900m, 20 - 27°C, 2200 - 4600mm (bs-T, bh-T, bnh-T, bnh-P)
Roble de río (<i>Tabebuia Rosea</i>)	20 - 30	Drenaje bueno a lento, franco arenoso, arenoso, arcilloso	Estocón, rebrote, semilla	Tolera pequeñas inundaciones	0 - 1800m, 18 - 30°C, 1200 - 5000mm (bs-T, bh-T, bnh-T, bh-PM, bnh-PM)
Roble (<i>Quercus Humboldtii</i>)	20 - 40	Arcillosos, limosos, ácidos	Estaca, rebrote, semilla		2000 - 2800m, 10 - 17°C, 1300 - 3000mm (bh-PM, bnh-PM, bh-MB, bnh-M)
Sauce Colorado (<i>Salix Humboldtiana</i>)	20	Drenaje bueno a lento, arenoso, franco limoso, limoso	Estaca, semilla	Rebrote por medio de cepas	300 - 2800m, 12 - 26°C, 600 - 3000 mm (bs-T, bh-T, bh-PM, bnh-PM, bs-MB, bh-MB, bnh-MB)

Nombre	Altura promedio (m)	Suelos	Propagación	Consideraciones especiales	Zonas ecológicas
Pino (<i>Pinus Patula</i>)	30	Drenaje bueno a excesivo, arcilloso, franco, franco arenoso, arenoso.	Semilla		800 - 3300m, 8 - 22°C, 1000 - 3000mm (bs-T, bh-T, bh-PM, bmh-PM, bh-MB, bh-ME, bh-M, bmh-M, bp-M)
Teca (<i>Tectonia Grandis</i>)	50	Buen drenaje, no tolera suelos secos o inundables, franco franco arenoso, franco arcilloso arcilloso	Estaca, semilla, rebrote		0 - 1000m, 18 - 32°C, 1000 - 4000mm (bs-T, bh-T)
Chauté (<i>Tecoma stans</i>)	3	Pobre pero bien drenado	Semilla, planta	Es una especie pionera	0 - 1800m, bajas y cálidas
Flor barbona (<i>Caesalpinia pulcherrima</i>)	2 - 5	Llanuras y pendientes secas	Semilla, planta	Crece bien con el palo de rayo	0 - 900m, valles
Gandúl (<i>Canajus Cajan</i>)	3	Rango amplio	Semilla, planta	No tolera inundaciones	0 - 1000m, bajas y cálidas, áreas húmedas
Guayaba (<i>Psidium Guayaba</i>)	10	Rango amplio	Semilla, planta	**	0 - 1000m, varias zonas
Palo de rayo o Palo verde (<i>Parkinsonia aculeata</i>)	6	Rango amplio	Semilla	Rocosos y arenosos, calizos y salinos	0 - 1300m, áridos y semiáridos
Plumajillo (<i>Alvaradoa amorphoides</i>)	15	Rango amplio	Semilla, planta	Es una especie pionera	0 - 1400m, bajas y cálidas

Nombre	Altura promedio (m)	Suelos	Propagación	Consideraciones especiales	Zonas ecológicas
Sauce (<i>Salix spp.</i>)	12	Rango amplio	Estacas, estaquillas	Generalmente en sitios húmedos	Montañas, al nivel del mar
Sauce Colorado (<i>Salix Humboldtiana</i>)	20	Drenaje bueno a lento, arenoso, arena limoso, limoso	Estaca, semilla	Retrota por medio de cepas	300 - 2800m, 12 - 28°C, 600 - 3000 mm (bs-T, bh-T, bh-PM, bmh-PM, bs-MB, bh- MB, bmh-MB)
Yaje o Leucaena (<i>Leucaena leucocephala</i>)	10	Drenaje bueno, arenoso, franco arenoso, arcilloso	Semilla, planta estaca	No crece bien en suelo barroso o ácido (pH >5)	0 - 1500m, 16 - 40°C, 500 - 4000 mm (bms-T, bs-T, bh- T, bs-PM, bh-PM, bmh-PM)