

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

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN
POTENCIAL DE EROSIÓN EN LA
MICROCUENCA MEDIA-ALTA DEL RÍO
SANTA ROSA, TILARÁN, GUANACASTE**

Por:

RONALD ESTEBAN AGUILAR ÁLVAREZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Junio de 2010

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN POTENCIAL DE EROSIÓN EN LA MICROCUENCA MEDIA-ALTA DEL RÍO SANTA ROSA, TILARÁN, GUANACASTE

Por:

RONALD ESTEBAN AGUILAR ÁLVAREZ

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:

Ing. Georges Govaere Vicarioli, PhD.
Presidente Tribunal

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

Ing. Daniel Baudrit Ruiz, MBA.
Miembro, Comité Asesor

Ing. Henry Alfaro Chavarría, MSc
Miembro, Comité Asesor

Ing. Karla Sánchez Campos, MSc.
Coordinadora Unidad de Cuencas ArCoSa
Miembro, Comité Asesor

Dedicatoria

A Dios,

por darme lo más grande que he recibido en esta vida:

MIS PADRES

Agradecimientos

A toda mi familia por su presencia y apoyo.

A mi compañero de trabajo en la “U”, Sisgo Acuña Chinchilla, con quien culminé mis estudios universitarios realizando un gran trabajo en equipo durante seis meses en Tilarán, Guanacaste.

Al Director de la Escuela de Ingeniería Agrícola, Ing. José Fco. Aguilar por su guía y colaboración durante mi estancia como estudiante universitario.

Al personal del ICE, Willian García, Victor Montero, José Zúñiga y Carlos Roberto Rodríguez por su ayuda y colaboración.

Al CG ArCoSa y compañeros de trabajo: Karla Sanchez, Ana Ramírez, Graciela Villalobos, Gustavo Núñez, Luis Alfaro, David Campos, Danny Campos, Edgar Villalobos, Eduardo Sibaja, Erick Selva, Ricardo Zúñiga, Willian Cordero, Freddy Rojas, Alberto Porrás.

Y a todos los que han estado en las buenas y las malas.

MUCHAS GRACIAS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
RESUMEN.....	xv
CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	4
1.3 Zona de estudio	6
1.3.1 Reseña del Centro de Generación ArCoSa	6
1.4 Caracterización temporal: Año Niño	9
1.5 Objetivos	10
1.5.1 Objetivo general.....	10
1.5.2 Objetivos específicos	10
CAPÍTULO 2: Erosión del suelo	11
2.1 Introducción	11
2.2 Proceso de erosión hídrica	11
2.3 Formas de erosión.....	13
2.3.1 Laminar	14
2.3.2 Surcos.....	14
2.3.3 En cárcavas	14
2.3.4 Corrientes de lodo.....	15
2.3.5 Deslizamientos.....	15
2.4 Factores que rigen la erosión	16
2.4.1 El suelo	16
2.4.2 El relieve	17
2.4.3 La vegetación.....	17
2.4.4 El clima	17
2.4.5 Intervención humana.....	18
2.5 Medición de la erosión hídrica.....	18
2.5.1 Métodos indirectos.....	18
2.5.2 Métodos directos.....	19
2.6 Casos de estudio.....	20
2.6.1 Pasto.....	20

2.6.2	Bosque	22
2.6.3	Taludes de caminos.....	23
CAPÍTULO 3: Metodología.....		25
3.1	Criterio para definir los sitios de interés	25
3.2	Medición de la erosión hídrica en parcelas de pasto y bosque	33
3.3	Medición de la erosión hídrica en parcelas de taludes de caminos	35
3.4	Representación gráfica de la energía de la lluvia y la erosión durante el ciclo de prueba y generar un mapa de vulnerabilidad	36
3.4.1	Proceso de análisis realizado a cada parcela experimental: bosque, pasto y taludes de caminos	40
CAPÍTULO 4: Caracterización del área de estudio.....		45
4.1	Parcelas experimentales ubicadas en pasto.....	45
4.2	Parcelas experimentales ubicadas en bosque.....	48
4.3	Taludes de camino	51
4.3.1	Ruta N° 926: El Silencio-Tilarán	54
4.3.2	Ruta N° 142: Cañas-Tilarán-La Fortuna	55
4.3.3	Ruta N° 145: Quebrada Grande-Tilarán	58
4.3.4	Ruta N° 925: Líbano-Tilarán	59
CAPÍTULO 5: Resultados y análisis.....		60
5.1	Pastos	60
5.2	Bosque	64
5.3	Taludes de camino	70
5.3.1	Ruta N° 926: El Silencio-Tilarán	70
5.3.2	Ruta N° 142: Cañas-Tilarán-La Fortuna	73
5.3.3	Ruta N° 145: Quebrada Grande-Tilarán	75
5.3.4	Ruta N° 925: Líbano-Tilarán	76
5.4	Síntesis de resultados	77
CAPÍTULO 6: Conclusiones		83
6.1	Conclusiones	83
6.2	Recomendaciones	85
6.3	Temas de interés para estudios futuros	86
BIBLIOGRAFÍA.....		87
APÉNDICES		90
APÉNDICE A. Metodología ajustada para la determinación de pérdida de suelo (Prado, 2009).		90
APÉNDICE B. Energías de la lluvia (kg·m/m ²) y factor R (kg·m·mm/(m ² ·hr)) registradas por fecha para cada estación pluviográfica de influencia en la microcuenca del río Santa Rosa, generada por el programa Lluvias Erosivas.....		106
APÉNDICE C. Registro histórico de lluvias.....		108

ANEXOS.....	112
ANEXO A. Diferencias entre la parte alta y baja de la microcuenca del Río Santa Rosa.	112
ANEXO B. Formulario de solicitud de permiso	114
ANEXO C. Propiedades físicas e hidráulicas: geotextil W330	115
ANEXO D. Análisis de las parcelas de tipo de uso de suelo de pasto de la microcuenca media-alta.....	116
ANEXO E. Análisis de las parcelas de tipo de uso de suelo de bosque de la microcuenca media-alta.....	121
ANEXO F. Análisis de las parcelas ubicadas en taludes de caminos de la microcuenca del río Santa Rosa	140
F.1 - Ruta N° 926: El Silencio-Tilarán	140
F.2 - Ruta N° 142: Cañas-Tilarán-La Fortuna	146
F.2.1 Cañas-Tilarán.....	146
F.2.2 Tilarán-La Fortuna.....	149
F.3 - Ruta N° 145: Quebrada Grande-Tilarán.....	151
F.4 - Ruta N° 925: Líbano-Tilarán.....	152
ANEXO G. Métodos de bioingeniería: restauración de taludes de caminos	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Zonas de vida presentes en la microcuenca del río Santa Rosa. Fuente. Mapa ecológico de Costa Rica según zonas de vida de L.R. Holdridge, Elaborado por Aguirre, J y Araya, J (2007)	3
Figura 1.2 A, B) Inspección y limpieza del embalse Santa Rosa, realizado en enero 2009, del cual se extrajo el 90% del material acumulado (7 200 m ³ de lastre grueso) C, D) Monitoreo julio 2009 para ver el estado del mismo. Fuente. Sánchez, K (2009).....	5
Figura 1.3 Esquema de generación hidroeléctrica del complejo Arenal-Corobicí-Sandillal. Fuente. Modificado por el autor a partir de Aguirre, J. y Araya, J. (2007)	8
Figura 1.4 Comparación de la precipitación dada en los meses de junio a diciembre en el 2009 y el promedio histórico de las estaciones metereológicas de influencia en la microcuenca del río Santa Rosa. Fuente. Meteorología, ICE.....	9
Figura 3.1 División de la microcuenca del río Santa Rosa en microcuenca media-alta y microcuenca media-baja. Fuente. El autor.....	26
Figura 3.2 Mapa de pendientes de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa. Fuente. El autor.	27
Figura 3.3 Mapa de uso de suelo de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa. Fuente. El autor.....	28
Figura 3.4 Distribución del área de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa. Fuente. El autor.....	29
Figura 3.5 Ubicación de las parcelas de bosque y pasto en la microcuenca media-alta y los taludes de caminos a través de la microcuenca del río Santa Rosa. Fuente. El autor.....	32
Figura 3.6 Área de influencia de las estaciones pluviográficas que cubren las parcelas de bosque y pasto de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa. Fuente. El autor.....	37
Figura 3.7 Área de influencia de las estaciones pluviográficas que cubren las parcelas ubicadas en taludes de caminos de la microcuenca del río Santa Rosa. Fuente. El autor.	38

Figura 3.8 Ejemplo de la relación entre la precipitación y la energía que esta genera. Fuente. El autor.....	41
Figura 3.9 Ejemplo de las curvas generadas para relacionar el efecto de la energía acumulada sobre el sedimento. Fuente. El autor.	42
Figura 3.10 Comportamiento semanal de la energía y el suelo erosionado. Fuente. El autor.	42
Figura 4.1 A) Estrella africana (<i>Cynodon nlemfuensis</i>) en la parcela M 4 30-45. B) Pasto amargo (<i>Axonopus compressus</i>) y estrella africana en la parcela P 30-45 JJ. C) “Toledo” (<i>Brachiaria brizantha</i>) en la parcela S 15-30 SP. En todas las ilustraciones se aprecia la cobertura de pasto del 100% sobre el terreno. Fuente. El autor.	46
Figura 4.2 Leves evidencias de erosión en las fincas ubicadas en la microcuenca media-alta. A) Cursos de agua estacional. B) Caminos internos en la finca. C) Pasos permanentes de ganado. Fuente. El autor.	47
Figura 4.3 Estado general de los bosques en la microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	49
Figura 4.4 A) Bosque en finca privada. B) Bosque en cerro Chiripa. C) Se observa los pequeños parches de bosque ubicados en las márgenes de quebradas y ríos. D) Pequeñas filas de bosque en las lomas con función como cortina cortavientos. En todas las imágenes se observa el tipo de uso de pasto, en su mayoría utilizado para ganadería de leche. Fuente. El autor.....	50
Figura 4.5 Localización de los taludes en la microcuenca del río Santa Rosa. Fuente. El autor.	53
Figura 4.6 Ejemplo del estado de la Ruta N° 926: El Silencio-Tilarán. Deslizamientos de aporte directo a Quebrada Chanchos y río Santa Rosa. Fuente. El autor.	55
Figura 4.7 Ejemplo del estado de la Ruta N° 142 en el tramo Cañas-Tilarán. Fuente. El autor.	56
Figura 4.8 Ejemplo del estado de la Ruta N° 142 en el tramo Tilarán-La Fortuna. Fuente. El autor.	57
Figura 4.9 Ejemplo del estado de la Ruta N° 145 Quebrada Grande-Tilarán. Fuente. El autor.	58

Figura 4.10 Ejemplo del estado de la Ruta N° 925 Líbano-Tilarán. Fuente. El autor.	59
Figura 5.1 Ejemplo de parcela mal instalada, caso P 0-15 JJ. Fuente. El autor.	61
Figura 5.2 Comportamiento general del uso de suelo de pasto en la microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	64
Figura 5.3 A) Parcela con agua producto de escorrentía, donde el tipo de erosión ocurrido fue el laminar. B) Parcela donde el fenómeno de erosión predominante fue de salpicadura, evidencia de esto es el material pegado al geotextil. Fuente. El autor.	69
Figura 5.4 Ejemplo del proceso de erosión mostrado en las parcelas de la Ruta N° 926. A, B) Se presenta la formación de surcos y la acumulación de material desprendido durante los eventos de precipitación, los cuales quedan susceptibles. C, D) Durante los periodos secos debido al fenómeno del Niño el material desprendido queda susceptible a la erosión eólica. Fuente. El autor.	72
Figura 5.5 Ejemplo de procesos erosivos en los taludes de la Ruta N° 142. A) Formación de surcos entre el material acumulado desprendido producto de precipitaciones anteriores. B) Formación de pequeñas cárcavas. Fuente. El autor.	75
Figura 5.6 Ejemplo de talud D 07 y su proceso erosivo. Fuente. El autor.	76
Figura 5.7 Síntesis de resultados. Fuente. El autor.	79
Figura 5.8 Mapa de vulnerabilidad para la microcuenca media-alta del río Santa Rosa y puntos críticos en taludes de caminos en la microcuenca del río Santa Rosa. Fuente. El autor.	80
Figura 5.9 Mapa de vulnerabilidad para la microcuenca del río Santa Rosa. Fuente. El autor.	82
Figura A.1 Fincas ubicadas en la parte baja de la microcuenca, cercano a Los Ángeles de Tilarán. Se aprecia la pobre cobertura del pasto, así como síntomas de erosión. Fuente. El autor.	112
Figura A.2 Fincas aledañas a Cerro Chiripa, Tilarán. Los pastos presentan una cobertura del 100% sobre el terreno. Fuente. El autor.	112
Figura A.3 Bosque tropical húmedo ubicado en Cerro Chiripa. Fuente. El autor.	113

Figura A.4 Bosque tropical seco ubicado en propiedad ICE, Centro de Producción Miguel Pablo Dengo B. y Sandillal. Fuente. El autor.	113
Figura A.5 Relación mostrada entre la precipitación registrada por las estaciones pluviográficas Quesera y Chiripa y su respectiva energía. Fuente. El autor, a partir de los datos pluviográficos del ICE.....	117
Figura A.6 Resultados obtenidos en las parcelas de pasto con pendiente de 0%-15% de la microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	117
Figura A.7 Resultados obtenidos en las parcelas de pasto con pendiente de 15%-30% de la microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	119
Figura A. 8 Resultados obtenidos en las parcelas de pasto con pendiente de 30%-45% de la microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	120
Figura A.9 Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela FM 0-15-1. Fuente. El autor.....	122
Figura A.10 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela FM 0-15-1, microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	123
Figura A.11. Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela FM 0-15-2. Fuente. El autor.....	124
Figura A.12 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela FM 0-15-2, microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	124
Figura A.13 Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela P 0-15 JM. Fuente. El autor.....	125
Figura A.14 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela P 0-15 JM, microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	126
Figura A.15 Pérdida total de suelo en las parcelas experimentales de bosque en pendiente de 0%-15% de la microcuenca media-alta. Fuente. El autor.....	127
Figura A.16 Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela FM 15-30-1. Fuente. El autor.	128
Figura A.17 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela FM 15-30-1, microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	129

Figura A.18 Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela FM 15-30-2. Fuente. El autor.	130
Figura A.19 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela FM 15-30-2, microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	130
Figura A.20 Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela FM 15-30-3. Fuente. El autor.	131
Figura A.21 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela FM 15-30-3, microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	132
Figura A.22 Pérdida total de suelo en las parcelas experimentales de bosque en pendiente de 15%-30% de la microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	133
Figura A.23 Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela FM 30-45-1. Fuente. El autor.	134
Figura A.24 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela FM 30-45-1, microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	135
Figura A.25 Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela FM 30-45-2. Fuente. El autor.	136
Figura A.26 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela FM 30-45-2, microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	136
Figura A.27 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 JM. Fuente. El autor.	137
Figura A.28 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela P 30-45 JM, microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	138
Figura A.29 Pérdida total de suelo en las parcelas experimentales de bosque en pendiente de 30%-45% de la microcuenca media-alta. Fuente. El autor.	138
Figura A.30 Comportamiento semanal de energía y suelo recolectado de la parcela D01. Fuente. El autor.	141
Figura A.31 Comportamiento semanal de energía y suelo recolectado de la parcela D02. Fuente. El autor.	142

Figura A.32 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela D03. Fuente. El autor.	143
Figura A.33 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela D04. Fuente. El autor.	144
Figura A.34 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela D05. Fuente. El autor.	145
Figura A.35 Resultados de las parcelas de la Ruta N° 926 El Silencio-Tilarán. Fuente. El autor.	146
Figura A.36 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela C-T 01. Fuente. El autor.	147
Figura A.37. Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela C-T 03. Fuente. El autor.	148
Figura A.38 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela C-T 06. Fuente. El autor.	149
Figura A.39 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela T-T 03. Fuente. El autor.	150
Figura A.40 Resultados de las parcelas de la Ruta N° 142 Cañas-Tilarán-La Fortuna. Fuente. El autor.	151
Figura A.41 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela D 07. Fuente. El autor.	152
Figura A.42 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela T-L 01. Fuente. El autor.	153
Figura A.43 Resultados de las parcelas de la Ruta N° 142 Cañas-Tilarán-La Fortuna. Fuente. El autor.	154

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Disminución presentada en las estaciones de la microcuenca del río Santa Rosa..	9
Tabla 3.1 Parcelas experimentales en la microcuenca media-alta del río Santa Rosa.....	31
Tabla 3.2 Parcelas instaladas en taludes de caminos en la microcuenca del río Santa Rosa.	31
Tabla 3.3 Tabulación de los datos de suelo húmedo, suelo seco, precipitación y energía para generar los resultados requeridos.....	41
Tabla 3.4 Datos por fecha de suelo seco y energía en por ciento.	43
Tabla 3.5 Clasificación de erosión según FAO modificado.	44
Tabla 4.1 Tipo de pasto y uso presentes en las fincas donde se establecieron parcelas.	45
Tabla 4.2 Características de las parcelas experimentales ubicadas en bosque.	50
Tabla 4.3 Parcelas ubicadas en taludes de camino.	52
Tabla 5.1 Resultados obtenidos en las parcelas con suelo desprotegido.	62
Tabla 5.2 Tasas erosivas y total de suelo erosionado en pasto de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa.	62
Tabla 5.3 Valores totales encontrados para las parcelas de bosque en la microcuenca media- alta del río Santa Rosa.	68
Tabla 5.4 Resultados finales para los taludes de la Ruta N° 926. El Silencio-Tilarán.	71
Tabla 5.5 Resultados finales para los taludes de la Ruta N° 142. Cañas-Tilarán-La Fortuna.	74
Tabla 5.6 Resultados finales para los taludes de la Ruta N° 145 (Quebrada Grande-Tilarán) y 925 (Líbano-Tilarán).....	76
Tabla A.1 Valores totales encontrados para las parcelas de bosque en la microcuenca media-alta.....	139

RESUMEN

El presente documento tiene como objetivo analizar y estimar la producción potencial de erosión, mediante el establecimiento de parcelas experimentales en tipos de uso de suelo de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa, que afecta directamente los embalses Santa Rosa y Sandillal, Guanacaste, Costa Rica.

La metodología se basa en la aplicación de técnicas como: dispositivos GPS, geoprosesamiento en SIG, fotografías aéreas y medición directa de pérdida de suelo con “silt fence” mediante el establecimiento de parcelas experimentales. Se estudió los procesos de erosión en dos tipos de uso de suelo: pasto y bosque, con rango de pendientes entre 0%- 45%, los cuales son los más representativos de la microcuenca media-alta. Además se incluye la evaluación de taludes de caminos a través de toda la microcuenca del río Santa Rosa.

Los dos tipos de uso de suelo estudiados clasifican como factor 1, según la FAO, lo cual significa que presentan una erosión nula o imperceptible, entre (0,00 - 0,50) ton/ha/año. Por otro lado, los taludes de caminos son los principales focos de producción de sedimentos, con tasas erosivas inclusive dentro del factor 3 de erosión severa (50-200) ton/ha/año.

Se recomienda continuar el presente estudio al menos cinco años para disminuir la variabilidad en la tasa erosiva media que se produce por el cambio de las precipitaciones en las épocas lluviosas año a año, con actividades paralelas como ajuste del Factor R, corrección y calibración de un modelo en SIG para la microcuenca, modelación de distintos escenarios para la toma de decisiones, implementación de planes pilotos en fincas ganaderas, bosque y taludes de caminos para mejorar, mitigar y controlar los efectos erosivos.

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Antecedentes

La principal base de información para este trabajo es el estudio de Caracterización general de la microcuenca del río Santa Rosa, de índole preliminar, hecho por Aguirre, J y Araya, J (2007) en el cual realizaron una caracterización general del estado actual del uso del suelo de la microcuenca del río Santa Rosa y desarrollaron una base de datos biofísica para la microcuenca, con el fin que el mismo sea el primer paso para conocer cuales son las principales causas que originan los sedimentos en el embalse Sandillal, que ayude a una posterior toma de decisiones en el manejo y protección de los recursos y que sirva como punto de partida para estudios posteriores.

Entre las conclusiones a las cuales llegaron en el estudio de Aguirre, J y Araya, J (2007) están que en la microcuenca no existen áreas protegidas y sumado a esto, las riberas de los ríos están sometidas a una fuerte presión por parte de la frontera agrícola. La falta de áreas de conservación en la microcuenca podrían poner en riesgo los escasos recursos forestales presentes en la zona e incidir directamente en la protección del suelo, con un punto crítico en las zonas altas de recarga acuífera.

Evidencian que el estado de fragmentación es considerable en la microcuenca, pues la distancia entre parches boscosos es de 127m en promedio y en su mayoría están agrupados en las riberas de los ríos. También las partes más empinadas de las laderas (pendiente superior a 45%) se encuentran deforestadas, lo cual es un factor importante a considerar para ejecutar acciones tendientes a disminuir los procesos erosivos.

El 63% del suelo de la microcuenca está cubierto por pastos dedicados a la actividad ganadera, la cual genera procesos erosivos debido al fenómeno de reptación. El 72% de las fincas ganaderas reportadas para la zona utiliza las riberas de las quebradas y ríos para abastecer de agua a su hato ganadero, lo que puede conllevar a un alto pisoteo cerca y en el borde de los cuerpos de agua, lo cual hace susceptible estas zonas ante eventos de precipi-

tación y crecidas. Ninguna de las fincas ganaderas cuenta con procedimientos para el manejo de los desechos que se producen.

El uso del suelo en ciertas áreas de la microcuenca no corresponde a las clases de la capacidad de uso del suelo recomendadas por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). El 50% se encuentra entre sub y sobre utilizado, lo cual sería otro factor que esté afectando la calidad de los suelo y por ende repercute en la erosión de los mismos.

En la gira realizada en marzo de 2009, se validó la información generada en el trabajo de Aguirre, J y Araya, J (2007) y además se obtuvieron las siguientes observaciones:

- El principal uso de suelo es la ganadería, tanto de engorde como de leche.
- Las fincas en general presentan pocos síntomas de erosión, excepto en los pasos de ganado y caminos internos en la finca.
- Es evidente la inestabilidad de los taludes tanto en rutas nacionales como vecinales.
- Se presentan dos zonas de vida distintos en la microcuenca del río Santa Rosa. En la parte alta, el clima se ve influenciado por las condiciones del tiempo de la zona Atlántica, por lo cual es característico las zonas de vida de bosque húmedo premontano, bosque húmedo tropical transición a premontano, bosque muy húmedo premontano y bosque muy húmedo premontano transición a pluvial y fincas con pastos verdes durante todo el año y con cobertura sobre el terreno del 100%. La parte baja de la microcuenca, que se ve influenciada por las condiciones climáticas del Pacífico Norte, presenta el bosque seco tropical, bosque húmedo premontano transición a tropical y bosque húmedo tropical transición a seco y fincas ganaderas con pasto con poco desarrollado foliar y menor cobertura sobre el terreno (Ver Anexo A) La Figura 1.1. muestra las zonas de vida en la microcuenca.

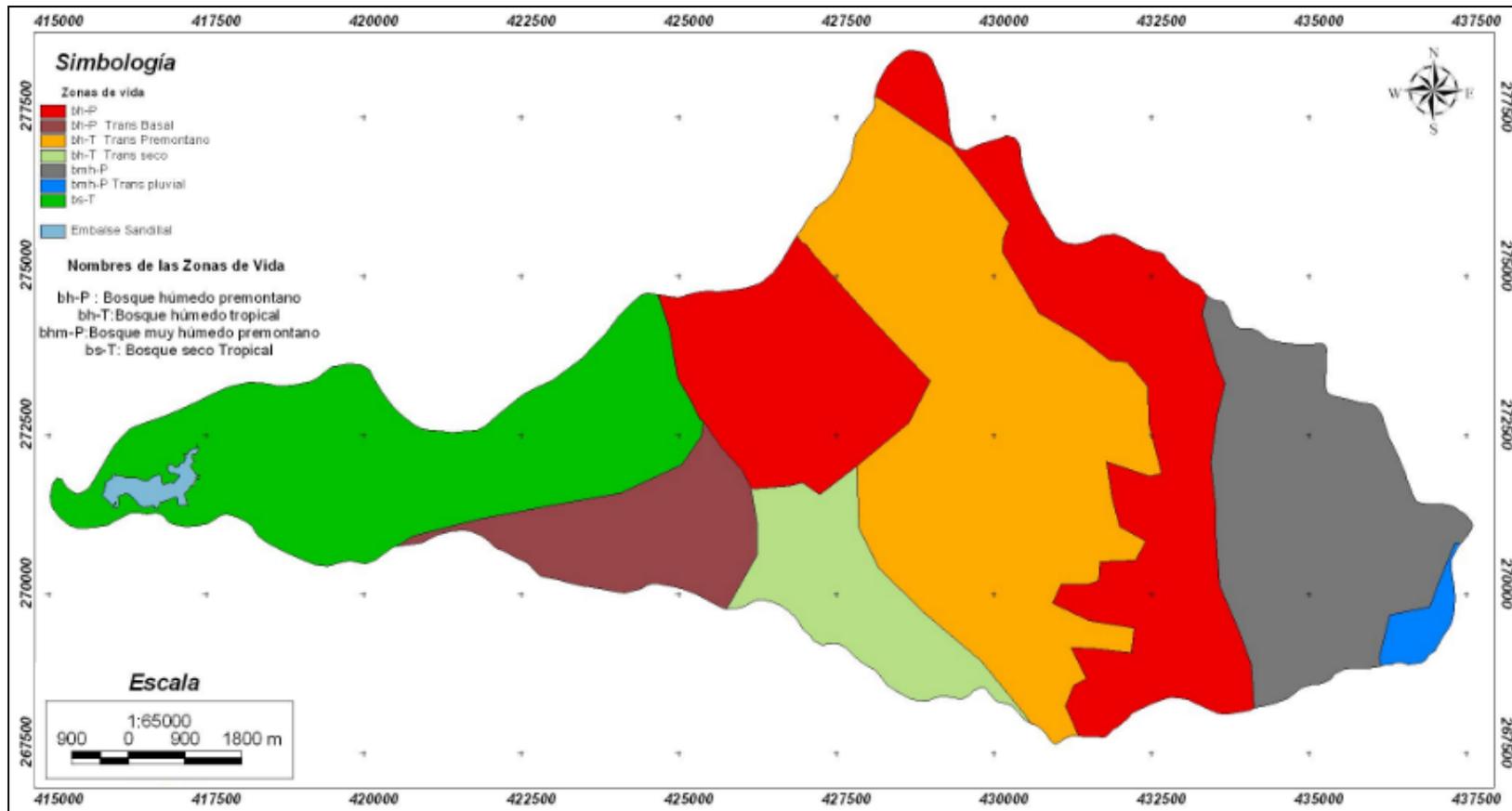


Figura 1.1 Zonas de vida presentes en la microcuenca del río Santa Rosa. Fuente. Mapa ecológico de Costa Rica según zonas de vida de L.R. Holdridge, Elaborado por Aguirre, J y Araya, J (2007)

Este último punto es el motivo principal por el cual el presente documento se enfoca en evaluar los tipos de uso de suelo de la parte media-alta de la microcuenca. Pues se consideró que no se puede evaluar la erosión en usos de suelo con condiciones tan distintas como las explicadas anteriormente. Por lo tanto, la parte media-baja de la microcuenca es evaluada por el Ing. Sisgo Acuña Chinchilla en su trabajo titulado “Estimación de la producción potencial de erosión y transporte de sedimentos en la microcuenca media-baja del río Santa Rosa, Centro de Generación ArCoSa, Tilarán, Guanacaste”, el cual se desarrolló en el mismo periodo.

Como complemento de estudio se evaluará, según lo apreciado en la gira realizada en marzo de 2009, los taludes de caminos en las carreteras que recorren toda la microcuenca del río Santa Rosa.

1.2 Justificación

Dentro del área de Ingeniería de Conservación de Aguas y Suelos, se decidió desarrollar una evaluación del potencial erosivo en la microcuenca del río Santa Rosa, durante cinco meses de estudio, de junio a diciembre de 2009, debido a la problemática identificada por Aguirre, J y Araya, J (2007): las cantidades de sedimentos que se acumulan en el embalse Sandillal provienen por malos manejos del suelo en dicha microcuenca.

El presente estudio se originó a partir de la solicitud de la Unidad de Cuencas del Centro de Generación de ArCoSa, la cual indicó por parte del ICE del problema que presentan los embalses Santa Rosa (Figura 1.2) y Sandillal en cuanto a colmatación y presencia de basura como ramas, troncos, entre otros, que afectan el óptimo funcionamiento y reduce la vida útil de los embalses, lo cual incrementaría la frecuencia de desembalses.

La importancia de la siguiente evaluación es que no existen estudios de erosión y sedimentos en el área de influencia del CG ArCoSa a una escala de trabajo que permita satisfacer criterios para implementar medidas de mitigación a nivel de subcuenca y microcuenca.

Determinar de forma directa el potencial erosivo midiendo “in situ” la erosión (toneladas/hectárea) de la microcuenca media-alta en pasto, bosque, y además de los taludes de caminos que atraviesan toda la microcuenca del río Santa Rosa, permitirá reconocer los puntos con mayor potencial erosivo. Tener la noción de dónde y por qué se produce la mayor cantidad de sedimento que llegará por arrastre a los embalses del complejo hidroeléctrico, será la base para implementar medidas que mitiguen los procesos erosivos en la zona, como lo son por ejemplo la creación de áreas de contención destinadas a reforestación, obras de bioingeniería y promoción del mejoramiento de las prácticas agropecuarias.



Figura 1.2 A, B) Inspección y limpieza del embalse Santa Rosa, realizado en enero 2009, del cual se extrajo el 90% del material acumulado (7 200 m³ de lastre grueso) C, D) Monitoreo julio 2009 para ver el estado del mismo. Fuente. Sánchez, K (2009)

Invirtiendo en medidas que prevengan la erosión y capturen las partículas desprendidas que se dirigen hacia los cuerpos de agua, se puede ampliar la frecuencia de los desembalses y con esto evitar altos costos de limpieza del mismo, suspensión de la producción

eléctrica de la planta Sandillal y costos empleados en la producción de energía de fuentes sustitutas como las térmicas. Además, como indica Aguirre, J y Araya, J (2007), durante el periodo de limpieza, los usuarios del Distrito de Riego Arenal-Tempisque (DRAT), deben tomar previsiones y medidas alternativas que también significan un alto costo económico.

1.3 Zona de estudio

1.3.1 Reseña del Centro de Generación ArCoSa

El Centro de Generación ArCoSa, ubicado en Tilarán, Guanacaste, se encarga de administrar todo el complejo hidroeléctrico desarrollado en la cuenca de la Laguna Arenal, la cual es la principal fuente hídrica para la producción hidroeléctrica en cascada de las plantas Arenal, Corobicí y Sandillal, ubicadas en la microcuenca del río Santa Rosa. Además administra el parque eólico de Tejona, con lo cual este centro de producción genera el 24 % de energía en el país (Aguirre, J et al; 2007) La Figura 1.3 muestra el área de influencia del complejo que incluye la cuenca del Embalse Arenal en conjunto con la microcuenca del río Santa Rosa.

El Complejo Hidroeléctrico Arenal tuvo sus inicios en 1959, cuando se empezó a estudiar la posibilidad de construir un proyecto hidroeléctrico en la parte superior de la cuenca del río Arenal, específicamente entre la cordillera volcánica de Guanacaste al noroeste y la cordillera de Tilarán al suroeste. Con la construcción de la presa Sangregado (inicio de la construcción en 1974), se establece el Embalse Arenal el cual permite la regulación y derivación de las aguas del Caribe hacia la vertiente del Pacífico. En este embalse se ubica la toma de aguas y por medio de una tubería se conducen las aguas al Centro de Producción Arenal (CP Arenal), el cual opera desde el 9 de diciembre de 1980 (Grupo ICE).

La Planta Corobicí, actualmente llamada Miguel Pablo Dengo se abastece del embalse Santa Rosa, ubicado contiguo Planta Arenal. Este embalse se ubica sobre el cauce del río del mismo nombre. La conducción, aproximadamente nueve kilómetros de longitud, lleva las aguas del embalse Santa Rosa a casa de máquinas Dengo, la cual tiene un canal de desfogue sobre el río Santa Rosa. Por último, varios kilómetros aguas abajo sobre el cauce del

río Santa Rosa, se ubica el embalse Sandillal, quien recibe las aguas generadas en las plantas Arenal y Dengo y sirve de reservorio para la generación eléctrica en la Planta Sandillal. 1982 y 1992 son los años en que entraron en operación, respectivamente, los centros de producción hidroeléctrica antes mencionados (Grupo ICE; Aguirre, J y Araya, J, 2007).

La microcuenca del río Santa Rosa cubre un área de 10 445 hectáreas y forma parte de la subcuenca del río Corobicí dentro de la cuenca del río Bebedero, ubicado en el Pacífico Norte, provincia de Guanacaste. Se extiende desde el Cerro Chiripa (1038msnm) hasta 1,5km aguas abajo de la presa del embalse Sandillal (50msnm), en donde se une con el río Magdalena.

Esta es parte importante del CG ArCoSa, pues el río Santa Rosa aporta sus aguas a los embalses Santa Rosa y Sandillal, los cuales soportan y acumulan los sedimentos transportados por el río Santa Rosa y sus afluentes, lo que ha obligado a realizar en el pasado cinco desembalses desde su entrada en operación en 1992.

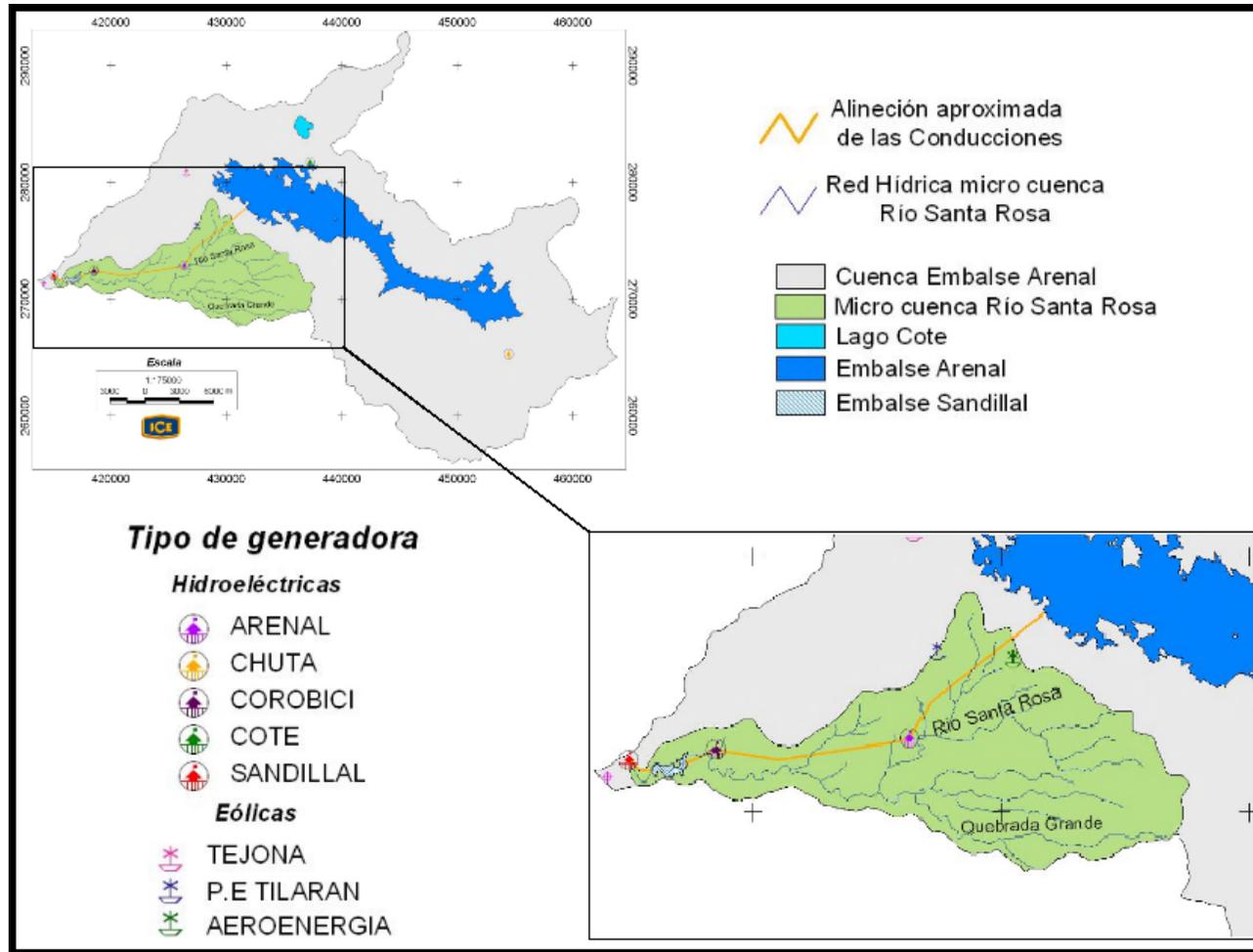


Figura 1.3 Esquema de generación hidroeléctrica del complejo Arenal-Corobicí-Sandillal. Fuente. Modificado por el autor a partir de Aguirre, J. y Araya, J. (2007)

1.4 Caracterización temporal: Año Niño

El periodo en que se ha desarrollado el estudio ha presentado un veranillo prolongado debido al fenómeno del Niño, ocasionando menores precipitaciones desde el mes de junio hasta el mes de octubre, debido a la reducción de las lluvias causado por un calentamiento de las aguas del Pacífico Ecuatorial, que afecta las zonas costeras del Pacífico con un periodo seco extendido y más calor (Agüero, 2009). Ver Apéndice C.

La Figura 1.4 muestra la precipitación acumulada del año 2009 (año de estudio) de junio a diciembre y la precipitación acumulada histórica para los mismos meses, de las ocho estaciones pluviográficas de influencia para la microcuenca del río Santa Rosa. Se puede observar la disminución de las lluvias debido a dicho fenómeno.

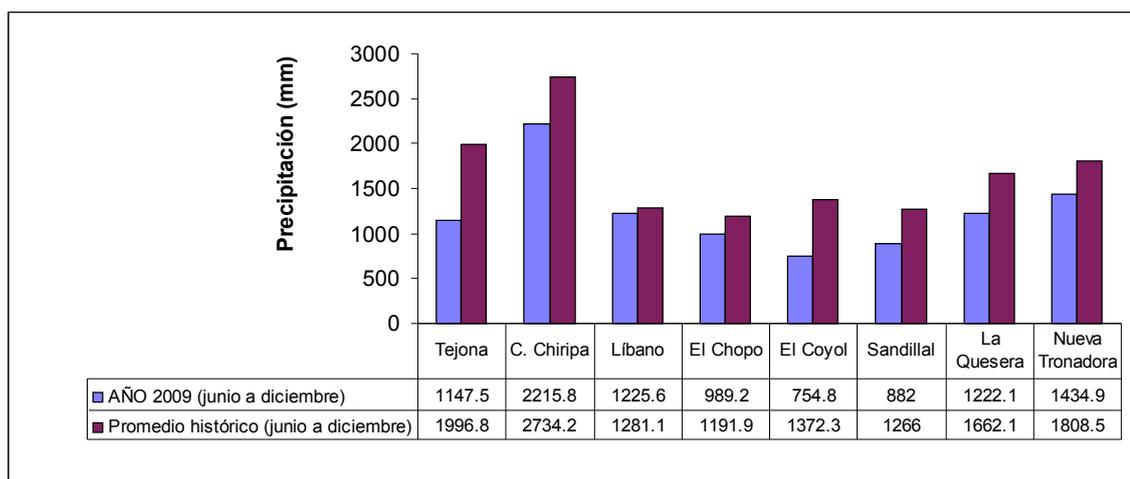


Figura 1.4 Comparación de la precipitación dada en los meses de junio a diciembre en el 2009 y el promedio histórico de las estaciones meteorológicas de influencia en la microcuenca del río Santa Rosa. Fuente. Meteorología, ICE.

Tabla 1.1 Disminución presentada en las estaciones de la microcuenca del río Santa Rosa.

Estaciones	Tejona	C. Chiripa	Líbano	Chopo	Coyoil	Sandillal	Quesera	Tronadora
Histórico (mm)	1996,80	2734,20	1281,10	1191,90	1372,30	1266,00	1662,10	1808,50
2009 (mm)	1147,50	2215,80	1225,60	989,20	754,80	882,00	1222,10	1434,90
Disminución (%)	42,53	18,96	4,33	17,01	45,00	30,33	26,47	20,66

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Estimar y analizar la producción potencial de erosión, mediante el establecimiento de parcelas experimentales, en zonas de interés de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa, que afectan directamente los embalses Santa Rosa y Sandillal del ICE, cantones de Tilarán y Cañas, provincia de Guanacaste.

1.5.2 Objetivos específicos

Definir los sitios de interés para establecer parcelas para la medición de pérdida de suelo en una escala de trabajo apropiada en el área de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa;

Medir la erosión hídrica en el área media-alta de la microcuenca del río Santa Rosa mediante el establecimiento de parcelas experimentales;

Medir la erosión producida por el desprendimiento de material en los taludes de las carreteras y caminos dentro de la microcuenca del río Santa Rosa;

Representar el comportamiento de la energía de la lluvia y la erosión durante el ciclo de prueba y generar un mapa de vulnerabilidad.

CAPÍTULO 2: Erosión del suelo

2.1 Introducción

La erosión del suelo es un proceso el cual produce un cambio en la morfología del relieve con el paso del tiempo. La velocidad con que se da este fenómeno se debe a factores como la lluvia, la escorrentía, el viento, el suelo, la pendiente, la cobertura vegetal y la presencia o ausencia de medidas de conservación. Además se ve afectada por las actividades que realiza el ser humano como lo son la construcción y los sistemas agropecuarios, entre otras actividades económicas, o por condiciones naturales adversas que propicien grandes movimientos de masa como son los terremotos.

Los agentes erosivos son el agua y el viento, y se caracterizan por tener la capacidad de, primero, desprender el suelo y luego, de transportarlo hasta otro sitio donde se deposita o continúa por un curso de agua hasta llegar a sedimentarse ya sea en un embalse, un lago o en el océano. Trayendo consigo efectos negativos como la contaminación de ríos y mares, colmatación y eutrofización de lagos y embalses (Cubero 1996).

2.2 Proceso de erosión hídrica

La erosión por lluvia tiene dos causantes principales: el impacto de precipitación (caída de las gotas de lluvia) y el arrastre del agua que escurre por la superficie del terreno, proceso que se describe en tres fases: precipitación y desprendimiento, escurrimiento y sedimentación (López, 1968; Morales, 2003).

En la precipitación la gota de lluvia sufre cambios en su tamaño, disminuyendo o aumentando hasta un máximo de 5 ó 6mm de diámetro, ya que aunque existan precipitaciones mayores que producen gotas mayores, estas son inestables y se dividen durante la caída (López, 1968). Esto hace que la energía cinética de las gotas que caen aumente con la intensidad de la precipitación, pero el incremento va siendo menor según la intensidad aumenta, de manera que la energía cinética tiende asintóticamente a un valor límite, que parece ser el mismo para todas las tormentas de gran intensidad.

La energía con la cual la gota cae viene definida por la expresión

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.2-1)$$

donde:

m: masa de la gota (kg),

v: velocidad de la gota (m/s).

Esta energía hace que la gota de lluvia, en ausencia de obstáculos, golpee el suelo con considerable fuerza disgregando las partículas terrosas y proyectándolas en el aire, fenómeno al cual se le ha llamado erosión por salpicadura. Además, la gota de lluvia proporciona una fuerza de consolidación que compacta el suelo, originando un sellado, que se refiere a la reordenación de la superficie del suelo durante la tormenta, y una costra que es un endurecimiento de la superficie sellada a medida que el suelo se seca. El efecto más importante de esto es la reducción de la capacidad de infiltración, y por lo tanto el aumento de la escorrentía (Morgan, 1997).

En el desprendimiento, la salpicadura es el agente más importante y ocurre cuando la gota de lluvia choca con la superficie del suelo desnudo. La velocidad de caída y el tamaño de las gotas son una influencia preponderante sobre la dispersión del suelo. Experiencias de laboratorio han demostrado por ejemplo que una gota de 6mm la cual cae a una altura de 2m, con una película de agua de 9,5mm proyecta partículas de suelo a 0,60m en vertical y 1,50m en horizontal, según López (1968) Esta exposición continua a lluvias intensas debilita considerablemente el suelo. Morgan (1997) señala como otros agentes disgregadores del suelo los procesos de meteorización, el laboreo, el pisoteo de humanos y el ganado y las corrientes de agua. Todos estos procesos liberan partículas de suelo que luego son arrastradas por los agentes de transporte.

El escurrimiento se da en función de la permeabilidad del suelo, si la tasa de infiltración es mayor a la precipitación, no se da escurrimiento. Si la lluvia se mantiene o es de corta duración pero con alta intensidad, el suelo se satura y la tasa de infiltración tiende a

cero creándose sobre la superficie una lámina, la cual se empoza o escurre, según la pendiente del terreno.

El escurrimiento disgrega elementos terrosos (en menor medida que la gota de lluvia) y transporta a otros lugares aquellas partículas de tierra que por su tamaño y forma son susceptibles de arrastre. La velocidad promedio que el flujo llega a tener puede considerarse erosiva, ocasionando el desprendimiento de los agregados del suelo, y está en función de la textura del suelo. Por ejemplo, las velocidades para: suelo arcilloso $v > 0,9$ m/s y para suelo arenoso $v > 0,6$ m/s, son consideradas erosivas (Cubero, 1996; Morales, 2003).

Por último, la sedimentación ocurre cuando las partículas desprendidas (sedimentos) arrastradas por los agentes de transporte, el agua o el viento, se depositan en un cuerpo de agua o quedan atrapadas en una depresión del terreno (Cubero, 1996; Morales, 2003; Morgan, 1997).

En general en el proceso de erosión, según Morgan (1997), se puede proponer que la mayor parte del sedimento transportado se produce por desprendimiento debido al impacto de la lluvia y que, excepto sobre fuertes pendientes o superficies llanas y desnudas, la velocidad erosiva desprende partículas de suelo. En diversos estudios mostrados por Morgan (1997) se vio que las partículas entre 0,063 y 0,250mm son las que se desprenden más fácilmente por el impacto de las gotas de lluvia y las partículas que más desprende el flujo están entre 0,1 y 0,3mm, el flujo superficial es pobre en partículas mayores de 1mm y rico en materiales finos. Por ello, pasado el tiempo, las áreas de erosión en las laderas se convertirán progresivamente en más arenosas y las áreas de deposición, se enriquecerán con partículas arcillosas y la parte fértil del terreno.

2.3 Formas de erosión

Existen diversas formas en que se da el proceso erosivo, desde pequeños movimientos de partículas finas hasta grandes desprendimientos de masa, producido por distintos factores que rigen la erosión. A continuación se explica cada una de ellas a partir de las defini-

ciones de varios autores como Morgan (1997), López (1968), Gómez (2002) y Porras (2000)

2.3.1 Laminar

La erosión laminar, que genera grandes aportaciones de sedimentos a los cuerpos de agua, consiste en una remoción de delgadas capas de suelo, extendida más o menos uniformemente a toda una superficie. Resulta de la disgregación de los elementos terrosos por el impacto de las gotas de lluvia y por la acción del escurrido cuando la tasa de infiltración del terreno tiende a cero. De este modo el conjunto agua-tierra corre a lo largo de las pendientes como una lámina y el suelo se va degradando por capas sucesivas, quedando una acumulación de grava al final de los terrenos con pendiente y transportando altas cantidades de finos, originando la pérdida de capas fértiles del suelo, hacia los cuerpos de agua.

2.3.2 Surcos

Consiste en el arrastre de elementos terrosos al correr el agua por la superficie del suelo ocasionando la formación de surcos orientados más o menos normalmente a las curvas de nivel, debido a las irregularidades y desniveles del terreno. La formación de estos surcos, especialmente en aguaceros intensos, ocurre cuando el agua no escurre uniformemente por toda la superficie, si no que corre concentrada en corrientes de una potencia erosiva capaz de abrir pequeños surcos en el suelo, en forma de U o V. La erosión laminar previa favorece este proceso. El arrastre laminar afecta a los elementos finos y al desaparecer éstos de la superficie se originará un predominio de elementos gruesos y una formación de irregularidades superficiales que serán causa de esta nueva forma de erosión. Por su dimensión son de fácil eliminación.

2.3.3 En cárcavas

Consiste en incisiones, poco profundas de 0,60cm a 0,90cm hasta grandes dimensiones de 9m a 14m, en los terrenos originados generalmente cuando existe una gran concen-

tración de escorrentía en alguna zona determinada. Denotan un estado de erosión avanzado, por lo cual son difíciles de corregir y estabilizar.

La formación de cárcavas suele ir precedida de intensas erosiones laminares, y de la constitución previa de surcos o líneas de concentración de aguas. Cuando estos surcos o líneas no se corrigen, encauzarán las aguas de futuras precipitaciones y paulatinamente se irá intensificando la acción erosiva hasta llegar a ocasionar la cárcava. Las cárcavas empiezan en la parte inferior de una pendiente y van rasgando la tierra hacia arriba, fenómeno llamado cabeza de la cárcava. Si la cabeza llega a la parte superior de la ladera, la cárcava seguirá removiendo material de sus cercanías haciéndose esta de mayores dimensiones.

2.3.4 Corrientes de lodo

A consecuencia de grandes lluvias la capa superior del suelo absorbe gran cantidad de agua. En tales circunstancias, si el suelo está en pendiente y no suficientemente sujeto por la vegetación, una masa de tierra superficial puede transformarse en un fluido viscoso capaz de escurrir hacia las partes más bajas. Son poco frecuentes, pero la cantidad de sedimentos aportados es bastante mayor que la de las cárcavas, regueros y erosión laminar.

2.3.5 Deslizamientos

Existe deslizamiento superficial y de fondo. El superficial se origina cuando una capa superficial de suelo, más o menos profunda, retiene gran cantidad de agua, el incremento de peso de la masa terrosa y la pérdida de consistencia puede dar como resultado final un resbalamiento de la capa de suelo hacia partes más bajas. Los de fondo pueden producirse cuando una capa de terreno permeable descansa sobre otra de naturaleza arcillosa; el agua al infiltrarse es muy posible que se detenga en la capa arcillosa y forme un plano lubricado, dando lugar a que los materiales que estén por encima de éste lleguen a deslizarse si la componente de las fuerzas en la dirección y sentido del movimiento es superior a la motivada por el rozamiento.

2.4 Factores que rigen la erosión

Tomando en cuenta una unidad espacial, el fenómeno de erosión se puede estudiar desde el punto de vista de una cuenca, para la cual existen factores que rigen la erosión hídrica. Como tales aparecen el suelo, el relieve, la vegetación, el clima y la intervención humana.

2.4.1 El suelo

Independientemente de la acción del relieve y vegetación, cada clase de suelo dispone de unas defensas propias, siendo éstas función de las constantes físicas o químicas que la caracterizan, como lo son la textura, la estructura, permeabilidad y dispersión (López, 1968).

La textura, si bien influye en las demás características físicas, no es un parámetro concreto para definir la resistencia que un suelo opone a la erosión. Un suelo de textura arenosa, al tener gran porosidad, mientras la lluvia no alcance cierta intensidad, absorberá toda el agua que reciba, y, por lo tanto, en ausencia de escorrentía no sufrirá erosión, pero al poseer baja proporción de partículas arcillosas que ligen y mantengan unidas las partículas elementales, cualquier corriente superficial arrastrará cantidades apreciables de suelo.

En suelos con carácter arcilloso se da un comportamiento distinto. Durante una lluvia normal, el pequeño grado de porosidad hará que gran parte de las aguas no se infiltren, motivando una escorrentía superficial que puede ser causa de erosiones notables. El lado favorable lo presenta el tener gran capacidad de retención de agua y la existencia de agregados o partículas elementales unidas cuyo mayor tamaño los hará no susceptibles de ser arrastrados.

Un tipo medio de estructura debe ser el más favorable. Las partículas al ser de diferentes tamaños, originarán una porosidad capaz de facilitar la infiltración y por otro lado será posible la formación de agregados.

2.4.2 El relieve

La pendiente del terreno, la longitud de pendiente y la curvatura de pendiente son características de la fisiología del terreno que intervienen en la erosión causada por el terreno (Gómez, 2002). El más importante: la pendiente. El aumento en la pendiente del terreno es directamente proporcional a la magnitud de la erosión hídrica, debido a que hay menos posibilidad que se infiltre agua en el terreno pues la velocidad que llega a desarrollar el agua provee la capacidad de transportar partículas.

2.4.3 La vegetación

Según Kirkby, (1980) el papel de la cobertura vegetal u otro tipo reducen la energía de las gotas de lluvia y evita la compactación superficial. Gómez (2002) analiza distintos estados en la cobertura del suelo como lo son barbecho desnudo, praderas con vegetación densa, cultivos y bosque. El barbecho desnudo es una condición donde el suelo se halla en mayor susceptibilidad, pues nada amortigua el golpe de las gotas al caer al suelo. Las praderas con cobertura densa son ideales para combatir la erosión, pues amortigua la energía de las gotas de lluvia, no permite el salpique. En terrenos con cultivo, debido a las prácticas de labranza donde el suelo es disgregado y mientras el cultivo crece, la vulnerabilidad de este uso de suelo es bastante mayor que la anterior. Los bosques son óptimos en lo que se refiere a la protección contra la erosión, pues las copas de los árboles interceptan las lluvias, mientras que la capa orgánica presente debajo de estos ejerce un segundo amortiguamiento a la energía erosiva de las gotas.

2.4.4 El clima

La cantidad de precipitación es importante en el proceso erosivo pues a mayor cantidad de agua, hay mayor capacidad de abrasar y transportar suelo, siempre y cuando la tasa de infiltración sea menor a la intensidad o duración de la precipitación. En cuanto a la intensidad, energía y duración de la precipitación se tiene que la combinación de alta intensidad y duración larga, son las que producen mayor cantidad de erosión.

2.4.5 Intervención humana

Las actividades humanas generalmente traen consigo procesos acelerados de erosión pues la cobertura del terreno es eliminada, como por ejemplo zonas de construcción, apertura de trochas y caminos, deforestación, actividades agropecuarias en general.

2.5 Medición de la erosión hídrica

Para la medición de la erosión hídrica existen métodos indirectos y directos. Los indirectos son todas la modelaciones en programas, que de forma predictiva estiman las pérdidas de suelo a partir de la incorporación de datos de diversos factores establecidos que afectan los procesos erosivos; mientras que los métodos directos, ya sea en laboratorio o en campo, obtiene datos reales de la pérdida de suelo.

2.5.1 Métodos indirectos

Morgan (1997) indica que la mayor parte de los modelos utilizados en los estudios de erosión son empíricos y se basan en la definición de los factores más importantes y, mediante la observación, medida, experimentación y técnica estadística, determinan su relación con las pérdidas de suelo. Estos modelos son desarrollados para una condición o tratamiento en particular (Robichaud, 2002).

Cuando se predice la erosión, se debe decidir si la predicción es para un año, un día, una tormenta o para periodos cortos dentro de una tormenta, y si se refiere a una parcela, una ladera o a una cuenca. Estas diferentes perspectivas en el tiempo y en el espacio influirán en los procesos que deben incluirse en el modelo, en la forma en que deben escribirse y en el tipo de datos necesarios para validar el modelo y su funcionamiento.

Por ejemplo, Gómez (2002) tras un análisis exhaustivo de varios tipos de modelos, determinó en su trabajo de estudio que el modelo CALSITE era el indicado para realizar su proyecto pues toma el modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) y lo adapta para ser aplicado en cuencas tropicales donde la erosión de suelos ha ocasionado

problemas de sedimentación en embalses, pues compensa ciertas carencias de la EUPS. Esto es una limitante de las modelaciones, las cuales son estrictamente ejecutables para las condiciones en las que fueron desarrolladas, por lo cual, cuando se aplican a otras condiciones, se debe realizar una corrección de los datos mediante una validación de datos en campo por varios ciclos de estudio de pruebas. La ventaja es que una vez culminado este proceso de corrección, se convierte en una herramienta muy aprovechable para la formulación de varios escenarios en la ayuda de la toma de decisiones.

En el caso de estudio, donde también es evaluada la erosión en taludes de caminos, los modelos existentes no incluyen estas áreas limitándose todos a áreas pequeñas de fincas hasta áreas extensas como una cuenca.

2.5.2 Métodos directos

Como se indicó anteriormente, los hay de dos tipos, en laboratorio y en campo. Para conseguir datos reales de pérdidas de suelo, las medidas de campo son las más fiables, pero como las condiciones varían temporal y espacialmente, es a menudo difícil de determinar con ellas las causas principales de la erosión o conocer los procesos que actúan (Morgan, 1997). Los experimentos, diseñados para obtener una explicación, son mejor interpretados en laboratorio, donde se pueden controlar los efectos de muchos factores. Sin embargo, a causa de lo artificioso de los experimentos de laboratorio, es deseable alguna confirmación de sus resultados en campo.

Los experimentos de campo se clasifican en dos grupos, los diseñados para determinar pérdidas de suelo en áreas relativamente pequeñas o parcelas de erosión, o los diseñados para evaluar la erosión en áreas más grandes, como una cuenca hidrográfica.

Las cortinas para conservación de suelos o “silt fence”, son geotextiles que ubicados en puntos donde intercepten un flujo superficial, se convierten en estructuras para el control de sedimentos hechas de material permeable, pues reducen la velocidad del agua, retiene el sedimento suspendido y permite el flujo del agua (Morales, 2003). Ha sido de gran utilidad para el control de sedimentos en zonas de construcción.

El “silt fence” como método de control de sedimentos ha hecho que se convierta en una forma muy económica para medir la erosión hídrica mediante el establecimiento de parcelas experimentales, como lo establece Robichaud (2002) y Prado (2007), quienes desarrollan la metodología de instalación, limpieza y medida de estas parcelas experimentales para conocer de forma directa la cantidad de suelo erosionado generado a partir de las precipitaciones dadas en la zona de estudio.

2.6 Casos de estudio

A continuación se indican las condiciones ideales, prácticas de manejo y datos de tasas de erosión de estudios similares desarrollados a los tipos de uso de suelo de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa y los taludes de caminos que cruzan la microcuenca.

2.6.1 Pasto

Las áreas ideales de pastos deben sembrarse con especies de gramíneas que se adapten a las condiciones locales de clima y suelo, dándoles un aporte extra de fertilizantes y abonos orgánicos para su establecimiento. Esta vegetación se caracteriza por proporcionar una cobertura densa y muy pegada a la superficie del suelo, por lo que es una buena protección frente a la erosión (Morgan, 1997). Los problemas erosivos aparecen solamente cuando ésta cubierta se elimina por sobrepastoreo, acentuándose el proceso en temporadas de sequía y/o calor excesivo.

Medidas como mantener cargas adecuadas de ganado, además de la siembra y plantación de vegetación herbácea y arbustiva resistente a la erosión en lugares susceptibles de las fincas como lo son pasos de ganado, puertas de acceso a las praderas, abrevaderos y cajas de sal, permite mitigar y controlar procesos erosivos que conlleva el alto pisoteo del ganado en esas zonas.

Además de mantener en la finca una carga de ganado óptima, se debe realizar una rotación del ganado dividiendo la finca en apartos, de manera que se de una explotación de los pastos del 40%-50% y dando un tiempo para su rehabilitación, por lo que se evita la

pérdida de cobertura sobre el terreno si hay sobrepastoreo y se evita la pérdida de buenas gramíneas en caso del subpastoreo (Hudson, 1982).

Marchamalo (2004) recopila varios trabajos realizados en Costa Rica donde se ve el efecto de distintas coberturas en cuanto la producción de erosión y sedimentos, de los cuales se puede concluir el efecto positivo de los pastos como cobertura que garantiza niveles bajos de erosión dándose casos donde las tasas de erosión son nulas. Como por ejemplo Ives (1951), donde para un periodo de estudio de tres años obtuvo una tasa erosiva de 0,00 ton/ha en pastos con pendientes del 16% y 45%, contrastando lo encontrado en suelos desnudos con la misma pendiente donde se alcanzaron tasas de 0,24 ton/ha y 18,79 ton/ha, respectivamente para cada pendiente en análisis. Por otro lado Cervantes (1992), citado por Marchamalo (2004), compara el efecto de la escorrentía y su influencia en la erosión en tipos de uso de suelo de café y pastos, donde encuentra que para una escorrentía de 1,3% (con respecto a la lluvia) produce en café una tasa erosiva de 55,4 ton/ha/año mientras que en pastos se produce 12,3 ton/ha/año con una escorrentía mayor de 2,4% (con respecto a la lluvia).

El punto de cuidado en los terrenos de pasto, incluyendo los antes vistos de sobrecarga del ganado, es el alza en la escorrentía producto de la lluvia precipitada y una avenida máxima instantánea rápida en los cuerpos de agua, pues por ejemplo en el caso citado anteriormente de Cervantes (1992), la mayor escorrentía se dio en pastos por la compactación superficial debido al pisoteo del ganado que disminuye la porosidad del suelo reduciendo la infiltración en los mismos. Igual resultado obtuvieron Fernández, A. y Aylward, B. (1999) donde para la cuenca del río Chiquito, cuenca vecina de la del río Santa Rosa, los caudales promedios resultantes de eventos de precipitación fueron el doble en zonas de pasto que en zonas de bosque, lo cual hace que los pastos no sean zonas de recarga afectando las fluctuaciones por deficiencia de su caudal base en los ríos en las temporadas secas y originando riesgos de inundaciones en épocas lluviosas.

2.6.2 Bosque

La cobertura de bosque se puede considerar como una condición de equilibrio natural en los procesos de erosión, donde la tasa de formación de la tierra es igual a la producida por los fenómenos de pérdida de suelos en una cuenca (Gómez, 2002; Kirkby, 1980).

Morgan (1997) indica que los bosques proporcionan una excelente protección del suelo frente a la erosión. Mantienen altas tasas de evapotranspiración, intercepción e infiltración, lo cual genera menor escorrentía y una avenida máxima instantánea más reducida (Hudson, 1982). Esto provoca que estas zonas sean de recarga acuífera, manteniendo un caudal promedio estable en los cursos de aguas como lo indican Fernández, A. y Aylward, B. (1999), tanto para épocas secas como lluviosas. Otra importancia de los bosques es la generación de microsistemas de baja presión que propician eventos de precipitación con mayor facilidad que en pastos, donde la regulación de temperatura es nula por parte de este uso de suelo.

Retomando el concepto de erosión, las tasas presentadas en bosque son leves por la baja escorrentía manifestada en ellos y la presencia de hojas en el suelo (residuos) que mitigan la erosión por salpicadura y por ende el desprendimiento de partículas de suelo.

Los problemas de erosión severos en bosque se dan cuando su estado natural es afectado por diversas actividades humanas como corta de árboles para leña, tala de árboles y limpieza de la zona para establecer zonas de cultivo o pastoreo y en mayor grado, la apertura de caminos para transporte, los cuales según Morgan (1997) se convierten en los posibles mayores contribuyentes de sedimentos producidos en una cuenca.

En el caso de terrenos forestales, donde se da la explotación maderera, la intensidad de la erosión es más alta en los años inmediatamente siguientes a la corta pero se reduce en los años sucesivos con el rebrote de la vegetación natural o la replantación, de manera que se vaya dando una restauración del mismo y las tasas de erosión se normalicen a las condiciones iniciales.

Leaf (1970) citado por Morgan (1997) indica una pérdida de 0,22 ton/ha mientras se estuvo explotando el bosque en las montañas de las Rocallosas junto con la lógica cons-

trucción de caminos, pero esta tasa se redujo años después a 0,10 ton/ha cuando se dio el cese de operaciones.

2.6.3 Taludes de caminos

Los taludes de caminos así como las superficies de rodamiento de los caminos, como lo indican varios autores como Morgan (1997), Hudson (1982), la FAO (1990), Morales (2003), entre otros, son la principal fuente de erosión y sedimentación causada por el hombre debido a la desatención que han tenido estos en las actividades económicas para las cuales fueron desarrollados, pues se utilizan como medio de comunicación. Generalmente los taludes son desmontes y terraplenes de laderas con altas pendientes, que presentan poca o nula cobertura vegetal, los cuales no se hacen con un ángulo superior al de reposo del material del terreno que queda, de esta forma sometido a riesgos de deslizamientos.

Los taludes son sometidos a los mismos factores que rigen la erosión, pero en mayor gravedad por sus condiciones de cobertura e inestabilidad que presentan, son de gran importancia para ser considerados como importantes focos de sedimentos y puntos de interés primordial para la restauración de los mismos.

La FAO (1990), “Diseño y construcción de caminos en cuencas hidrográficas frágiles” identifica cuatro factores que influyen en los procesos erosivos en caminos y sus taludes:

- Factores físicos: tipo de suelo, geología y el clima (vistos anteriormente como factores que rigen la erosión).
- Densidad de caminos: que es la longitud total de caminos por unidad de área de la cuenca. La intensidad de la erosión está directamente relacionada con la longitud total de los caminos, donde se considera óptima una red de caminos aproximadamente de 30 m/ha-40 m/ha.
- Trazado del camino: está en relación con la pendiente, los cursos de agua y los suelos frágiles, los cuales tienen un efecto directo sobre la cantidad de sedimento que llega a los cauces de agua.

- Normas y construcción de caminos: ancho del camino, inclinación de la pendiente del talud, instalación de drenajes, entre otros.

Las causas principales del deterioro de los taludes según Porras (2000) tienen su origen en la degradación de la estructura y mecánica que sufren los suelos por procesos erosivos sobre las superficies expuestas de los cortes y rellenos de terreno, y otros mecanismos desestabilizadores como sismos y/o alteraciones sucesivas realizadas por el humano en estos sitios.

Un ejemplo de la gravedad de los taludes de caminos la indica Morgan (1997) donde la cuenca Deer Creek, en un terreno de uso forestal, pasó de una tasa de 0,97 ton/ha de sedimentos a una tasa que aumentó en 150% (1,47 ton/ha) un año después cuando se construyeron caminos que representaban un 25% de la cuenca.

Estos focos de erosión han tenido poco estudio, ejemplo de esto es que no hay modelación para tales condiciones particulares de poca área y pendientes altas que muestran los taludes. En el caso de los caminos es igual, pero ya se documenta un trabajo donde se desea estimar la producción de sedimentos en caminos rurales, puesto en marcha por Duff (2010).

Por tanto el tratamiento de los taludes toma gran importancia pues como dice Morales (2003) son grandes focos de producción de sedimentos que aún no han recibido la atención correcta y siguen sin integrarse a las soluciones de los mismos la parte biológica, la botánica, la climatológica, la edafológica, en general, la bioingeniería, como por ejemplo lo plantea Porras (2000), donde desarrolla una guía donde propone el uso de la vegetación para la estabilización de taludes, como un método de bioingeniería amigable con el ambiente, de bajo costo económico para su implementación y que arroja buenos resultados en cuanto a la mitigación de los procesos erosivos.

CAPÍTULO 3: Metodología

3.1 Criterio para definir los sitios de interés

Como se indicó anteriormente en los antecedentes, la microcuenca del río Santa Rosa presenta diferencias en cuanto a clima, precipitación y zonas de vida que hacen necesario dividirla en dos para analizar por separado el proceso erosivo por las diferentes condiciones de cobertura que presenta tanto el pasto como el bosque.

Por tanto, analizando el mapa de zona de vida presentes en la microcuenca (Figura 1.1, mostrada anteriormente) se tiene que el cambio de zona de vida de bosque tropical húmedo a bosque tropical seco coincide aproximadamente con la curva 540msnm. A la vez esta divide casi en la mitad del área a la microcuenca. De esta manera se delimita el área de estudio llamada microcuenca media-alta, desde los 540msnm hasta los 1 038msnm en el Cerro Chiripa, que es el área donde se presentan las zonas de vida de bosque húmedo.

La Figura 3.1 muestra la microcuenca dividida en dos a la altura de la curva 540msnm. Se observa el área de la microcuenca media-baja en color verde claro, la cual es trabajada por el Ing. Sisgo Acuña Ch., y la microcuenca media-alta, objeto de estudio del presente trabajo, en color verde oscuro (área de 5 024,74ha) la cual representa un 48% del área total de la microcuenca.

A partir de la base de datos biofísica de la microcuenca del río Santa Rosa generada por Aguirre, J. y Araya, J. (2007), almacenada en un SIG, se origina un cruce entre el mapa de pendientes (Figura 3.2) y el uso del suelo (Figura 3.3) de la microcuenca del río Santa Rosa. El mapa de pendientes se basa en la Ley 7 779 de Uso, Manejo y Conservación de Suelos y Aguas, con pendientes entre 0%-15%, 15%-30%, 30%-45%, 45%-60% y 60% a más.

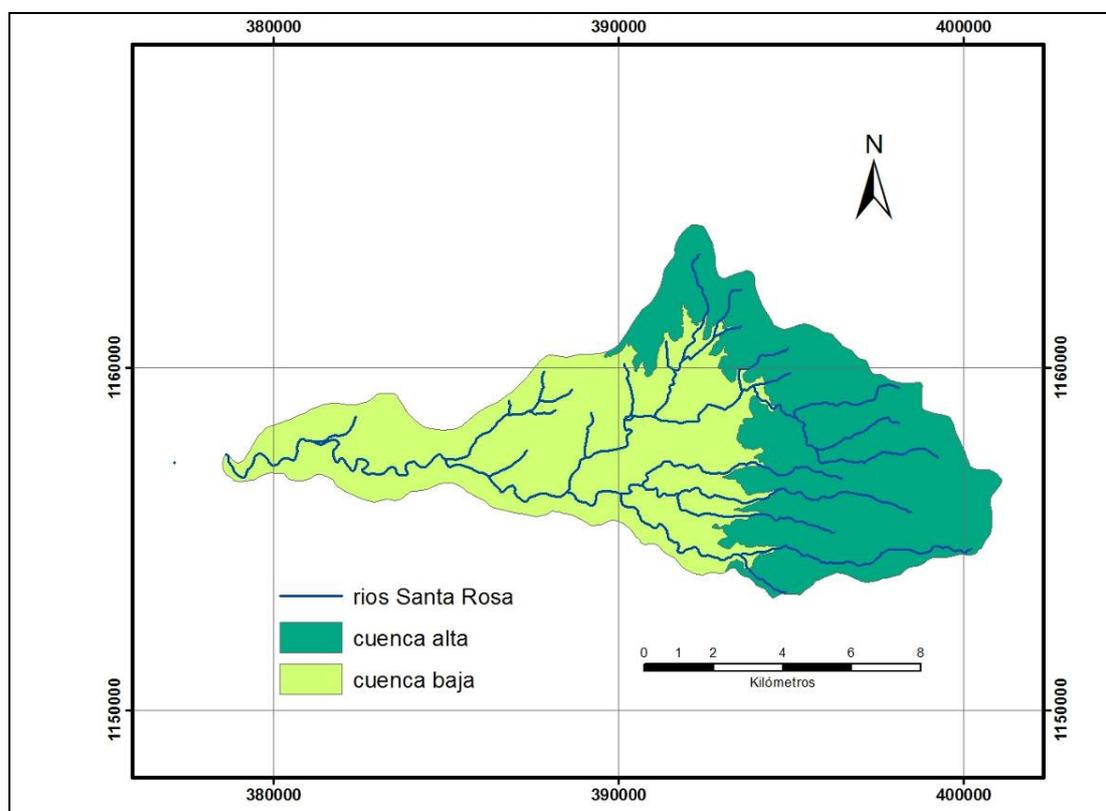


Figura 3.1 División de la microcuenca del río Santa Rosa en microcuenca media-alta y microcuenca media-baja. Fuente. El autor.

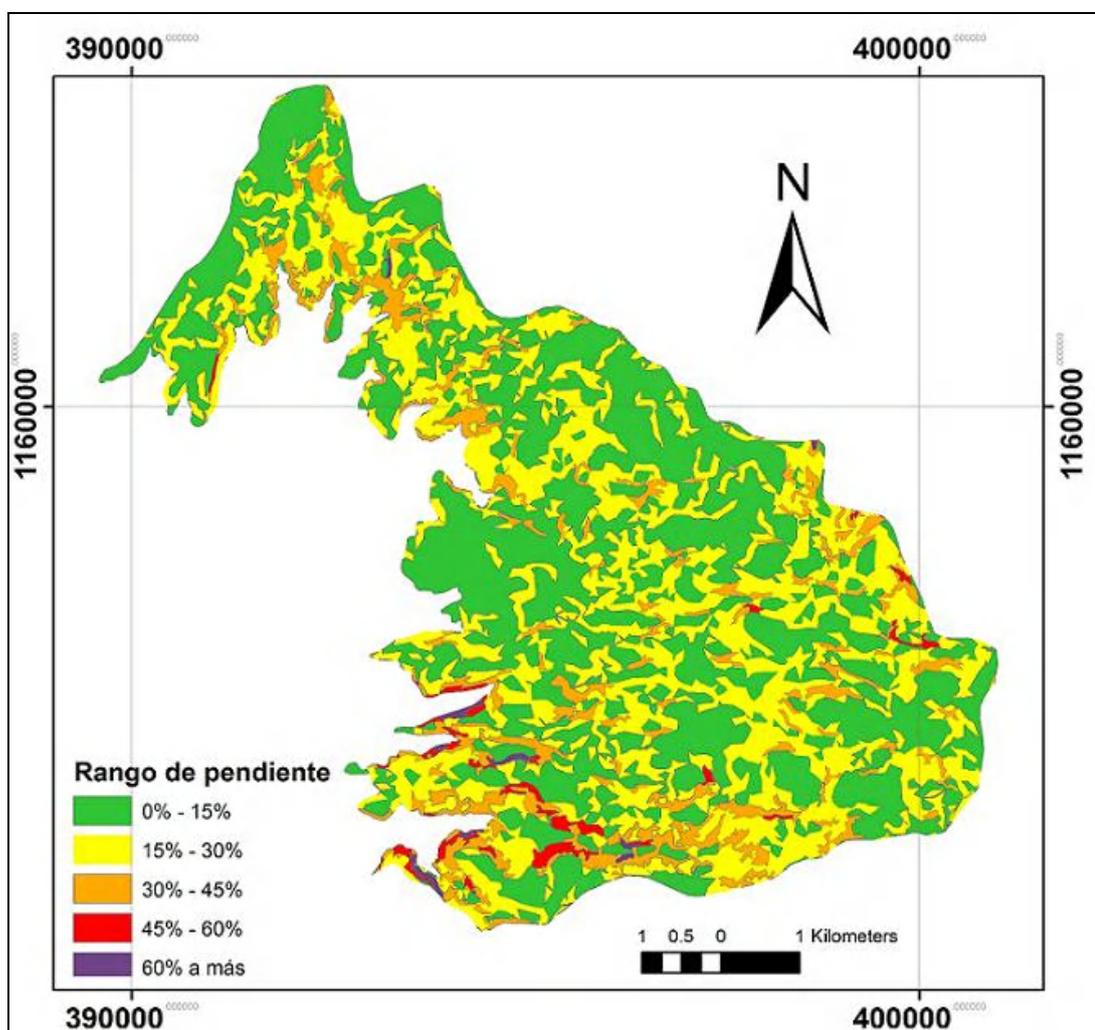


Figura 3.2 Mapa de pendientes de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa. Fuente. El autor.

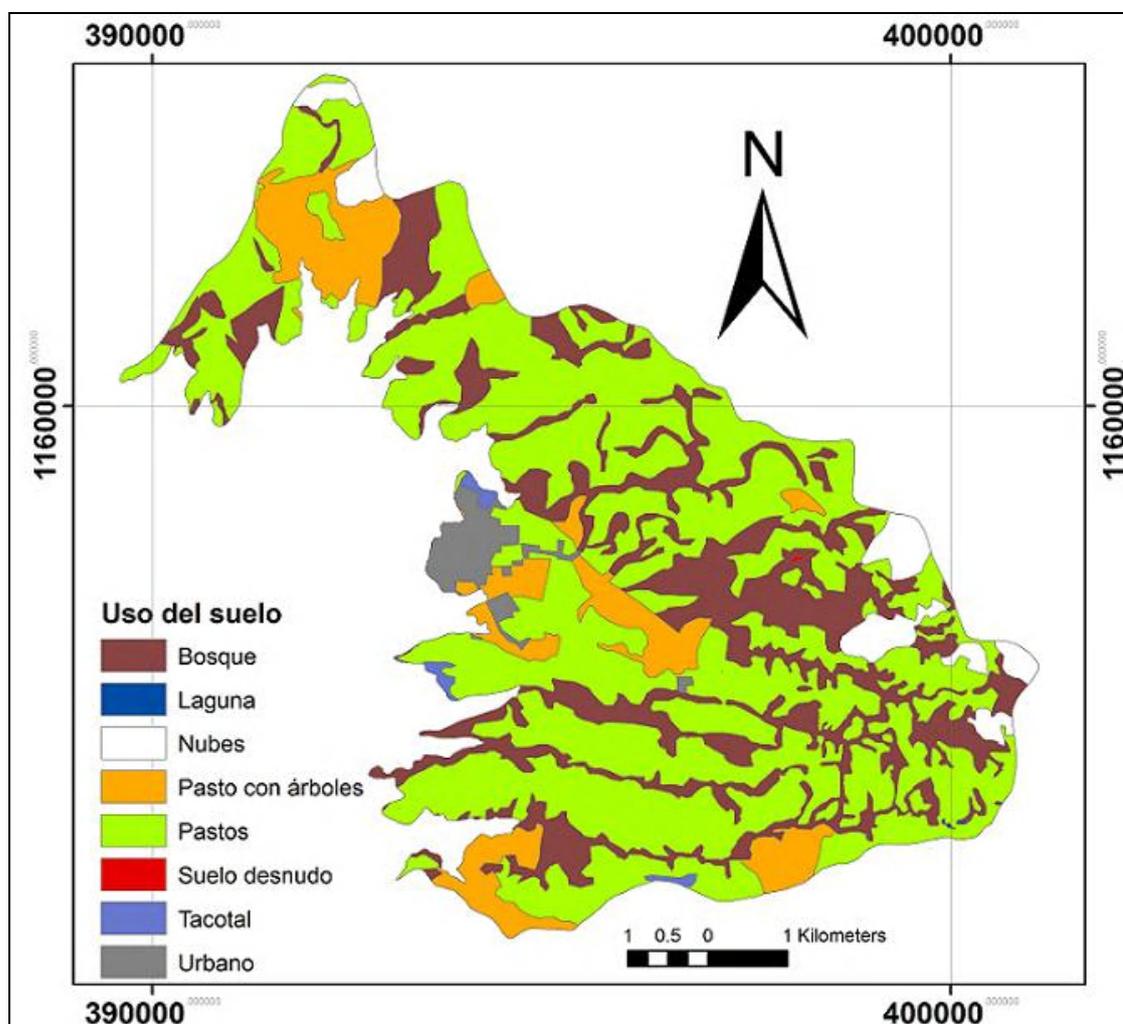


Figura 3.3 Mapa de uso de suelo de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa. Fuente. El autor.

La Figura 3.4 muestra los resultados del cruce de pendientes y uso de suelo para la microcuenca media-alta. En cuanto a pendientes, la mayor área en la microcuenca corresponde a la pendiente entre 0%-15%, con 49% de área (2 469ha) y este porcentaje decrece conforme la pendiente aumenta, hasta llegar a menos de 1% de área (29ha) en pendientes de 60% a más, de un total de 5 024ha.

Por tipo de uso de suelo, el pasto y el bosque representan el 83% (4 168,21ha), seguido por pasto con árboles con un 11% y en menor proporción urbano, tacotal y

suelo desnudo. El 4% de “Otros” corresponde a áreas de tipo de uso de suelo que no pudieron ser identificadas en la fotografía aérea debido a la presencia de nubes.

El rango de porcentaje de pendiente representativo para la microcuenca está entre 0% a 45%, con los tipos de uso de bosque (97%) y pasto (99%), en pendientes de 0%-45%, como se aprecia en las gráficas circulares de porcentaje de pendiente en bosque y pasto, respectivamente.

En resumen, los tipos de uso de suelo de pasto y bosque con la combinación de pendiente entre 0%-45% representan el 81% del área de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa, o sea 4 101ha de 5 024ha.

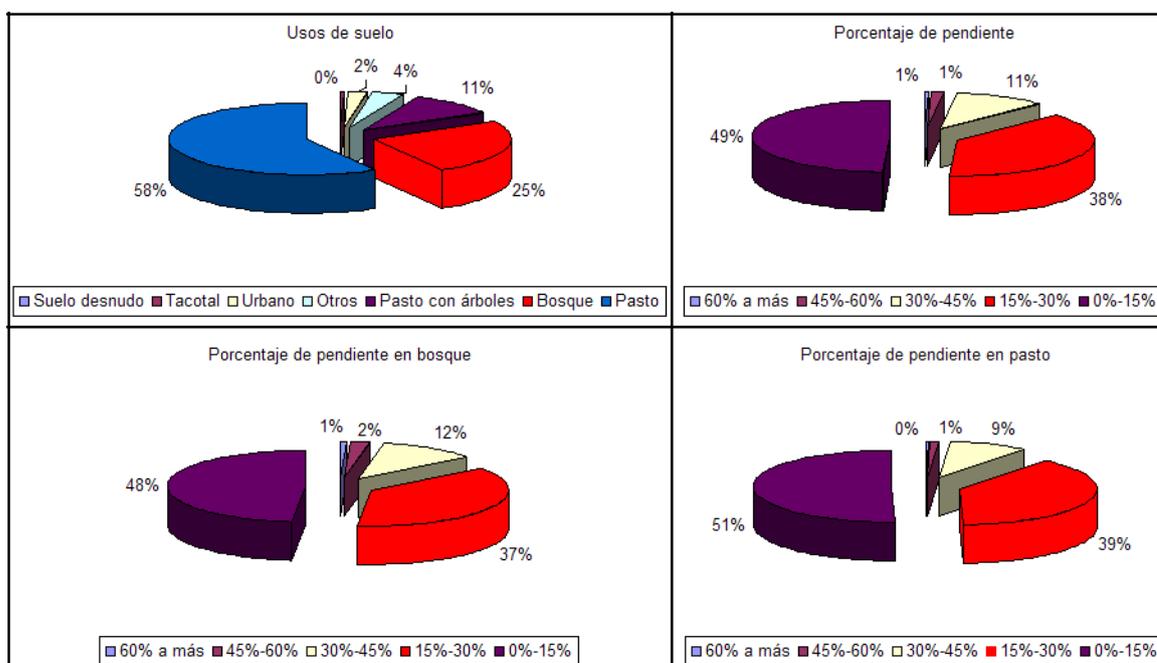


Figura 3.4 Distribución del área de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa. Fuente.

El autor.

Basado en lo anterior, se plantea el siguiente diseño experimental para la microcuenca media-alta: dos usos de suelo (bosque y pasto), tres rangos de pendiente (0%-15%, 15%-30%, 30%-45%), con tres repeticiones, $2 \times 3 \times 3 = 18$ parcelas experimentales.

No se consideran en el estudio las pendientes mayores a 45% pues representan una pequeña área dentro de la microcuenca y en su mayoría presentan cobertura de pasto o tacotal, coberturas que en buena condición reducen los efectos erosivos.

Se procede a ubicar sitios en bosque y fincas ganaderas que cumplan con el rango de pendiente establecido, para lo cual se realizan giras a la zona de interés. Ubicado el posible sitio donde establecer la parcela experimental, se procede a tomar un punto de referencia con el GPS, tipo navegador, y con el clinómetro se mide la pendiente del terreno para determinar en que combinación de suelo-pendiente se ubica. Para poder establecer las parcelas experimentales en esos terrenos se debió adquirir un compromiso con los propietarios informándoles en qué consistía el estudio. Se firma un formulario, el machote del mismo se presenta en el Anexo B.

En el caso de la ubicación de las parcelas en los taludes en caminos, identificados como fuentes importantes de sedimentos en la gira realizada en marzo de 2009, se hace un reconocimiento por las principales vías de comunicación que atraviesan la microcuenca del río Santa Rosa. Con GPS se ubica cada talud que presente poca o nula cobertura vegetal y síntomas severos de erosión como formación de surco, cárcavas y pequeños deslizamientos en masa.

Debido a las características tan propias de cada talud ubicado, los resultados de tasas erosivas que se obtendrán solo podrán ser extrapoladas al área afectada total, término que se explica en el apartado 3.3 “Medición de la erosión hídrica en parcelas de taludes de caminos”, donde se encuentra la parcela experimental. En este caso el permiso para la instalación de las parcelas experimentales en taludes de caminos se solicita al CONAVI, entidad del MOPT.

Tabla 3.1 Parcelas experimentales en la microcuenca media-alta del río Santa Rosa.

Uso	Pendiente	Propietario	Estación cercana	Parcela	X (m)	Y (m)
Pasto	0-15	Julio Jenkins Vega	Nueva Tronadora	P 0-15 JJ	398048	1158986
		Julio Jenkins Vega	Nueva Tronadora	P 0-15 JJ-2	397888	1158561
		Stefano Pomma Murialdo	Quesera	PQueserall	395565	1155203
	15-30	Julio Jenkins Vega	Nueva Tronadora	PM 1-30	398801	1155885
		Luis Murillo Martínez	Chiripa	S 15-30 SP	394692	1155217
		Stefano Pomma Murialdo	Quesera	P 15-30 JJ	397857	1158482
	30-45	Julio Jenkins Vega	Nueva Tronadora	M 3-45	399267	1155237
		Jesús Murillo	Chiripa	M 4 30-45	398963	1155051
		Jesús Murillo	Chiripa	P 30-45 JJ	398338	1159385
Bosque	0-15	Municipalidad de Tilarán	Chiripa	FM 0-15-1	400880	1155851
		Municipalidad de Tilarán	Chiripa	FM 0-15-2	401003	1156190
		Jesús Murillo	Chiripa	P 0-15 JM	399372	1155216
	15-30	Municipalidad de Tilarán	Chiripa	FM 15-30-1	400936	1155854
		Municipalidad de Tilarán	Chiripa	FM 15-30-2	400880	1156001
		Municipalidad de Tilarán	Chiripa	FM 15-30-3	401208	1156423
	30-45	Municipalidad de Tilarán	Chiripa	FM 30-45-1	401196	1156445
		Jesús Murillo	Chiripa	FM 30-45-2	400835	1155843
		Municipalidad de Tilarán	Chiripa	P 30-45 JM	398851	115 5224

Tabla 3.2 Parcelas instaladas en taludes de caminos en la microcuenca del río Santa Rosa.

Deslizamiento	Carretera (N° de ruta)	Administrador	Estación cercana	X (m)	Y (m)
D1			Nueva Tronadora	396490	1158586
D2			Nueva Tronadora	396817	1158323
D3	926 Silencio-Tilarán	MOPT	Nueva Tronadora	396131	1158510
D4			Nueva Tronadora	396258	1158508
D5			Nueva Tronadora	395716	1158189
C-T 01			Chopo	382060	1156552
C-T 03	142 Cañas-Tilarán	MOPT	Chopo	382188	1156792
C-T 06			Tejona	390699	1159717
T-T 03	142 Tilarán-Tronadora	MOPT	Tejona	394792	1159374
D 07	145 Queb. Gde.-Tilarán	MOPT	Quesera	3955821	1156149
T-L 01	925 Líbano-Tilarán	MOPT	Líbano	391817	1154558

Las Tablas 3.1 y 3.2, indican los sitios de evaluación para los tipos de uso de suelo de bosque y pasto y además, los taludes de caminos ubicados a través de toda la microcuenca del río Santa Rosa. Se muestra el propietario del terreno donde se ubican los puntos, la estación pluviográfica de influencia y su ubicación geográfica en coordenadas métricas, proyección para Costa Rica CRTM05. La Figura 3.5 muestra la ubicación espacial de los puntos donde se ubican las parcelas experimentales.

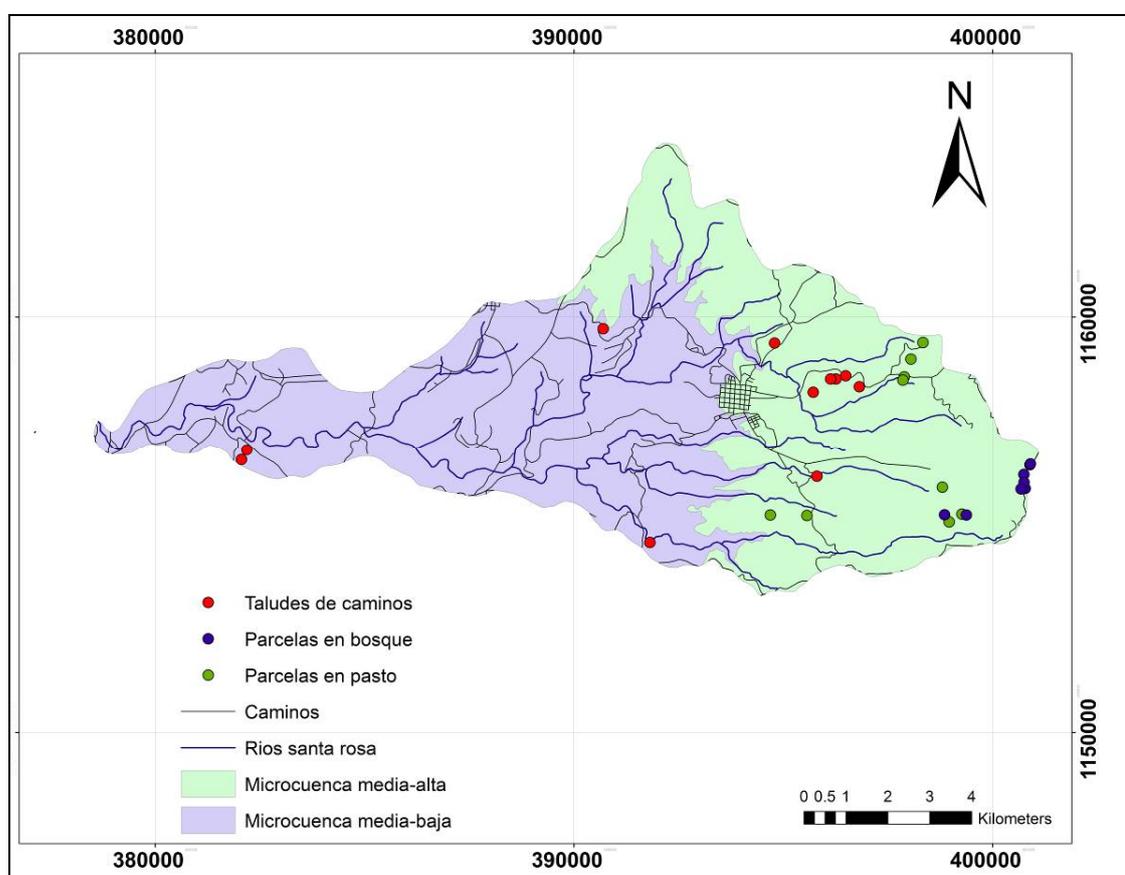


Figura 3.5 Ubicación de las parcelas de bosque y pasto en la microcuenca media-alta y los taludes de caminos a través de la microcuenca del río Santa Rosa. Fuente. El autor.

3.2 Medición de la erosión hídrica en parcelas de pasto y bosque

Como línea base de información, se requiere los datos de precipitación de las estaciones pluviográficas de la zona y la delimitación del área de estudio (parcela experimental) mediante un levantamiento topográfico.

Los datos de lluvia son indispensables a la hora de llevar a cabo un estudio de esta índole, ya que es necesario conocer cuánta es la cantidad e intensidad de la precipitación (energía de la gota de lluvia) que recibe el terreno y cuál es el comportamiento de este al encontrarse bajo condiciones que sobrepasan su capacidad de infiltración (Prado, 2009).

En cuanto a los datos de precipitación se solicita al área de Hidrología del Departamento de Estudios Básicos del ICE los datos históricos del año 2009 de forma diaria, de junio a diciembre. Estos datos son generados por estaciones pluviográficas con datos cada minuto, cuando se trata de tormentas intensas. La información solicitada corresponde a las estaciones pluviográficas Tejona (69552), Nueva Tronadora (69585), Cerro Chiripa (69630), Libano (76020), El Chopo (76021), La Quesera (76022), El Coyol (76024) y Sandillal (76040).

La cuantificación de la erosión hídrica se realiza utilizando membranas de geotextil tipo “silt fence” siguiendo la metodología de instalación desarrollado en la tesis del Ing. Rodolfo Prado Segura titulada “ Metodología ajustada para la determinación de pérdida de suelo”, elaborada en 2009, el cual se muestra en el Apéndice A. El geotextil utilizado es el W330. Las propiedades físicas e hidráulicas se muestran en el Anexo C.

Para la delimitación de las parcelas experimentales se recibe la ayuda del Departamento de Servicios Básicos del ICE con el Topógrafo Henry Fernández y su equipo de trabajo, quienes levantaron las zonas de estudio mediante el siguiente procedimiento: cada parcela levantada (medida) era reconocida mediante una observación de campo para determinar el área de influencia que genera la escorrentía que llega a las

geomembranas. Para el levantamiento topográfico se ubicó cerca de cada parcela un par de puntos (pines de hierro) que sirvieran como arranque de trabajo. La determinación de cada pareja de puntos se hizo con GPS y con una técnica llamada RTK (Real Time Kinetic), la cual usa una antena base que recibe la señal de los satélites y una estación de radio la cual modifica la señal y la convierte en coordenadas geográficas. Para este trabajo se utilizó un equipo marca Trimble y tiene una precisión que dependerá del tiempo de medición. Para el caso de estudio, los puntos quedaron con una precisión absoluta de $\pm 5\text{cm}$.

Con las coordenadas de este par de puntos, se procede al levantamiento topográfico convencional de las parcelas, utilizando una estación total para determinar la forma y área de cada parcela y luego poder tener un modelo con las curvas de nivel generadas a partir de la interpolación de los puntos que se levantaron en cada una de las parcelas. Se utilizó una estación total marca Leica, modelo TCR 1205. Este equipo cuenta con una precisión angular de $\pm 5''$ y una precisión lineal de $\pm 5\text{mm}$. El levantamiento consistió en estacionar el instrumento en uno de los puntos de cada pareja que se puso con GPS, tomar línea en el otro y empezar a levantar cada punto de interés, como eran: la geomembrana, el perímetro, los puntos internos de la parcela y puntos fuera de ella. Cada punto levantado queda grabado con una descripción (número) y sus respectivas coordenadas Norte, Este y elevación que servirán para dibujar el modelo de curvas de nivel mediante un programa de cómputo.

El objetivo de esta delimitación es establecer el área efectiva de aporte y poder relacionar la cantidad de suelo erosionado con una unidad de área establecida. También se requiere para extrapolar a toda la microcuenca media-alta los resultados obtenidos de pérdida de suelo, según corresponda el tipo de uso del suelo y su rango de pendiente.

La recolección de las muestras se realiza una vez por semana a cada parcela, a excepción de que se presente un evento de precipitación importante que requiera visitar el lugar para corroborar el adecuado estado de la geomembrana, verificando que

no se sobrepase su capacidad y se pueda perder suelo y, consecuentemente, información.

Las muestras de suelo obtenidas se llevan a la Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica (UCR) para ser secadas. Cada muestra, de un kg, se divide en submuestras, luego se pesan en la balanza y secan en el horno 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. Con este dato y los datos registrados por las estaciones pluviográficas, se realizará la relación entre lluvia (energía de la misma) y desprendimiento del suelo para las características del terreno bajo estudio, metodología que se explicará en el apartado 3.4 “Representación gráfica de la energía de la lluvia y la erosión durante el ciclo de prueba y generar un mapa de vulnerabilidad”.

3.3 Medición de la erosión hídrica en parcelas de taludes de caminos

Para la medición de la erosión hídrica en parcelas ubicadas en taludes de caminos, se ejecutan los mismos pasos dados en la metodología 3.2 “Medición de la erosión hídrica en parcelas de pasto y bosque”. Se adapta la colocación de las barreras de geotextil “silt fence” a los taludes de camino, luego se procede con el levantamiento topográfico del área tributaria del deslizamiento (área de estudio) y el área total de talud afectada, en caso que se evalúe una pequeña porción de todo el talud afectado. Se realiza la recolección de muestras cada semana y por último, se llevan las muestras a secar al laboratorio de la Escuela de Ingeniería Agrícola para determinar la cantidad de suelo seco perdido.

3.4 Representación gráfica de la energía de la lluvia y la erosión durante el ciclo de prueba y generar un mapa de vulnerabilidad

Los insumos necesarios para desarrollar este objetivo son: 1) Datos de suelo recolectado y contenido de humedad del suelo recolectado, ambos por fecha de recolección; y 2) Datos de precipitación diaria de la estación pluviográfica de influencia en la parcela y datos de energía de la lluvia debido a eventos de precipitación.

El primer punto se obtiene de la metodología 3.2 y 3.3 de medición de la erosión hídrica en parcelas experimentales de uso de suelo de pasto y bosques y taludes de camino.

Los datos de precipitación diaria, para el periodo de prueba, para cada estación pluviográfica en la microcuenca se solicitaron al área de Hidrología del Departamento de Estudios Básicos del ICE, como se mencionó anteriormente. Las áreas de influencia de las estaciones pluviográficas para las parcelas de pasto y bosque se muestran en la Figura 3.6.

La Figura 3.7 muestra las estaciones pluviográficas de influencia de las parcelas experimentales ubicadas en taludes de caminos que atraviesan toda la microcuenca del río Santa Rosa. Si bien las parcelas de la Ruta 926 se ubican en el área de influencia de la estación La Quesera, la estación de influencia para estos deslizamientos es Tronadora debido a las siguientes razones: la división geográfica (presencia de una fila de montañas) entre la estación La Quesera y los deslizamientos hace que las condiciones de precipitación dadas en la zona de la Quesera sea distinto a la zona donde se ubican los deslizamientos de la Ruta 926. Además, la zona donde se ubican las parcelas experimentales de la Ruta 926 está altamente influenciada por las condiciones climáticas dadas en la zona del Embalse Arenal, zona donde se ubica la estación Tronadora.

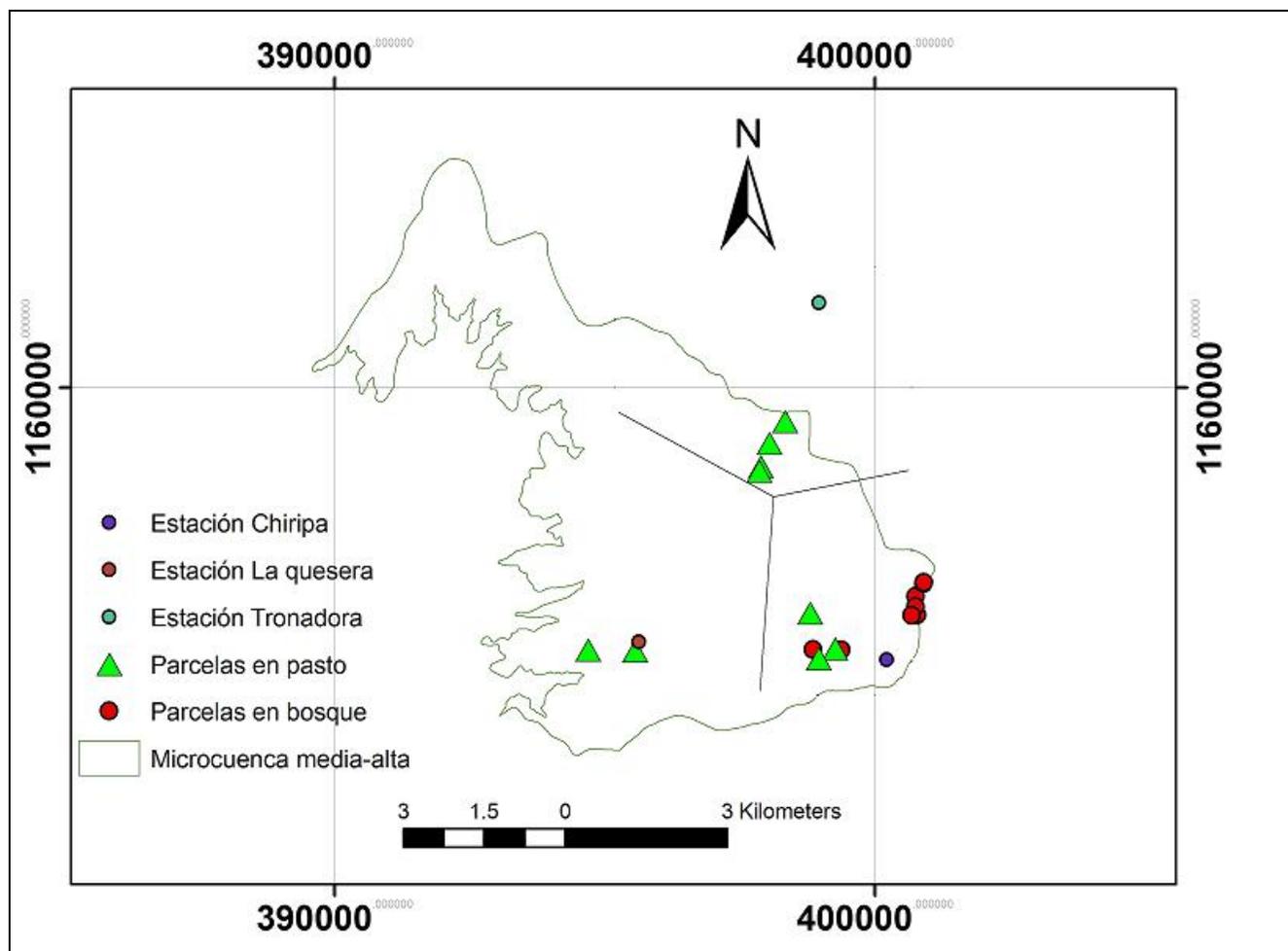


Figura 3.6 Área de influencia de las estaciones pluviográficas que cubren las parcelas de bosque y pasto de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa. Fuente. El autor.

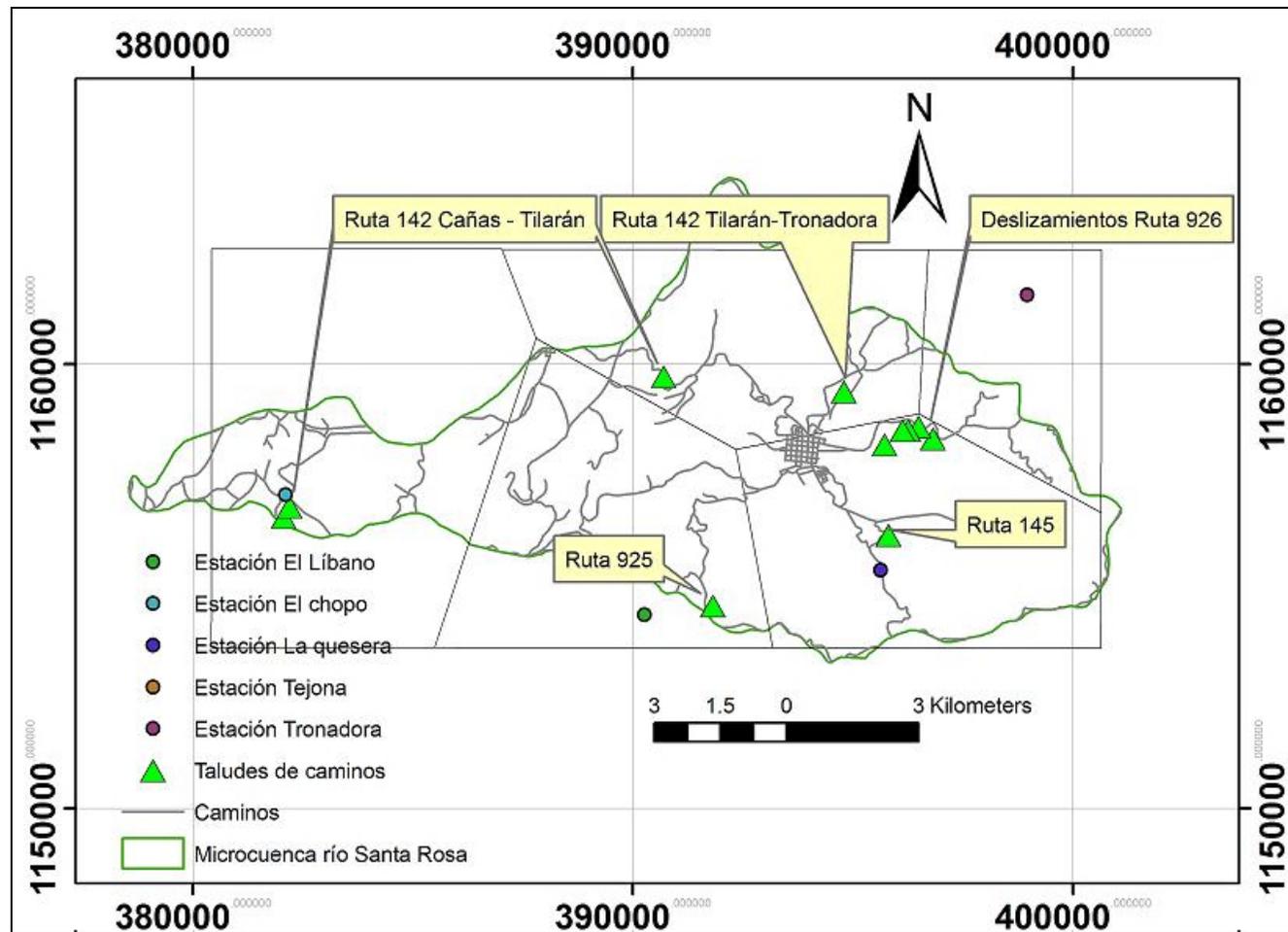


Figura 3.7 Área de influencia de las estaciones pluviográficas que cubren las parcelas ubicadas en taludes de caminos de la microcuenca del río Santa Rosa. Fuente. El autor.

Los datos de energía de la lluvia, para el periodo de prueba, se obtienen mediante la aplicación del software “Lluvia Erosivas”, desarrollado por Gómez (2002) y el Área de Apoyo Informático de Estudios Básicos del ICE. El mismo se elaboró para determinar el Factor R, el cual es uno de los factores a incorporar dentro del programa CALSITE, con el cual Gómez (2002) calculó la erosión y producción de sedimentos en las cuencas Reventazón, Pirrís y Sarapiquí.

Gómez (2002) indica que el factor R, según la definición de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, debe calcularse según la metodología del índice EI_{30} , y se escoge este programa para determinar la energía de la lluvia, pues R incluye características globales de cualquier tormenta, como lo es la energía total, que se relaciona directamente con el volumen de precipitación, citado por Mora (1987) en el trabajo de Gómez (2002).

“Lluvia Erosivas” permite seleccionar, a partir de la digitalización de bandas de registro de precipitación y el registro de estaciones automáticas, aquellas tormentas con capacidad erosiva, que se identifican si se cumple con cierto umbral de precipitación (en este caso, con un acumulado total de lluvia mayor que 13mm) y si se encuentran separadas una de otra, cuando menos, por un lapso que se define como un valor de tolerancia (para el programa se estableció una separación de tormentas de 6 horas, para considerarlas independientes).

El programa toma como insumo las alturas de precipitación (mm) y el tiempo asociado (min) que se encuentran tabuladas en la base de datos del sistema hidrológico del ICE, generadas a partir de las bandas digitales de las estaciones pluviográficas ubicadas en la microcuenca del río Santa Rosa. Los registros de precipitación se consideran instantáneos (en tormentas muy intensas se cuenta con un dato cada minuto). A partir de esta información se calcula la intensidad instantánea I (mm/hr) para cada lapso registrado y su respectiva energía instantánea E_c ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{mm}$) por medio de la siguiente ecuación.

$$E_c = 1,213 + 0,890 \times \log(I) \quad (3.4-1)$$

El proceso del programa continúa al multiplicar cada energía por la correspondiente altura de precipitación (h). Posteriormente todas las energías dentro de una tormenta se suman, con lo que se determina la energía total de la lluvia E (kg·m/m²).

$$E = \sum E_c \times h \quad (3.4-2)$$

3.4.1 Proceso de análisis realizado a cada parcela experimental: bosque, pasto y taludes de caminos

El siguiente procedimiento es un ejemplo donde se explica para una parcela experimental la metodología a seguir para realizar el análisis del efecto de la energía de la lluvia sobre el suelo.

Con los datos de suelo recolectado en campo y contenido de humedad obtenido en laboratorio, por fecha en la parcela, logrados como se explica en el Apéndice A (pasos 4.8 y 4.9), se procede a determinar el peso neto de suelo seco que se recogió del geotextil, el cual no considera la masa de agua que contiene el peso recolectado. Se procede, por fecha de recolección, a tabular los siguientes datos: Suelo recolectado, suelo seco, contenido de humedad, precipitación registrada a la fecha de recolección y energía obtenida a la fecha de recolección, como se muestra en la Tabla 3.3. Además se va acumulando los datos de suelo recolectado, suelo seco, precipitación y energía.

Con los datos de las columnas de energía acumulada y suelo seco acumulado, se grafica la relación que se da debido a la influencia que tiene la energía de la lluvia sobre el suelo erosionado (Figura 3.9). Antes de esto, para tener la certeza que esa energía dada es la que produce la cantidad de suelo desprendido asociada, se grafica las columnas de precipitación acumulada contra energía acumulada, para determinar que correlación tienen los datos registrados de precipitación y la energía obtenida de estos datos, pues pueden ser variables con mucha independencia. Para este caso de ejemplo

mostrado, la correlación obtenida es de $R^2 = 0,93$ (Figura 3.8) por lo cual se confía en el resultado presentado en la gráfica de la Figura 3.9, donde la diferencia entre la línea de suelo recolectado y la línea de suelo seco es la humedad.

Tabla 3.3 Tabulación de los datos de suelo húmedo, suelo seco, precipitación y energía para generar los resultados requeridos.

SEMANA	DIAS	Suelo húmedo (kg)		Suelo seco (kg)		CH (%)	Precipitación (mm)		Energía (kg·m/m ²)	
		Recolectado	Acumulado	Recolectado	Acumulado		Registrada	Acumulada	registrada	acumulada
2	30/JUN	119.28	119.28	83.88	83.88	29.68	87.00	87.00	96.48	96
3	7/JUL	278.48	397.76	181.30	265.18	34.90	123.20	210.20	277.48	374
4	14/JUL	210.70	608.46	143.27	408.45	32.00	62.60	272.80	110.44	484
5	22/JUL	308.45	916.91	198.09	606.54	35.78	150.90	423.70	285.78	770
6	29/JUL	36.25	953.16	27.95	634.49	22.90	32.00	455.70	0	nd
7	4/AGO	34.95	988.11	21.18	655.67	39.40	50.80	506.50	79.49	850
8	11/AGO	87.55	1075.66	66.56	722.23	23.97	57.20	563.70	67.3	917
9	19/AGO	22.20	1097.86	16.27	738.50	26.72	44.20	607.90	60.2	977
10	28/AGO	181.60	1279.46	120.86	859.36	33.45	52.60	660.50	66.68	1044
11	2/SET	22.10	1301.56	19.49	878.85	11.80	5.10	665.60	0	nd
12	11/SET	231.80	1533.36	156.33	1035.18	32.56	40.40	706.00	34.01	1078
13	18/SET	2.35	1535.71	2.18	1037.36	7.23	12.00	718.00	0	nd
14	22/SET	5.90	1541.61	5.03	1042.39	14.79	3.30	721.30	0	nd
15	28/SET	25.95	1567.56	23.36	1065.75	9.97	20.10	741.40	31.55	1109
16	6/OCT	72.65	1640.21	47.92	1113.67	34.04	66.00	807.40	121.24	1231
17	13/OCT	24.65	1664.86	18.39	1132.06	25.40	41.80	849.20	59.54	1290
18	19/OCT	36.55	1701.41	26.75	1158.81	26.81	30.00	879.20	32.69	1323
19	26/OCT	104.55	1805.96	62.64	1221.45	40.08	93.20	972.40	140.72	1464
20	6/NOV	256.05	2062.01	151.34	1372.79	40.89	145.50	1117.90	303.98	1768
21	9/NOV	19.85	2081.86	12.40	1385.19	37.55	53.00	1170.90	93.34	1861
22	17/NOV	3.50	2085.36	2.30	1387.49	32.60	44.70	1215.60	62.87	1924
23	23/NOV	2.70	2088.06	1.94	1389.43	28.07	31.70	1247.30	32.76	1957
24	10/DIC	8.80	2096.86	7.17	1396.60	18.53	43.70	1291.00	51.43	2008
		2096.86		1396.60		27.79	1291.00		2007.98	

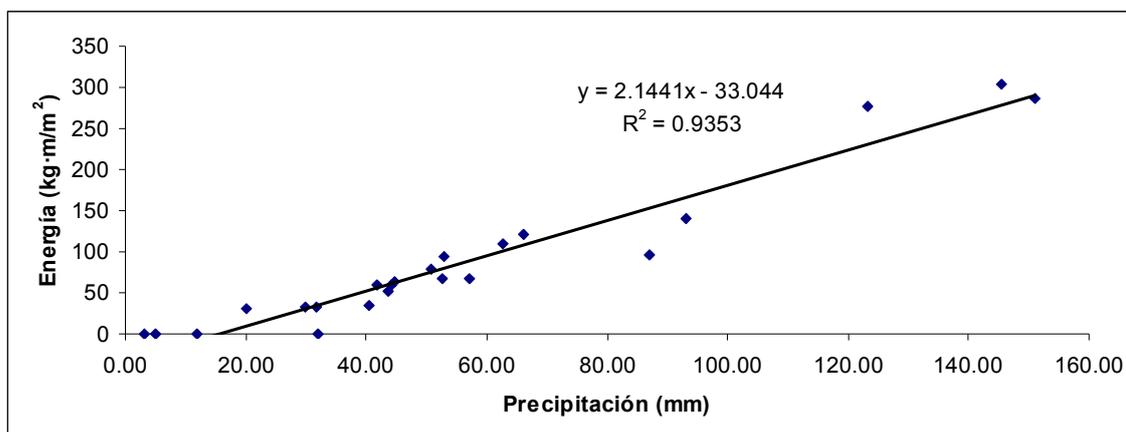


Figura 3.8 Ejemplo de la relación entre la precipitación y la energía que esta genera. Fuente. El autor.

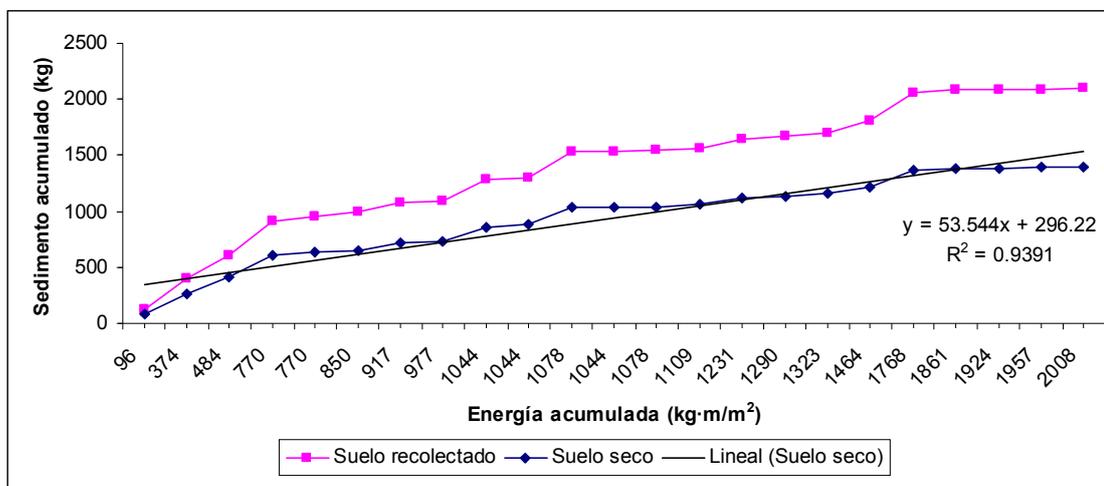


Figura 3.9 Ejemplo de las curvas generadas para relacionar el efecto de la energía acumulada sobre el sedimento. Fuente. El autor.

Posterior a esto, también se presenta como se fue dando la variación de la energía de la lluvia y su efecto sobre el suelo erosionado con respecto al tiempo. Debido a la diferencia en la escala de valores que tienen la energía de la lluvia y el suelo erosionado, se homologa la escala pasando los datos de las columna de suelo seco recolectado y energía registrada (Tabla 3.3) a porcentaje, obteniendo los datos de la Tabla 3.4, con lo cual se genera la gráfica mostrada en la Figura 3.10.

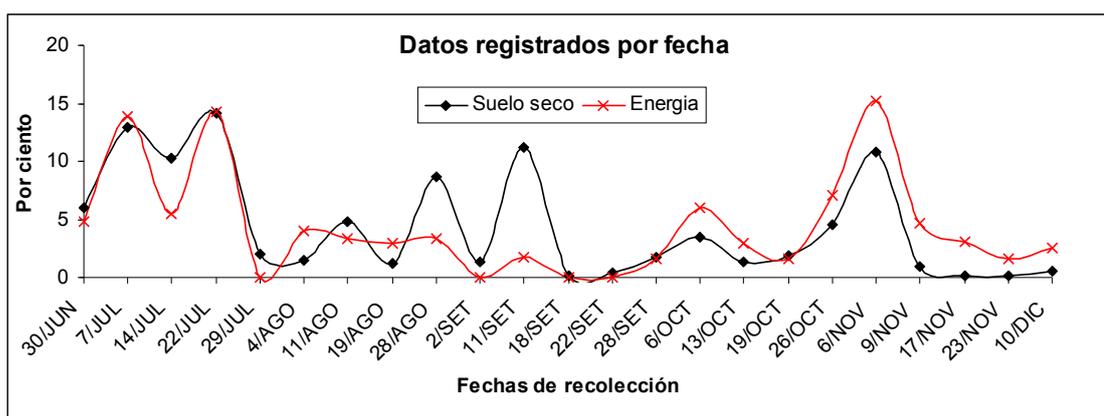


Figura 3.10 Comportamiento semanal de la energía y el suelo erosionado. Fuente. El autor.

Tabla 3.4 Datos por fecha de suelo seco y energía en por ciento.

Fecha	Suelo seco	Energía
	%	
30/JUN	6.01	4.80
7/JUL	12.98	13.82
14/JUL	10.26	5.50
22/JUL	14.18	14.23
29/JUL	2.00	0.00
4/AGO	1.52	3.96
11/AGO	4.77	3.35
19/AGO	1.16	3.00
28/AGO	8.65	3.32
2/SET	1.40	0.00
11/SET	11.19	1.69
18/SET	0.16	0.00
22/SET	0.36	0.00
28/SET	1.67	1.57
6/OCT	3.43	6.04
13/OCT	1.32	2.97
19/OCT	1.92	1.63
26/OCT	4.49	7.01
6/NOV	10.84	15.14
9/NOV	0.89	4.65
17/NOV	0.16	3.13
23/NOV	0.14	1.63
10/DIC	0.51	2.56

Después de realizar el análisis de cómo se comporta la parcela experimental con respecto a los procesos erosivos dados por la influencia de la energía de la lluvia, se procede a determinar la tasa erosiva de la parcela, lo cual se obtiene dividiendo la cantidad total de suelo seco obtenido durante todo el periodo de prueba entre el área de la parcela, dado en toneladas por hectárea (ton/ha). Los datos obtenidos de pérdida de suelo en cada parcela experimental, se promedian para tener un valor de ton/ha por tipo de uso de pasto y bosque y rango de pendiente para un periodo de cinco meses, de junio a diciembre, el cual es el periodo más lluvioso en la zona, por lo cual se considera que es la tasa erosiva generada en un año. Este dato se extrapola a toda la microcuenca media-alta para generar un mapa de vulnerabilidad.

El criterio utilizado para generar este mapa de vulnerabilidad es el de la FAO el cual es citado por Marchamalo (2004) y utilizado por Gómez (2002), con una modificación la cual se presenta en la Tabla 3.5, donde la clase de erosión baja que son erosiones < 10 ton/ha/año se divide en dos: 0 ton/ha/año-0,50 ton/ha/año es erosión nula o imperceptible, y del rango de 0,50 ton/ha/año-10 ton/ha/año es erosión baja, factor 1 y 2 respectivamente. El factor 3, 4 y 5 quedan como lo indica la clasificación de la FAO, con clase de erosión moderada, severa y muy severa, respectivamente.

Tabla 3.5 Clasificación de erosión según FAO modificado.

Factor	Erosión (ton/ha/año)	Clase de erosión
1	0-0,50	Erosión nula-imperceptible
2	0,50-10	Erosión baja
3	10-50	Erosión moderada
4	50-200	Erosión severa
5	> 200	Erosión muy severa

En el caso de las tasas erosivas encontradas en los taludes de caminos, como se indicó anteriormente, estas van a ser muy propias de la parcela experimental evaluada por lo cual no se podrá extrapolar la tasa erosiva de cada talud a los demás puntos identificados con condiciones similares o peores de erosión de los taludes de caminos a través de la microcuenca del río Santa Rosa.

CAPÍTULO 4: Caracterización del área de estudio

4.1 Parcelas experimentales ubicadas en pasto

En la microcuenca media-alta la textura de los suelos donde se ubicaron las parcelas experimentales va de franco a franco arenoso. La cobertura del pasto es del 100% en todas las áreas de prueba y presentan gran desarrollo foliar con altura de pasto de 15 a 70 cm. Se presentan distintas variedades de pasto como lo son estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*), pasto mejorado “Toledo” (*Brachiaria brizantha*) y cobertura mixta de pasto amargo (*Axonopus compressus*), king grass (*Penisetum purpureum x Penisetum typhoides*) y estrella africana, como se indica en la Tabla 4.1 y se ejemplifica en la Figura 4.1.

En la Tabla 4.1, se indica además el tipo de uso dado en las fincas donde se establecieron las parcelas experimentales, que son básicamente dos: ganadería de leche y ganadería de engorde. En algunos casos se da la ganadería mixta. El sistema utilizado es ganadería extensiva, con utilización de apartos medianos y grandes en todas las fincas. Cabe destacar que las fincas donde se desarrollaron las pruebas tienen una superficie mayor a las 80Ha., característica de la mayoría de las fincas de la zona.

Tabla 4.1 Tipo de pasto y uso presentes en las fincas donde se establecieron parcelas.

PENDIENTE DE LA PARCELA	0 - 15 %			15 - 30 %			30 - 45 %		
NOMBRE DE PROPIETARIO	Julio Jenkins	Julio Jenkins	Stefano Pomma	Julio Jenkins	Luis Diego Murillo	Stefano Pomma	Julio Jenkins	Jesús Murillo	Jesús Murillo
NOMBRE DE LA PARCELA	P0-15 JJ	P0-15 JJ2	PQueserall	P15-30 JJ	PM1-30	S-15-30 SP	P 30-45 JJ	M 3-45	M 4-30-45
ÁREA (m ²)	1667,53	5214,84	8959,43	5377,32	4571,90	2857,88	1920,04	1275,95	2235,83
PASTO	Estrella africana	Estrella africana	Toledo (<i>Brachiaria brizantha</i>)	Estrella africana, parto amargo y king grass	Pasto amargo y estrella africana	Toledo (<i>Brachiaria brizantha</i>) y pasto amargo	Estrella africana, king grass y pasto amargo	Estrella africana	Estrella africana
TIPO DE USO	Ganadería de leche	Ganadería de leche	Ganadería de engorde	Ganadería de leche	Ganadería mixta	Ganadería de engorde	Ganadería de leche	Ganadería mixta	Ganadería mixta



Figura 4.1 A) Estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) en la parcela M 4 30-45. B) Pasto amargo (*Axonopus compressus*) y estrella africana en la parcela P 30-45 JJ. C) “Toledo” (*Brachiaria brizantha*) en la parcela S 15-30 SP. En todas las ilustraciones se aprecia la cobertura de pasto del 100% sobre el terreno. Fuente. El autor.

No se presentan evidencias de erosión severa, excepto en algunos puntos de los caminos internos de la finca, cursos de agua estacionales o los pasos permanentes del ganado, a los cuales se les debe prestar cuidado pues con el paso del tiempo pueden generar proble-

mas de reptación, creación de cárcavas o movimientos en masa, lo cual conllevaría a una desestabilización del terreno y por tanto a problemas de erosión y sedimentación (Morgan, 1997).

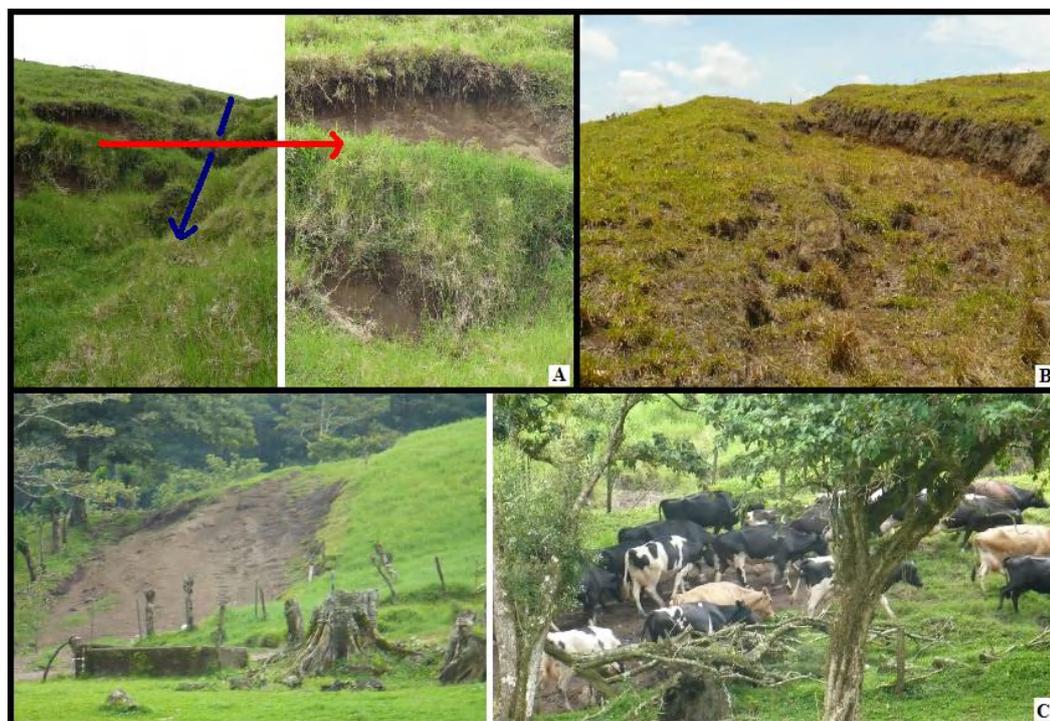


Figura 4.2 Leves evidencias de erosión en las fincas ubicadas en la microcuenca media-alta.

A) Cursos de agua estacional. B) Caminos internos en la finca. C) Pasos permanentes de ganado. Fuente. El autor.

En la Figura 4.2 A, se observa un curso de agua estacional, el cual a pesar de tener una cobertura vegetal aceptable, y debido a la cantidad de agua que escurre por ahí cuando llueve (señalado con la flecha azul) y al paso de ganado, se han dado movimientos en masa pequeños que con el paso del tiempo, si no es tratado este punto, puede convertirse en una cárcava de gran dimensión.

En general, los caminos dentro de la finca presentan una cobertura vegetal del cero por ciento y a su vez, los taludes formados no cuentan con protección alguna, lo cual propicia la pérdida de suelo. En el caso de la Figura 4.2 B, este camino presenta un claro síntoma

de erosión pues se nota el corte del nivel original del terreno y a pesar que el camino tiene una cobertura de pasto, ésta es escasa para mitigar procesos erosivos, debido a que no hay control del agua de escorrentía, el mismo funciona como canal de escurrimiento, el talud no presenta protección, entre otros.

En toda finca ganadera hay pasos de ganado permanentes, como se ejemplifica en la Figura 4.2 C. El paso constante del ganado por un mismo punto genera compactación del terreno además propicia la erosión al no haber cobertura vegetal, lo cual facilita el proceso de desprendimiento de partículas de suelo, incrementa la escorrentía por ese punto al tener poca infiltración el terreno, entre otros.

La resistencia que presenta el terreno a la punta del penetrómetro refleja la compactación del terreno. En el caso de pastos la resistencia es poca en la superficie ronda los 66 N/cm^2 y conforme se profundiza más en el terreno se incrementa la compactación gradualmente al punto que a partir de 30cm hasta un metro de profundidad la resistencia no varía más y se queda en 150 N/cm^2 .

4.2 Parcelas experimentales ubicadas en bosque

En general, para toda la microcuenca del río Santa Rosa, los bosques presentes son primarios y secundarios, todos en propiedad privada, ya sea en terrenos municipales, fincas privadas o propiedades del ICE. En la zona no existe área alguna de protección estatal (Aguirre, J et al; 2007).

Los bosques en la microcuenca media-alta están bajo la zona de vida general de bosque húmedo: premontano, tropical transición a premontano, muy húmedo premontano y muy húmedo premontano transición a pluvial. Las características de este tipo de bosque es un follaje siempre verde a lo largo de todo el año con una alta densidad de cobertura foliar, así como una capa de humus (materia orgánica) sobre el suelo, como se muestra en la Figura 4.3.



Figura 4.3 Estado general de los bosques en la microcuenca media-alta. Fuente. El autor.

Los parches boscosos por lo general se ubican sobre las márgenes de quebradas y ríos, partes altas de lomas que funcionan como cortinas cortavientos y en la finca municipal, con un área aproximada de 30ha, ubicada en Cerro Chiripa, que protege las nacientes del río Santa Rosa. El suelo, en todas estas zonas, está dedicado a actividades ganaderas de leche en su mayoría, con el riesgo permanente de la disminución del bosque por la presión que ejerce la frontera agrícola sobre estos (Figura 4.4).

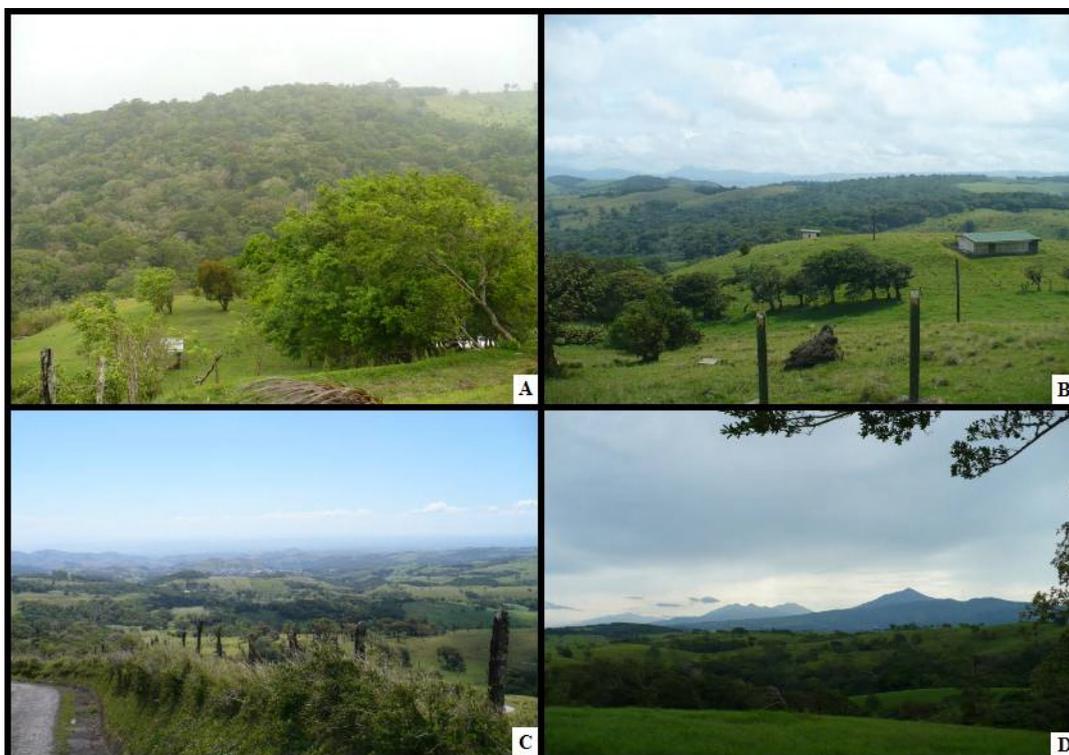


Figura 4.4 A) Bosque en finca privada. B) Bosque en cerro Chiripa. C) Se observa los pequeños parches de bosque ubicados en las márgenes de quebradas y ríos. D) Pequeñas filas de bosque en las lomas con función como cortina cortavientos. En todas las imágenes se observa el tipo de uso de pasto, en su mayoría utilizado para ganadería de leche. Fuente. El autor.

Tabla 4.2 Características de las parcelas experimentales ubicadas en bosque.

Uso	Pendiente	Propietario	Parcela	Área (m ²)
Bosque	0-15	Municipalidad de Tilarán	FM 0-15-1	1 667,53
		Municipalidad de Tilarán	FM 0-15-2	5 214,84
		Jesús Murillo	P 0-15 JM	8 959,43
	15-30	Municipalidad de Tilarán	FM 15-30-1	5 377,32
		Municipalidad de Tilarán	FM 15-30-2	4 571,90
		Municipalidad de Tilarán	FM 15-30-3	2 857,88
	30-45	Municipalidad de Tilarán	FM 30-45-1	1 920,04
		Jesús Murillo	FM 30-45-2	1 275,95
		Municipalidad de Tilarán	P 30-45 JM	2 235,83

La resistencia del suelo en el tipo de uso de bosque es menor que la dada en la tipo de uso de pasto. Mayor materia orgánica, sistemas radiculares profundos, inexistencia de mecanismos de compactación por carga animal o vehículos como los dados en fincas ganaderas crean esa diferencia en compactación. En bosque a 25cm de profundidad se lee una resistencia de 40 N/cm^2 y aumenta a 120 N/cm^2 a una profundidad de 40cm. De ahí hasta un metro las lecturas del penetrómetro no varían más.

4.3 Taludes de camino

Se observa que los taludes de caminos, tanto internos de las fincas como en las rutas nacionales, están en suelo desnudo e inestable, y a lo largo de ellos se presentan desmontes y terraplenes de laderas que no cuentan con un ángulo superior al de reposo del terreno que queda, de esta forma, sometido a riesgos de deslizamiento. A partir de éstas observaciones y la gira de reconocimiento de la microcuenca del río Santa Rosa en marzo de 2009 se incluye dentro del estudio evaluar el potencial erosivo de los taludes como principales productores de sedimentos. Se trata de áreas sin cobertura vegetal alguna y que por lo general son de aporte directo de sedimentos debido a la facilidad que el terreno le brinda por la presencia de canales o cunetas de los caminos hacia las quebradas o ríos.

La microcuenca es cruzada por las carreteras nacionales Ruta N° 142, que comunica a Cañas con Tilarán y prosigue hacia La Fortuna, la Ruta N° 145 entre Quebrada Grande y Tilarán, y las Rutas N° 926 y 925, que comunican Tilarán con El Silencio y Tilarán con Líbano respectivamente. Se instalaron 11 parcelas ubicadas en deslizamientos de caminos a lo largo de la microcuenca. En la Tabla 4.3 se indica la fecha en que fueron instaladas, el área de la parcela, el área total afectada en ese punto y la pendiente media del terreno. La Figura 4.5 muestra la localización de los taludes en la microcuenca.

Tabla 4.3 Parcelas ubicadas en taludes de camino.

Deslizamiento	Fecha de instalación	Carretera (N° de ruta)	Área de estudio (m²)	Área de talud afectada (m²)	Pendiente media del talud (%)
D-01	17 junio 2009	926 Silencio-Tilarán	81,02	929,88	60
D-02	17 junio 2009		50,29	616,67	75
D-03	17 junio 2009		22,55	22,55	82
D-04	17 junio 2009		9,09	154,89	27
D-05	17 junio 2009		23,53	23,53	30
C-T 01	31 julio 2009	142 Cañas-Tilarán	89,79	534,73	39
C-T 03	31 julio 2009		51,48	51,48	29
C-T 06	16 julio 2009		36,53	53,54	27
T-T 03	19 junio 2009	142 Tilarán-Tronadora	18,10	476,75	51
D-07	17 junio 2009	145 Queb. Gde.-Tilarán	14,70	209,26	57
T-L 01	31 julio 2009	925 Líbano-Tilarán	79,15	79,15	90

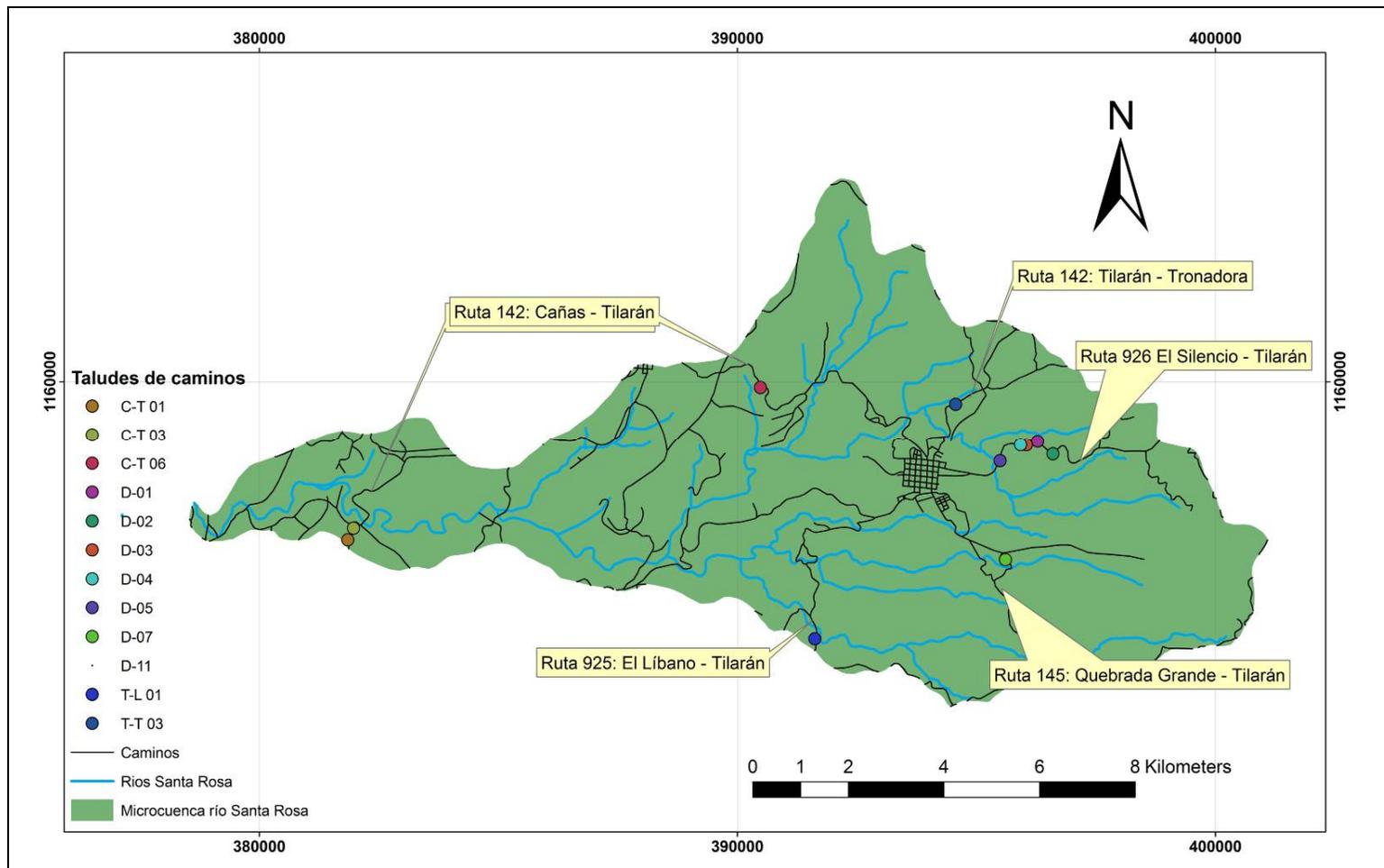


Figura 4.5 Localización de los taludes en la microcuenca del río Santa Rosa. Fuente. El autor.

4.3.1 Ruta N° 926: El Silencio-Tilarán

Esta ruta está clasificada por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) como red vial terciaria y comunica a Tilarán con los siguientes pueblos: El Silencio, Río Chiquito y Nueva Tronadora. En su totalidad este camino está ripiado y no tiene cunetas revestidas en concreto, si no que se han construido canales artificiales a la orilla del mismo y cuenta con alcantarillas para evacuar aguas.

Los cortes realizados al terreno para trazar este camino, en muchos casos no tienen el ángulo de reposo adecuado, por lo cual ante eventos de precipitación, la susceptibilidad de los mismos a erosionarse es muy alta. También sufren de procesos erosivos por la acción del viento, pues en esa zona la intensidad del mismo es alta en ciertas épocas. Además, los canales artificiales hechos a la orilla del camino se han ido lavando de forma tal que se han formado secciones con profundidades hasta de un metro, como se muestra en la Figura 4.6, en donde se ve el canal totalmente saturado por material desprendido de los taludes en el camino. En igual condición de saturación se encuentran las alcantarillas de ese tramo del camino.



Figura 4.6 Ejemplo del estado de la Ruta N° 926: El Silencio-Tilarán. Deslizamientos de aporte directo a Quebrada Chanchos y río Santa Rosa. Fuente. El autor.

4.3.2 Ruta N° 142: Cañas-Tilarán-La Fortuna

a.- Cañas-Tilarán

Esta ruta está clasificada por el MOPT como red vial secundaria y comunica a Cañas con Tilarán, pasando por lugares como cerro El Chopo, Los Ángeles, entrada a Tejona, entre otros. La carretera cruza y drena sus aguas al río Santa Rosa en dos puntos, uno cercano al kilómetro cinco y otro llegando a Tilarán, por el Hogar de ancianos de la localidad. Además la Quebrada Azul (cerca del CP Arenal) es afluente del río Santa Rosa y recibe las aguas de un tramo de la carretera. La ruta está totalmente asfaltada y cuenca con cunetas revestidas en concreto. Tiene alcantarillas para evacuar las aguas, las cuales en algunos ca-

sos se encuentran totalmente saturadas por basura y sedimentos. Además las aguas son vertidas, en muchos casos, sin obras de disipación de energía lo que ha causado la formación de canales y cárcavas en los puntos de vertido.

La Figura 4.7 muestra el estado de unos puntos del tramo entre Cañas y Tilarán, se observa taludes desprotegidos, cunetas que reciben rápidamente el material erosionado y lo drena a alcantarillas, ríos y quebradas. En algunos casos, como el mostrado en las imágenes las alcantarillas se muestran saturadas, evidente síntoma del movimiento de material. En este tramo se han identificado siete puntos con síntomas como los mostrados de los cuales en tres se instalaron parcelas experimentales para conocer el comportamiento durante el periodo lluvioso.

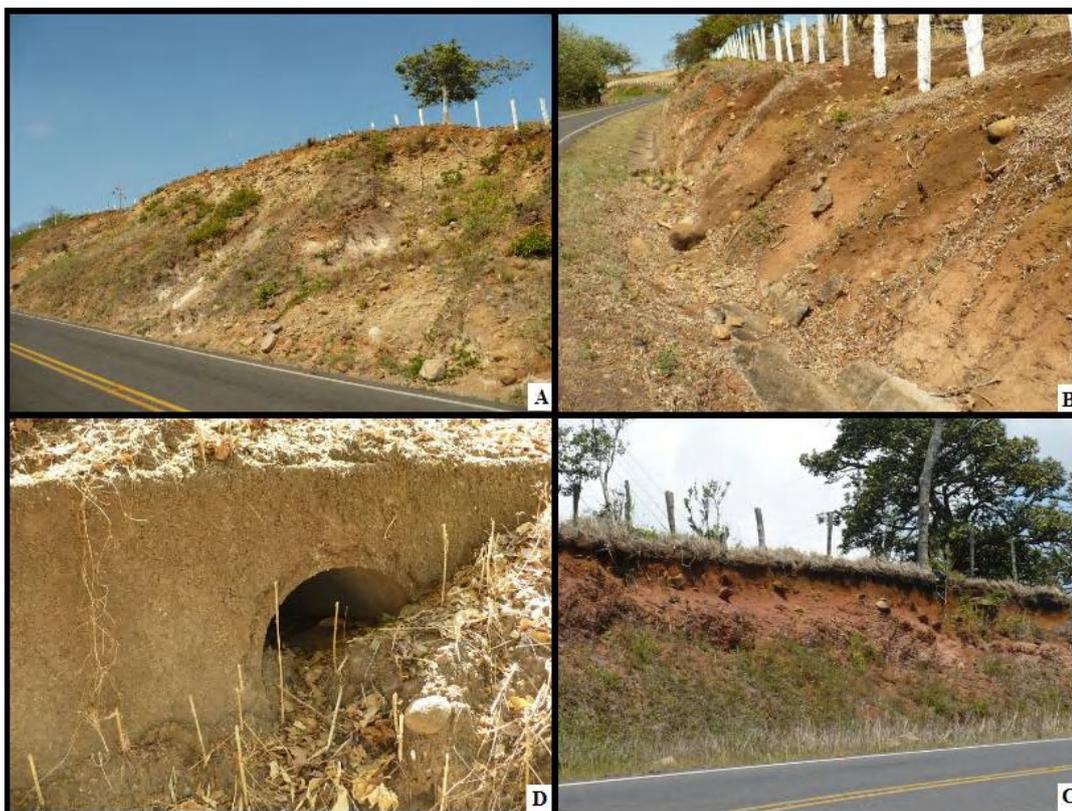


Figura 4.7 Ejemplo del estado de la Ruta N° 142 en el tramo Cañas-Tilarán. Fuente. El autor.

b.- Tilarán-La Fortuna

Este tramo de la Ruta N° 142 es la continuación de la carretera que viene desde Cañas, sale de la microcuenca antes de llegar al cruce de la entrada hacia Tronadora. Al igual que en el tramo Cañas-Tilarán, este sector está totalmente pavimentado y cuenta con cunetas revestidas en concreto y presenta los mismos problemas como se ve en la Figura 4.8: taludes desprotegidos con ángulos mayores al de reposo, taludes inestables, cunetas que sufren de socavación o saturación de sedimentos, alcantarillas bloqueadas, todos síntomas claros de pérdida de suelo por el estado crítico de los taludes. Las aguas que precipitan en este tramo de carretera drenan al río Santa Rosa, en el sector de Tilarán centro.

Se han identificado tres puntos críticos en este sector, del cual solo se instala la parcela T-T 03 para ver cómo se comporta éste durante el periodo lluvioso.



Figura 4.8 Ejemplo del estado de la Ruta N° 142 en el tramo Tilarán-La Fortuna. Fuente. El autor.

4.3.3 Ruta N° 145: Quebrada Grande-Tilarán

Como red vial secundaria, según la clasificación del MOPT, esta ruta al igual que la 142 está pavimentada y en la mayoría del tramo cuenta con cunetas y alcantarillas para el dren de las aguas de escorrentía producto de las precipitaciones. Presenta similares problemas que los mencionados anteriormente para las rutas N° 142 y 926. En total se ubican 10 taludes similares al punto de estudio que se establece en esta carretera llamado D-07. Hay una zona crítica de importancia cercano al puente sobre Quebrada Grande, donde se presentan taludes de gran dimensión que presentan ángulos de reposo mayores al debido y por ende son altamente susceptibles a eventos de precipitación aportando gran cantidad de sedimentos, con una pronta respuesta de llegada al cuerpo de agua por su proximidad.

Esta ruta, hasta la localidad de Quebrada Grande, cruce varias quebradas, subafluentes y afluentes del río Santa Rosa, como lo son Quebrada Cabra, Quebrada Lombardía, Quebrada Qesera y Quebrada Grande. La Figura 4.9 muestra algunos ejemplos de taludes en esta ruta.



Figura 4.9 Ejemplo del estado de la Ruta N° 145 Quebrada Grande-Tilarán. Fuente. El autor.

4.3.4 Ruta N° 925: Líbano-Tilarán

Esta ruta es terciaria y comunica a Tilarán con el poblado del Líbano. La superficie de rodamiento, al igual que la ruta N° 926, es de ripio, pero para el periodo de estudio se encontraba en construcción para asfaltarla.

Los trabajos de construcción realizados en la ruta hasta el Líbano originaron nuevos cortes en los taludes de las propiedades colindantes al camino debido al nuevo ancho de la calle. Estos cortes tienen ángulos mayores al de reposo y son susceptibles a movimientos en masa ante eventos de precipitación, con el agravante que el tipo de uso de suelo sobre ellos es de pasto, lo cual no amarra el terreno a gran profundidad. Además, las nuevas alcantarillas colocadas no cuentan con estructuras disipadoras de energía que reduzca la energía de la escorrentía en los puntos de drenaje, lo cual ha originado canales en las fincas que se encuentran aguas abajo. Debido a los trabajos en carretera, solo fue posible ubicar un talud, el T-L 01. La Figura 4.10 muestra ciertos puntos críticos en la zona.



Figura 4.10 Ejemplo del estado de la Ruta N° 925 Líbano-Tilarán. Fuente. El autor.

CAPÍTULO 5: Resultados y análisis

5.1 Pastos

Como se indicó en la caracterización del uso de suelo de pastos de la microcuenca media-alta anteriormente, las condiciones que muestran las fincas en general son excelentes en cuanto a cobertura del suelo.

Las estaciones pluviográficas utilizadas para el análisis de todas las parcelas fueron Nueva Tronadora, Quesera y Chiripa. Todas muestran una correlación de $R^2 > 0,94$, de la relación entre la precipitación de la lluvia y la energía generada por esta, lo cual indica que se puede utilizar los datos de energía de la lluvia para demostrar la influencia de ésta en los fenómenos erosivos.

En las parcelas de 0%-15% de pendiente (P 0-15JJ, P 0-15 JJ2 y PQueseraII) no se produjo erosión alguna o por lo menos perceptible al punto de la geomembrana en todo el período de prueba, esto a pesar que la estación de Nueva Tronadora y Quesera mostraran eventos de precipitación con magnitudes de energía mayores a $100 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ (ver el Apéndice B).

Las parcelas de 15%-30% muestran un comportamiento similar en la producción de erosión. Al final del periodo de prueba los kilogramos sedimentados en la geomembrana fueron 2,97 kg, 1,37 kg y 1,36 kg, en las parcelas P 15-30 JJ, PM 1-30 y S-15-30 SP, respectivamente. Esto indica que los procesos erosivos son imperceptibles y la sedimentación al punto de convergencia de la parcela es casi nula, obteniéndose una tasa erosiva de 0,00 ton/ha (utilizando tres decimales, 0,004 ton/ha). Esta tasa erosiva se considera de erosión baja según el criterio de la FAO. Utilizando esta tasa y para una extensión de 1 137,67ha con tipo de uso de suelo de pasto y pendientes de 15%-30% para la microcuenca media-alta, las toneladas durante el periodo de estudio producidas son 5,03ton.

Las parcelas de 30%-45% muestran la misma tendencia que las parcelas ubicadas en los otros dos tipos de rangos ubicadas en pasto. La erosión cuantificada en las mismas durante el periodo de prueba fueron 0,00kg, 0,88kg y 0,68kg, parcelas P 30-45 JJ, M 3-45 y M 4 30-45, respectivamente. La tasa erosiva promedio es de 0,00 ton/ha (con tres decima-

les, 0,003 ton/ha), por lo que para un área de 270,25ha se obtiene un total de 0,90ton para el periodo de estudio en la microcuenca media-alta.

Un resultado indirecto que se obtuvo por un error en la instalación de la geomembrana en cuatro de las parcelas experimentales ubicadas en pasto (P 0-15 JJ, P 0-15 JJ2, PM 1-30 y P 30-45 JJ) demuestra la importancia de seguir con el manejo adecuado de las fincas con estos tipos de pastos por la efectividad de los mismos como reductores de los procesos erosivos.

A la hora de la instalación de esas cuatro parcelas, se dejó una franja de 20cm de suelo desprotegido entre el pasto y la geomembrana, como se muestra en la Figura 5.1 A. La Tabla 5.1 muestra los resultados mostrados por esas parcelas mientras se mantuvo esa área expuesta de suelo desprotegido. Luego de la recolección se corrigió el error dejando el geotextil como se debe (Figura 5.1 B).



Figura 5.1 Ejemplo de parcela mal instalada, caso P 0-15 JJ. Fuente. El autor.

Tabla 5.1 Resultados obtenidos en las parcelas con suelo desprotegido.

Parcela Nombre	Fecha de instalación	Fecha de recolección	Suelo seco (kg)	CH (%)	Energía acumulada (kg·m/m ²)	Área parcela (m ²)	Tasa erosiva (ton/ha)
P 0-15 JJ	17-Jun	31-Jul	8.85	24,34	770.18	1667.53	0.05
P 0-15 JJ2	17-Jun	06-Ago	3.67	34.49	849,67	5214.84	0.01
PM 1-30	18-Jun	30-Jul	4.18	37.09	1336.69	4571.9	0.01
P 30-45 JJ	16-Jun	05-Ago	12.07	44.51	849.67	1920.04	0.06

Como se aprecia en la Tabla 5.1, en ese corto periodo en que se mantuvo el suelo desprotegido, se encontraron tasas erosivas entre 0,01 ton/ha y 0,06 ton/ha. Excluyendo el error producido en la instalación de las geomembranas en las parcelas, la producción total de sedimentos es de 5,93ton, con una tasa erosiva promedio de 0,00 ton/ha (Tabla 5.2).

Tabla 5.2 Tasas erosivas y total de suelo erosionado en pasto de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa.

Cobertura	Microcuenca media-alta			
	Pendiente (%)	Promedio (ton/ha)	Área total (ha)	Sedimento producido (ton)
	0-15	0,00	1484,71	0,00
Pasto	15-30	0,00	1137,67	5,03
	30-45	0,00	270,25	0,90
	TOTAL	---	2892,63	5,93

Un ejemplo del excelente comportamiento de los pastos como cobertura protectora del suelo ante eventos de precipitación, donde impide que la energía de la lluvia desprenda partículas de suelo se muestra a continuación. La Figura 5.2, está compuesta por imágenes tomadas durante la tormenta del 10 de setiembre (con una energía de 56,65 kg·m/m², estación pluviográfica Chiripa), en una zona cercana al cerro Chiripa.

La imagen A de la Figura 5.2 se ubica en la parte alta antes de uno de los caminos internos de la finca. En ella se observa un caudal considerable de escorrentía, el cual baja

prácticamente con cero sedimentos, pues el agua se observa clara, transparente. Al pasar este flujo sobre el camino interno que tiene poca cobertura de pasto, el caudal empieza a desprender y transportar suelo, como se observa en la Figura 5.2 B. Siguiendo el curso de este flujo, luego de pasar por el camino interno, entra a una zona donde se está reconstruyendo un abrevadero, punto en donde debido a los trabajos propios de la construcción y la acción del pisoteo del ganado, la susceptibilidad del suelo a ser arrastrado es alta, como se observa en la Figura 5.2 C y 5.2 D. Por último, el flujo vuelve a una zona con cobertura de pasto del 100%, el cual funciona como un “buffer” antes de llegar a una zona boscosa en la ribera del arroyo que está al final de la pendiente. Esta zona de amortiguamiento ayuda en gran medida a retener y mitigar los procesos erosivos y disminuir la sedimentación en los cuerpos de agua.

En la Figura 5.2 también se evidencia uno de los efectos negativos del pasto el cual es la poca infiltración que tiene debido a la compactación de sus suelos lo cual genera escorrentía y en casos de eventos extremos, avenidas máximas instantáneas rápidas en los cuerpos de agua.

Como se ve los procesos de erosión se dan de forma mínima en este tipo de uso de suelo, y a mayor escala en puntos específicos desprotegidos como el antes mencionado. Sin embargo, con las condiciones excelentes que presenta este tipo de uso de suelo en la microcuenca media-alta, estos fenómenos se ven amortiguados en gran parte.

En el Anexo D se puede ver con detalle el análisis de la influencia de la energía de la lluvia sobre el material erosionado realizado para las parcelas ubicadas en tipo de uso de suelo de pasto de la microcuenca media-alta.



Figura 5.2 Comportamiento general del uso de suelo de pasto en la microcuenca media-alta.

Fuente. El autor.

5.2 Bosque

Las parcelas de bosque dentro del rango de pendiente de 0% -15% se distribuyen de la siguiente manera: dos en la finca Municipal de Tilarán (FM 0-15-1 y FM 0-15-2) de uso exclusivo de bosque, y una en la finca de don Jesús Murillo (P 0-15 JM), un parche boscoso dentro de la misma finca con dedicación ganadera, el cual funciona como cortavientos y refugio para el ganado.

La parcela FM 0-15-1 presenta una buena cobertura vegetal (sotobosque) de árboles pequeños en desarrollo y del dosel del bosque establecido. Hay presencia de materia orgánica en descomposición en la superficie del terreno que lo cubre en un 20%. La textura del

suelo es Limo-arenoso. En total se recolectó 4,11kg de suelo seco. El contenido de humedad promedio del suelo recolectado es de 55,40%. Para el área de prueba de 1 438,52m² se tiene una pérdida de suelo de 0,03 ton/ha, donde la erosión por salpicadura fue la que ocasionó la mayoría del sedimento, proceso facilitado por la textura del terreno, la cual presenta poca cohesividad y son de fácil desprendimiento.

La parcela FM 0-15-2 presenta condiciones similares de cobertura vegetal, materia orgánica en descomposición y textura del suelo que la parcela FM 0-15-1. En total se recolectó 3,57kg de suelo seco. El contenido de humedad promedio es de 62,07%, y se produce 0,03 ton/ha en un área de estudio de 1 267,57m². La erosión por salpicadura tuvo influencia en el material que se recolectó, no como único proceso pues hubo durante un corto periodo manifestación de escorrentía mínima en la geomembrana.

La parcela P 0-15 JM tiene como la particularidad que es la transición del pasto al bosque hay una zona en la cual el ganado se refugia, por lo tanto el suelo en ese punto tiene una capa muy suelta en sus primeros centímetros de profundidad, la cual es de fácil transporte ante agentes como el agua. Además se presentó el problema de no poder limitar en su totalidad la parcela, la cual recibía escorrentía de la zona de pasto, permitiendo el arrastre de partículas cuando el caudal pasaba por la zona de refugio antes descrita. Esta condición hizo que se recolectara 11,01kg de suelo seco. El contenido de humedad promedio es de 61,96%. Para un área de estudio de 811,92m² se tiene una producción total de 0,14 ton/ha. Esto a pesar que esta parcela se encuentra en similares condiciones de cobertura del dosel de los árboles, árboles pequeños en crecimiento y cobertura de materia orgánica a las FM 0-15-1 y FM 0-15-2. La textura del suelo es Limosa. El fenómeno de erosión predominante fue de escorrentía.

Las tres parcelas de estudio, como se dijo, presentan condiciones similares de cobertura vegetal y materia orgánica en descomposición, pero solo la FM 0-15-1 y FM 0-15-2 se comportaron igual en cuanto a producción de sedimentos, ambas con un valor 0,03 ton/ha. La parcela P 0-15 JM se comportó distinta por la zona de transición entre el pasto y el bosque en donde siempre hubo material susceptible a ser arrastrada debido al pisoteo del ganado.

La producción total neta de suelo en el tipo de uso de bosque y pendiente de 0%-15% es de 18,69kg. En promedio las tres parcelas producen 0,06 ton/ha. La producción total de sedimentos en el área de tipo de uso de bosque con pendiente de 0%-15% es de 38,22ton.

Las parcelas ubicadas en pendiente de 15%-30% se localizan en la finca municipal de Tilarán y están dentro del tipo de uso exclusivo de bosque. La parcela FM 15-30-1 presenta alta cobertura del terreno por materia orgánica en descomposición (cubre el terreno en un 80%) y un sotobosque desarrollado así como el dosel del bosque establecido en ese lugar. El fenómeno de erosión dado en esta parcela es de salpicadura, ayudado por la textura limosa del suelo que permite desprenderse con mayor facilidad. No se vio evidencia de escorrentía en la geomembrana ni en puntos cercanos a ella. En total se recolectó 4,23kg de suelo seco. El contenido de humedad es de 50,79%. Para el área de prueba de 227,79m² se tiene una pérdida de suelo de 0,02 ton/ha.

La parcela FM 15-30-2 presenta pobre condición de cobertura de materia orgánica, alrededor de un 20% del suelo está cubierto por hojas en descomposición. La textura del suelo es Limo-arenoso. El proceso de erosión dado fue de salpicadura. La cobertura vegetal sobre el terreno es muy pobre pues no hay presencia de arbustos pequeños (sotobosque) que le brinden protección, siendo la única la dada por el dosel de los árboles ya establecidos en la zona. En total se recolectó 14,07kg de suelo seco. El contenido de humedad promedio es de 53,77%. En total se produce 0,01 ton/ha en un área de estudio de 1 628,40m².

La parcela FM 15-30-3 tiene condiciones similares de cobertura vegetal y materia orgánica en descomposición que la parcela FM 15-30-2. Además en su parte alta hay un hormiguero de gran dimensión. En la parcela se identifica un pequeño cauce estacional que converge en el geotextil, siendo la erosión laminar el proceso predominante, lo que provoca que en cuatro semanas de recolección seguidas el material erosionado fuese difícil recoger pues aún no estaba totalmente sedimentado. La textura del suelo es Limo-arenoso. Esta condición hizo que se recolectara 11,36kg de suelo seco. El contenido de humedad promedio es de 62,09%. Para un área de estudio de 613,62m² se tiene una producción total de 0,02 ton/ha.

La parcela FM 15-30-1 tiene buenas condiciones de cobertura sobre el terreno y sólo presentó erosión por salpicadura, con lo cual produce 4,23kg, que es la menor producción por peso de suelo seco por parcela, pues las parcelas FM 0-15-2 y FM 15-30-3 contabilizaron 14,07kg y 11,36kg de suelo seco, las cuales si tenían menos cobertura de materia orgánica sobre el terreno. Aún así, debido a la extensión de las áreas de influencia de cada parcela, la de mayor producción de toneladas por hectáreas son las FM 15-30-1 y FM 15-30-3, ambas con 0,02 ton/ha.

La producción total neta de suelo en el tipo de uso de bosque y pendiente de 15%-30% es de 29,66kg. En promedio las tres parcelas producen 0,15 ton/ha. El sedimento total recolectado en el área de tipo de uso de bosque con pendiente de 0%-15% es de 69,86 ton.

Las parcelas de bosque en pendiente de 30%-45% se distribuyen de la siguiente manera: dos en la finca Municipal de Tilarán en el cerro Chiripa (FM 30-45-1 y FM 30-45-2), dentro del uso exclusivo de bosque, y una en la finca de don Jesús Murillo (P 30-45 JM), el cual es un parche boscoso dentro de una finca ganadera que funciona como refugio para el ganado.

La parcela FM 30-45-1 tiene condiciones muy similares a la parcela FM 15-30-3 en cuanto a cobertura vegetal y materia orgánica sobre el terreno. De hecho esta parcela se ubica pendiente abajo de la parcela FM 15-30-3 y por ella continúa el cauce estacional, por lo que la erosión laminar es la predominante, facilitado por la textura limosa que presenta el suelo. En total se recolectó 7,23kg de suelo seco. El contenido de humedad promedio del suelo recolectado es de 77,66%. Para el área de prueba de 525,62m² se tiene una pérdida de suelo de 0,01 ton/ha.

La parcela FM 30-45-2 presenta buena cobertura vegetal y de materia orgánica en la superficie del suelo. La textura del suelo es Limo-arenoso. El fenómeno de erosión por salpicadura fue el que dominó los procesos erosivos dados durante el periodo de prueba. En total se recolectó 27,22kg de suelo seco. El contenido de humedad promedio es de 55,04%. En total se produce 0,20 ton/ha en un área de estudio de 1 376,01m². Esta parcela se caracterizó por su gran extensión y longitud de geomembrana.

La parcela P 30-45 JM, al igual que la parcela P 0-15 JM, es un parche boscoso dentro de una finca ganadera, que diferencia de la anterior en que no hay una zona de transición afectada entre el pasto y el bosque como si lo hay en la P 0-15 JM. Presenta buena cobertura del terreno con pequeños arbustos y árboles establecidos. El principal proceso de erosión es de salpicadura. En ella se recolectó 21,40kg de suelo seco, los cuales para una extensión de área de estudio de 443,54m² producen una pérdida de suelo de 0,48 ton/ha. El contenido de humedad promedio es de 38,37%.

Las parcelas P 30-45 JM y FM 30-45-2 son las que presentan mejor cobertura sobre el terreno de prueba. Sin embargo son los que más producen pérdida de suelo seco neto, 36,00kg y 61,45kg respectivamente. La producción total neta de suelo en el tipo de uso de bosque y pendiente de 30%-45% es de 55,85kg. En promedio las tres parcelas producen 0,27 ton/ha. Los sedimentos recolectados en el área de tipo de uso de bosque con pendiente de 30%-45% es de 39,03ton. La parcela con mayor tasa erosiva es la P 30-45 JM con 0,48ton/ha.

Tabla 5.3 Valores totales encontrados para las parcelas de bosque en la microcuenca media-alta del río Santa Rosa.

Pendiente (%)	Parcela	Area (m ²)	Suelo recolectado (kg)	Erosión (t/ha)	Promedio (ton/ha)	Area total (ha)	Sedimento total (ton)
0-15	FM 0-15-1	1438,52	4,11	0,03	0,06	596,09	38,22
	FM 0-15-2	1267,57	3,57	0,03			
	P 0-15 JM	811,92	11,01	0,14			
15-30	FM15-30-1	227,79	4,23	0,19	0,15	458,40	69,87
	FM 15-30-2	1628,40	14,07	0,09			
	FM 15-30-3	613,62	11,36	0,19			
30-45	FM 30-45-1	525,62	7,23	0,14	0,27	143,18	39,03
	P 30-45 JM	443,54	21,40	0,48			
	FM 30-45-2	1376,01	27,22	0,20			

En resumen, para las parcelas de bosque de la microcuenca media-alta se tiene que la producción de erosión varía según la pendiente de la misma. Queda demostrado que conforme esta aumenta, la cantidad de material erosionado aumenta. Para pendientes de 0%-15% se tiene una producción de 0,06ton/ha, para pendientes de 15%-30% se tiene una pro-

ducción de 0,15 ton/ha y por último se da una producción de 0,27 ton/ha para pendientes entre 30%-45%.



Figura 5.3 A) Parcela con agua producto de escorrentía, donde el tipo de erosión ocurrido fue el laminar. B) Parcela donde el fenómeno de erosión predominante fue de salpicadura, evidencia de esto es el material pegado al geotextil. Fuente. El autor.

Los resultados antes obtenidos están altamente relacionados con el efecto que produce la energía al impactar con el suelo. En general, se presenta un pico de energía al principio del periodo de estudio y varía entre un 20% a 50% de la energía dada en toda la prueba. Además esta primera energía genera una cantidad menor de sedimentos, lo que indica que al principio de los procesos erosivos es necesaria más energía para desprender partículas del suelo. Posterior a esta primera fase, la cantidad de energía y material desprendido varían, característica predominante en los procesos erosivos, por su variabilidad espacial y temporal.

En el Anexo E se puede ver con detalle el análisis de la influencia de la energía de la lluvia sobre el material erosionado realizado para las parcelas ubicadas en tipo de uso de suelo de bosque de la microcuenca media-alta.

5.3 Taludes de camino

Los taludes de camino se ubicaron arbitrariamente en las cuatro rutas nacionales que pasan a través de la microcuenca del río Santa Rosa. Se establecieron solo 11 puntos de estudio con los cuales poder tener una noción de la magnitud de los procesos erosivos dados en estos puntos y además se identificaron todos los puntos susceptibles con igual o peor condición de deslizamiento. A continuación se muestran los principales datos mostrados por parcela. La densidad vial en la microcuenca es de 13,05 m/ha. Mayor profundidad en el análisis de las parcelas la puede ubicar en el Anexo F.

5.3.1 Ruta N° 926: El Silencio-Tilarán

En esta ruta se ubicaron cinco deslizamientos, que son puntos de aporte directo al cauce de la Quebrada Chanchos. El deslizamiento D01 cuenta con un área de estudio de 81,02m² el cual es una pequeña porción del talud total en ese punto el cual cubre un área de 929,88m². Durante todo el periodo de prueba se recolectó un total de 2 096,86kg, con un contenido de humedad del 27,79% y variación estándar de 9,56. Esta variabilidad se debe a las diferentes condiciones climáticas del periodo lluvioso afectado por periodos secos debido al fenómeno del Niño. Por lo tanto se recolectó material debido a erosión por viento e hídrica. El suelo neto perdido es de 1 396,60kg. La tasa erosiva es de 172,39 ton/ha, y una producción total de 16,02ton. Textura: Arcillo-limoso.

Deslizamiento D02 tiene una dimensión de 616,67m² de los cuales solo 50,29m² son evaluados. La cantidad total de suelo recolectado es de 1 300,78kg con un contenido de humedad de 26,28% y desviación estándar de 6,83, elevado por las mismas razones explicadas en la parcela D01. El suelo neto perdido es 949,80kg. La producción total de sedimentos es de 188,86 ton/ha, con una producción total de 11,64ton. Textura: Arcillo-limoso.

Deslizamiento D03 con una extensión de 22,55m². Se recolectó 203,70kg con un contenido de humedad promedio de 26,50% y una desviación estándar de 7,85, igual situación que las parcelas anteriores. La cantidad neta de suelo perdido es de 141,62kg. La tasa erosiva total es de 62,80 ton/ha, dando un total de 0,14 ton. Textura: Limo-arcilloso.

Deslizamiento D04, es el más pequeño en área de todas las parcelas ubicadas en la Ruta N° 926 El Silencio-Tilarán, con una extensión de 9,09m² los cuales son una pequeña porción del total del área de 154,89m². Se recolectó en total 50,99kg con un contenido de humedad promedio de 29,17% y una desviación estándar de 6,61. Esta variabilidad alta se explica por la reducción dada en las precipitaciones debido al fenómeno del Niño, la acción del viento y la lluvia como agente erosivo y el área de la parcela la cual influyó en disminuir la frecuencia de recolección de material. El suelo seco perdido es de 36,63kg. La producción total de sedimento es de 40,29 ton/ha, dando un total de 0,62ton. Textura: Limo-arcilloso.

Deslizamiento D05 con 23,53m² presenta una condición distinta a las demás parcelas. Mientras que las otras presentaban condiciones de cobertura nula, la parcela D05 tenía un pequeño “buffer” al pie del geotextil. Se recolectó 8,86kg, la frecuencia de recolección de sedimentos fue baja, a pesar de estar bajo la misma influencia de precipitación y lluvias que los demás deslizamientos antes vistos. El contenido de humedad es de 16,64% con una desviación estándar de 3,88. El suelo seco perdido total es de 7,36kg. La tasa erosiva es de 3,13 ton/ha, produciéndose un total de 0,01ton. Textura: Areno-arcilloso.

Tabla 5.4 Resultados finales para los taludes de la Ruta N° 926. El Silencio-Tilarán.

	Unidad	D01	D02	D03	D04	D05
Área de parcela	(m ²)	81,02	50,29	22,55	9,09	23,53
Suelo recolectado	(kg)	2096,86	1300,78	203,70	50,99	8,86
Suelo seco	(kg)	1396,60	949,80	141,62	36,63	7,36
CH	(%)	27,79	26,28	26,50	29,17	16,64
Suelo seco	kg/m ²	17,24	18,89	6,28	4,03	0,31
	ton/ha	172,39	188,86	62,80	40,29	3,13
Textura	---	Arcillo-limoso	Arcillo-limoso	Limo-arcilloso	Limo-arcilloso	Areno-arcilloso
	(m ²)	929,88	616,67	22,55	154,89	23,53
Área total del deslizamiento	ha	0,09	0,06	0,00	0,02	0,00
Producción total por talud	(ton)	16,03	11,65	0,40	0,62	0,01

La textura de los suelos en su mayoría presenta material limoso y arenoso, con pocos contenidos de arcilla. Esto debido al proceso continuo de erosión en los taludes los cuales muestran desgaste, con una lógica pérdida de arcilla por lo que la presencia de material li-

moso y arenoso permite la formación de surcos en los taludes, acumulación de material desprendido luego de eventos de precipitación que quedan susceptibles tanto a eventos leves de precipitación y a erosión eólica.



Figura 5.4 Ejemplo del proceso de erosión mostrado en las parcelas de la Ruta N° 926. A, B) Se presenta la formación de surcos y la acumulación de material desprendido durante los eventos de precipitación, los cuales quedan susceptibles. C, D) Durante los periodos secos debido al fenómeno del Niño el material desprendido queda susceptible a la erosión eólica.

Fuente. El autor.

5.3.2 Ruta N° 142: Cañas-Tilarán-La Fortuna

a.- Cañas-Tilarán

En este tramo de carretera se ubicaron tres taludes de caminos para estudio, dos de ellos, C-T 01 y C-T03, son de aporte directo al río Santa Rosa en el sector de la estación del Chopo. El deslizamiento C-T 06 es de aporte directo a la Quebrada Azul, el cual es afluente del río Santa Rosa.

Deslizamiento C-T 01 cuenta con un área de estudio de $89,79\text{m}^2$ el cual es una pequeña porción del talud total que cubre un área de $534,73\text{m}^2$. Durante todo el periodo de prueba se recolectó un total de 658,15kg, los cuales presentaban por la variabilidad de las condiciones climáticas del fenómeno del Niño un contenido de humedad promedio de 22,83% y una desviación estándar de 10,48. El suelo seco perdido es de 459,71kg. La producción total para esta parcela es de 51,20 ton/ha, por lo tanto considerando el área total del talud, se tiene que este punto produce 2,73ton. Textura: Arcillo-arenoso.

Deslizamiento C-T 03 tiene un área total de $51,48\text{m}^2$. El contenido de humedad promedio es de 24,94% con una desviación estándar de 6,63. La cantidad total de suelo recolectado es de 996,70kg y la cantidad neta de suelo es 728,38kg. La producción total de esta parcela es de 141,50 ton/ha, lo cual son 0,72ton perdidas en el periodo de prueba. Textura: Arcillo-arenoso.

Deslizamiento C-T 06, tiene una extensión de $36,53\text{m}^2$ los cuales son una porción del total del área afectada en ese punto de $53,53\text{m}^2$. Se recolectó en total 325,40kg con un contenido de humedad promedio de 27,27% y una desviación estándar de 7,65. El suelo seco total perdido es 223,68kg. La tasa de sedimento es 61,23 ton/ha, dando un total de 0,32ton, para el área total de deslizamiento de $53,54\text{m}^2$. Textura: Arcillo-limoso.

b.- Tilarán-La Fortuna

Deslizamiento T-T 03 se ubica en el tramo de la carretera entre Tilarán y Tronadora, y es un punto de aporte directo al río Santa Rosa, a la altura de Tilarán centro. Cubre un área de $18,10\text{m}^2$ de un total de deslizamiento de $476,75\text{m}^2$. En total se recolectó 181,15kg con

un contenido de humedad de 25,18% y una desviación estándar de 9,74. El suelo seco total perdido es 121,96kg. La producción total de la parcela es de 67,40 ton/ha, dando un total de suelo perdido de 3,21ton. Textura: Limo-arcilloso.

Tabla 5.5 Resultados finales para los taludes de la Ruta N° 142. Cañas-Tilarán-La Fortuna.

	Unidad	C-T 01	C-T 03	C-T 06	T-T 03
Área de parcela	(m ²)	89,79	51,48	36,53	18,10
Suelo recolectado	(kg)	658,15	996,70	325,40	181,15
Suelo seco	(kg)	459,71	728,38	223,68	121,96
CH	(%)	22,83	24,94	27,27	25,18
Suelo seco	kg/m ²	5,12	14,15	6,12	6,74
	ton/ha	51,20	141,50	61,23	67,40
Textura	---	Arcillo-arenoso	Arcillo-arenoso	Arcillo-limoso	Limo-arcilloso
Área total del deslizamiento	(m ²)	534,73	51,48	53,54	476,75
	ha	0,05	0,01	0,01	0,05
Producción total por talud	(ton)	2,74	0,73	0,33	3,21

La textura de los suelos mostrada en las parcelas tiene más cantidad de arcilla que de arena en el caso de los deslizamientos C-T 01 y C-T 03. Sus taludes muestran mucho desgaste lo cual se refleja en la formación de surcos ante los eventos de precipitación. Mismo síntoma presentan los taludes C-T 06 y T-T 03. La formación de estos surcos se debe a la eliminación progresiva de la arcilla debido al desprendimiento y erosión laminar, dejando la estructura del suelo de los taludes irregular, en especial los taludes C-T 01 y C-T 03 donde hay presencia de piedras sueltas.



Figura 5.5 Ejemplo de procesos erosivos en los taludes de la Ruta N° 142. A) Formación de surcos entre el material acumulado desprendido producto de precipitaciones anteriores. B) Formación de pequeñas cárcavas. Fuente. El autor.

5.3.3 Ruta N° 145: Quebrada Grande-Tilarán

En esta ruta solo se instaló una parcela experimental, pero se identificaron a lo largo de ella varios deslizamientos similares al punto de estudio. La parcela D07 es de aporte directo a la Quebrada Lombardía, afluente del río Chiquiro, el cual se une con Quebrada Grande para finalmente dar sus aguas al río Santa Rosa.

Deslizamiento D07 cubre un área de $14,70\text{m}^2$, es una pequeña porción del área total de talud que tiene $209,26\text{m}^2$. En total se recolectó $204,88\text{kg}$ con un contenido de humedad promedio de $21,20\%$ y una desviación estándar de $9,13$. El suelo seco perdido es $154,96\text{kg}$. La recolección total en la parcela D07 es de $105,39\text{ ton/ha}$, y para toda el área del talud se tiene una producción de $2,20\text{ton}$. Textura: Arcillo-limoso.

Presenta una condición de pendiente muy elevada, por lo que el principal fenómeno de erosión es la salpicadura y en surcos (en menor medida), pues la gota al desprender el material este cae directo al geotextil.

5.3.4 Ruta N° 925: Líbano-Tilarán

En esta ruta solo se instaló una parcela, llamada T-L 01 y es de aporte directo a Quebrada Grande. El deslizamiento tiene un área de estudio y total de 79,15m². Durante todo el periodo de prueba se recolectó un total de 134,00kg, con un contenido de humedad promedio de 23,12%. El suelo seco perdido es 104,00kg. La producción total de esta parcela es de 13,14 ton/ha, por lo tanto considerando toda el área del talud, se tiene que este punto produce 0,10ton. Textura: Limo-arenoso.

Tabla 5.6 Resultados finales para los taludes de la Ruta N° 145 (Quebrada Grande-Tilarán) y 925 (Líbano-Tilarán).

	Unidad	D 07	T-L 01
Área de parcela	(m ²)	14,70	79,15
Suelo recolectado	(kg)	204,88	134,00
Suelo seco	(kg)	154,96	104,00
CH	(%)	21,20	23,12
Suelo seco	kg/m ²	10,54	1,31
	ton/ha	105,41	13,14
Textura	---	Arcillo-limoso	Limo-arenoso
Área total del deslizamiento	(m ²)	209,26	79,15
	ha	0,02	0,01
Producción total por talud	(ton)	2,21	0,10



Figura 5.6 Ejemplo de talud D 07 y su proceso erosivo. Fuente. El autor.

En los taludes de caminos es más evidente el efecto de la energía de la lluvia en el suelo que en los tipos de uso de suelo de pastos y bosques. El estado de cero cobertura con el cual se encuentran estas áreas permite tener una alta relación entre la energía dada y el material desprendido. Se puede ver en cada figura del Anexo F como la línea de energía va muy ligada al material sedimentado. Además se nota más los fenómenos espacio-temporales (desprendimiento y traslado de partículas) de la erosión en donde hay casos que se dan eventos de precipitación pero no hay una correspondencia inmediata de material sedimentado, si no hasta que se presente un evento normal y genere el arrastre hacia el geotextil.

En el Anexo F se puede ver con detalle el análisis de la influencia de la energía de la lluvia sobre el material erosionado realizado para las parcelas ubicadas en taludes de camino de la microcuenca del río Santa Rosa.

5.4 Síntesis de resultados

En el caso de pasto, se puede observar la efectividad de este tipo de cobertura para la protección frente a la erosión. Para todas las parcelas estudiadas las tasas de erosión resultaron ser prácticamente cero y solo en el caso de pendiente de 0%-15% fue cero absoluto, pues como se puede observar en la Tabla 5.2, la producción de sedimento es de 0,00 ton para un área de 1 484,71ha.

Para el caso de los otros dos rangos de pendiente, la pequeña tasa erosiva produce 5,03ton y 0,90ton de sedimento para el periodo de prueba, cuando se extrapolan estas tasas a la totalidad del área de la microcuenca media-alta con las respectivas características de combinación de pendiente.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por distintos autores reseñados por Marchamalo (2004) en donde para pruebas de erosión encuentran tasas de 0,00 ton/ha. Por tanto la microcuenca media-alta del río Santa Rosa entra dentro del Factor 1 de erosión: erosión Nula o Imperceptible.

Es importante retomar la Tabla 5.1, pues se ve el efecto que produce tener cero cobertura sobre el terreno, y de ahí la importancia de seguir las prácticas que se dan en estas fincas. En dos semanas que el suelo estuvo sin cobertura se producen tasas erosivas dentro del Factor 1 que generan el desprendimiento de 12,07kg, tomando por ejemplo la parcela P 30-45 JJ, ante una energía de 849,67 kg·m/m².

El tipo de uso de suelo de bosque de la microcuenca media-alta se encuentra dentro del Factor 1 según la clasificación de erosión planteada (erosión Nula o Imperceptible). Se nota una tendencia proporcional en cuanto al aumento de la tasa erosiva con respecto a la pendiente del terreno, como se aprecia en la Figura 5.7. Para toda la microcuenca media-alta en bosque se tiene una producción de 144,54ton de sedimentos, pues si bien las tasas erosivas son nulas, las dimensiones del área de este uso de suelo hace que al extrapolar los datos se obtenga este valor.

Comparando los datos de tasas erosivas, donde la mayor es de 0,27 ton/ha, para el periodo de estudio en pendiente de 30%-45%, con las citadas por Morgan (1997) donde indica que un bosque intervenido produjo una tasa de 0,22 ton/ha, hace ver el buen estado de salud que presentan los bosques de la microcuenca media-alta. Por tanto es importante controlar el estado actual de los bosques en la zona, tomando como medida mejorar la condición del sotobosque para mitigar la erosión por salpicadura, el cual fue el principal fenómeno de erosión que afectó en este caso.

Para los taludes de caminos que atraviesan la microcuenca del río Santa Rosa, la producción total de sedimentos en los puntos evaluados corresponden a situaciones muy particulares de cada talud por lo cual no se pueden extrapolar a los demás taludes identificados en la misma ruta.

Es importante ver que de los 11 puntos evaluados ocho se encuentran en condición de erosión severa (50-200 ton/ha/año), dos en condición moderada (10-50 ton/ha/año) y uno en condición baja (0,50-10 ton/ha/año), según la clasificación usada. La FAO indica, como máximo, que una densidad de red vial de 30-40 m/ha en una cuenca es óptima, lo cual no se cumple para la microcuenca del río Santa Rosa pues esta con 13,05 m/ha presenta muchos puntos con síntomas severos de erosión como los evaluados en este estudio (Figura 5.9).

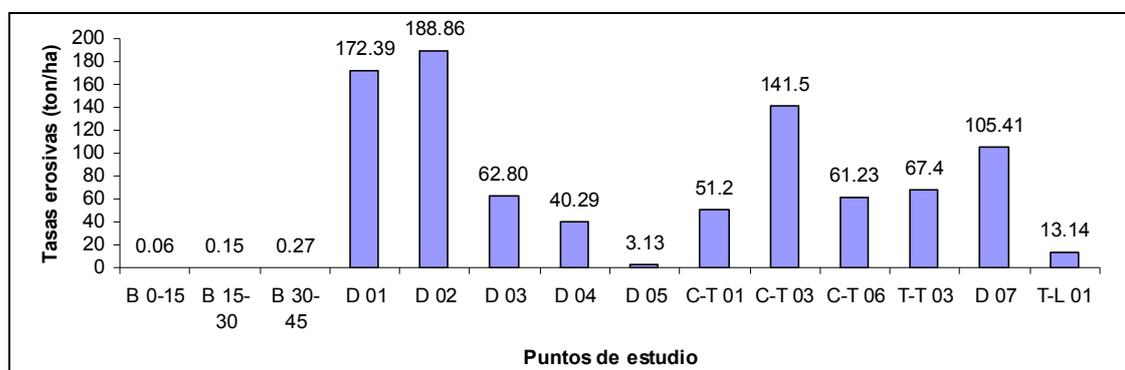


Figura 5.7 Síntesis de resultados. Fuente. El autor.

Nota. B 0-15, B 15-30 y B 30-45 indican las tasas erosivas de bosque para cada rango de pendiente.

Estos puntos son de gran importancia en cuanto a la prioridad que deben tener para ser intervenidos, pues si bien para el periodo de prueba, sumando todas las parcelas, se obtiene un total de 37,77ton (aproximadamente el 25% de lo producido en tipo de uso de bosque de la microcuenca media-alta), éstas son resultado de las áreas reducidas en donde se están produciendo grandes tasas erosivas, las cuales si no llegan a controlarse a tiempo van a seguir en aumento, siendo los taludes, año a año, los mayores focos de producción de sedimentos.

El mapa de vulnerabilidad mostrado en la Figura 5.8 muestra las condiciones de erosión nula de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa en una totalidad del 100%, pues como se indicó anteriormente, tanto el tipo de uso de bosque como de pasto, clasifican dentro del factor 1, según la categorización modificada de la FAO de clasificación de erosión. Además se muestran 30 puntos críticos que representan deslizamientos de importancia en los caminos dentro de la microcuenca del río Santa Rosa.

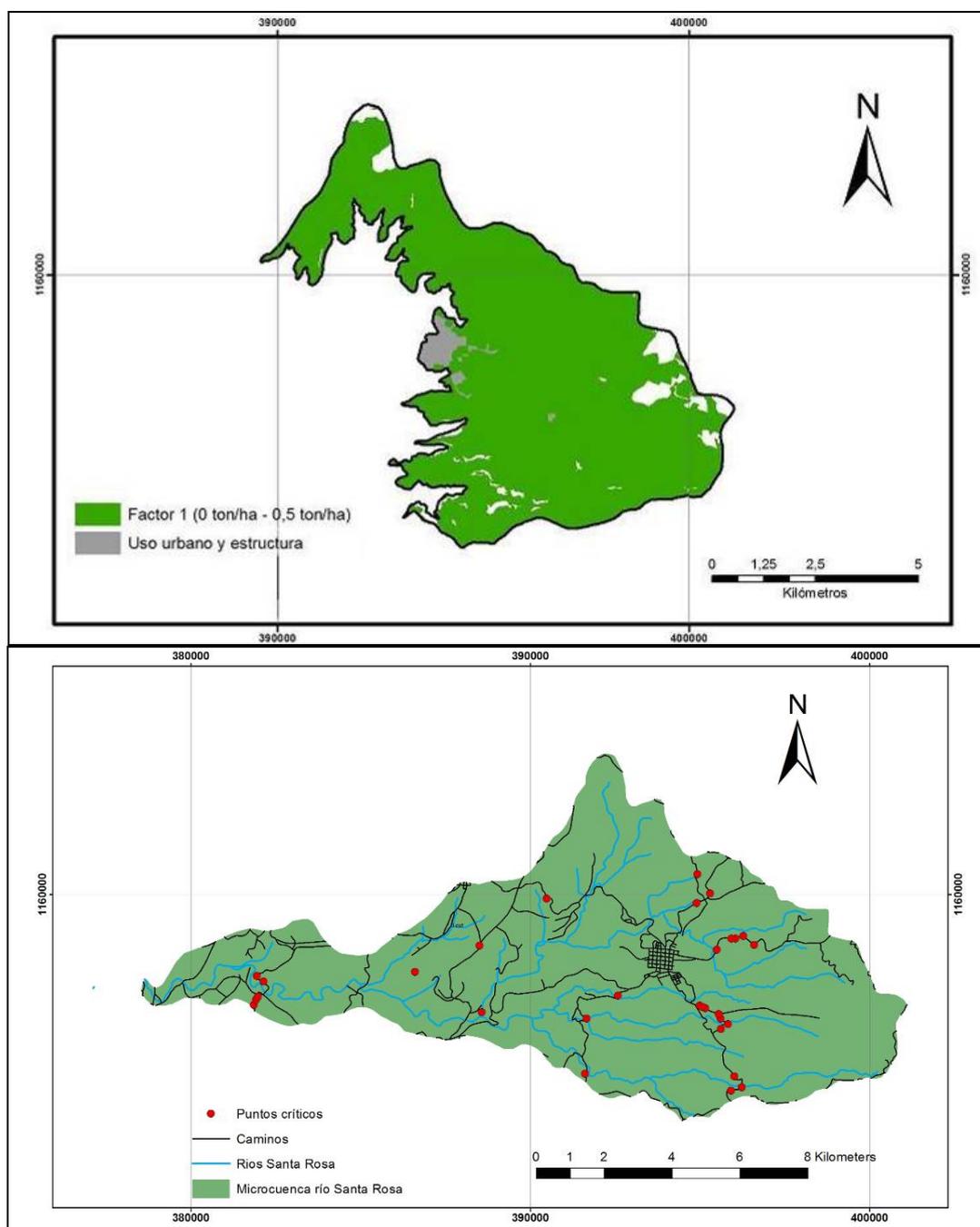


Figura 5.8 Mapa de vulnerabilidad para la microcuenca media-alta del río Santa Rosa y puntos críticos en taludes de caminos en la microcuenca del río Santa Rosa. Fuente. El autor.

Como trabajo complementario para mostrar la situación general de la microcuenca del río Santa Rosa, el Ing. Sisgo Acuña Ch. muestra en su trabajo “Estimación de la producción potencial de erosión y transporte de sedimentos en la microcuenca media-baja del río Santa Rosa, Centro de Generación ArCoSa, Tilarán, Guanacaste”, que la microcuenca media-baja, para tipo de uso de suelo de pasto y bosque y rango de pendientes de 0%-45%, presenta condiciones de erosión nula y baja, factores 1 y 2 respectivamente. (Figura 5.9) debido a los siguientes resultados:

- Los valores encontrados indican erosión baja en todas las áreas de estudio. Para el tipo de uso de suelo de pasto se determinó un potencial erosivo entre 0,01 ton/ha y 0,03 ton/ha, en el bosque se midió una tasa erosiva entre 0,07 ton/ha y 0,72 ton/ha.
- El proceso dominante en el bosque es la erosión por salpicadura por lo que el movimiento del suelo desprendido es muy lento, en contraste con lo que se presenta en pasto, donde se alcanzan altos valores de escorrentía.
- 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 21,39 ton/ha, indicando erosión moderada.

Además se identifica como punto de aporte importante de sedimentos las riberas de los ríos que forman parte de la microcuenca del río Santa Rosa.

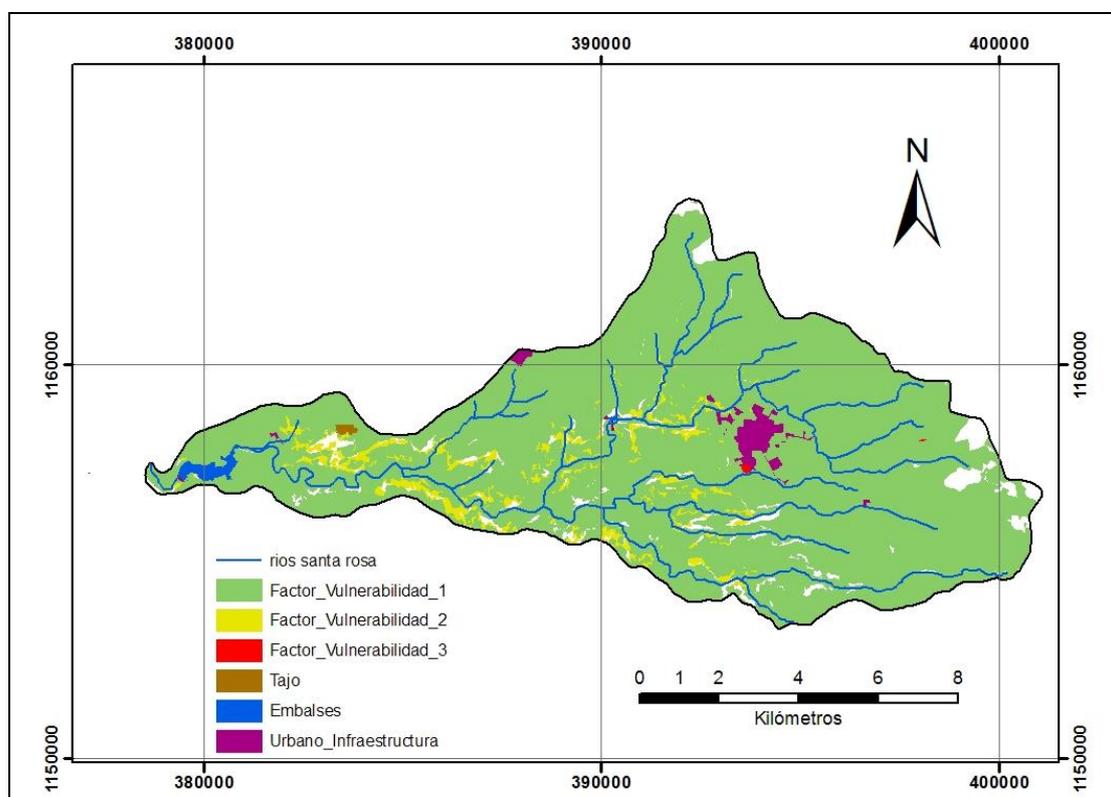


Figura 5.9 Mapa de vulnerabilidad para la microcuenca del río Santa Rosa. Fuente. El autor.

CAPÍTULO 6: Conclusiones

6.1 Conclusiones

Considerando toda la microcuenca del río Santa Rosa, con el aporte hecho por el Ing. Siso Acuña Ch. se tiene:

- Tanto para uso de pasto como cobertura de bosque, la microcuenca media-baja mostró valores de tasa erosiva mayores a los dados en la microcuenca media-alta.
- 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, 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.

Enfocándose en la microcuenca media-alta del río Santa Rosa se tiene lo siguiente.

La microcuenca media-alta del río Santa Rosa se caracteriza por tener una actividad económica ganadera muy marcada, por lo que el 58% de su área está dedicada al tipo de uso de suelo de pasto. El siguiente uso es el de bosque con 25% del área, ubicados principalmente en la parte alta del cerro Chiripa, y pequeños parches boscosos en las fincas ubicados en las riberas de ríos y lomas de las montañas con la función de cortinas cortavientos y refugio para el ganado.

La microcuenca media-alta del río Santa Rosa tiene un 49% de pendientes entre 0%-15%, siendo ésta relativamente plana. Un 38% de su área tiene pendientes entre 15%-30%. El área disminuye conforme aumenta la pendiente, donde las pendientes mayores del 45% representan el 2% y se ubican principalmente a las orillas de los ríos.

La compactación del suelo en pastos es mayor comparada con la obtenida en el tipo de uso de suelo de bosque, 66 N/cm² en la superficie y 150 N/cm² a profundidades mayores

de 30cm. En bosque la compactación a nivel superficial es muy poca, a 25cm es de 40 N/cm² y aumenta a 120 N/cm² de 40cm de profundidad en adelante.

El tipo de uso de pasto de la microcuenca media-alta presenta excelentes condiciones de cobertura pues según las tasas erosivas encontradas, prácticamente 0,00 ton/ha, están dentro del Factor 1 (erosión Nula o Imperceptible), según la clasificación de la FAO.

El efecto del pisoteo del ganado compacta el terreno y genera que los pastos ante eventos de precipitación produzcan gran escorrentía. El escurrimiento de este caudal por cursos de agua estacional puede generar procesos de reptación y establecimientos de cárcavas. Además si escurre por lugares susceptibles como pasos de ganado, caminos internos de la finca, abrevaderos, entre otros, se corre el peligro de promover focos mayores de producción de sedimentos.

Los bosques en la microcuenca media-alta del río Santa Rosa presentan mayor tasa erosiva que los pastos, pero esta sigue siendo Nula o Imperceptible según la clasificación de la FAO.

El fenómeno predominante de erosión dado en bosques es el de salpicadura, seis de las nueve parcelas establecidas la manifiestan. Las otras tres parcelas restantes, por condiciones especiales, presentan erosión laminar como la principal.

La erosión por salpicadura predomina por la poca escorrentía que se produce en bosque debido a la porosidad de sus suelos, demostrado con la poca compactación que presentan los mismos. Los casos especiales donde se manifiesta la escorrentía se debe morfologías del terreno como cursos estacionales de agua.

La densidad vial en la microcuenca del río Santa Rosa es de 13,05 m/ha, y se supone que es adecuada por estar por debajo de la óptima según los parámetros indicados por la FAO. Aún así, el estado de desgaste que presentan la mayoría de los taludes en las redes viales indica que los taludes son los principales focos de producción de sedimentos de la microcuenca del río Santa Rosa. De los 11 puntos evaluados, ocho se encuentran en condición de erosión severa (50-200 ton/ha/año), dos en condición moderada (10-50 ton/ha/año) y uno en condición baja (0,50-10 ton/ha). La textura predominante en los taludes es arcillolimoso o arcillo-arenoso.

Los fenómenos de erosión presentes en los taludes de caminos son por salpicadura y laminar (en menor medida), en surcos (debido a la eliminación de partículas arcillosas a partir del desgaste progresivo que han tenido los taludes) y con la formación de pequeñas cárcavas.

El mapa de vulnerabilidad muestra el buen estado de la microcuenca media-alta del río Santa Rosa, pero contrasta con el mapa de puntos críticos en taludes de caminos, indicando que además de los 30 lugares mostrados, existen muchos más puntos críticos de cuidado con condiciones igual o similar a los estudiados.

6.2 Recomendaciones

Para la Unidad de Cuencas del Centro de Generación ArCoSa, se recomienda continuar con el estudio de erosión y sedimentos al menos cinco años más. La variabilidad que se puede presentar de un año a otros en las precipitaciones es grande, máxime con la influencia del fenómeno del Niño o de la Niña. Mayor serie de datos permitiría ajustar con mayor precisión la relación entre la erosión y la energía de la lluvia para definir la tasa erosiva media en la microcuenca.

Realizar modelaciones con SIG. Con una tasa erosiva media correspondiente a una serie de datos mayor, como se indicó arriba, y analizando los registros históricos para ajustar el factor de erosividad de la lluvia R , se puede ir calibrando las modelaciones de la microcuenca a su comportamiento medio.

Ajustado el modelo, se pueden correr distintos escenarios de puntos críticos de interés enfocados en Buenas Prácticas de Manejo que sirvan como herramienta en la toma de decisiones.

Para los usos de suelo actual en la microcuenca media-alta del río Santa Rosa se tiene:

- Evaluar el potencial erosivo en pastos, dando énfasis en puntos que muestran síntomas de erosión como lo son caminos internos, zonas de abrevadero, echaderos, pasos de ganado y cursos de agua estacionales. Analizar, dadas las

buenas condiciones de pastos en gran parte de la microcuenca, su eficiencia como zona de amortiguación de transporte de sedimentos.

- Realizar pruebas de infiltración y compactación en los pastos para recomendar prácticas que promuevan la recarga de agua y reduzcan la escorrentía.
- Motivar mediante planes pilotos en las fincas ganaderas la implementación de coberturas con vegetación herbácea y arbustiva resistente a la erosión en lugares susceptibles como lo son pasos de ganado, zonas de abrevaderos, puerta de acceso a los apartos, canales de causes estacionarios.
- Mejorar la estructura del sotobosque para darle mayor cobertura al suelo y mitigar la erosión por salpicadura.
- Ejecutar un plan piloto, de uno o dos taludes de caminos con severos síntomas de erosión, implementando obras de bioingeniería, por ser estos los principales focos de producción de sedimentos de la microcuenca del río Santa Rosa. Algunas de las técnicas se muestran en el Anexo G.

6.3 Temas de interés para estudios futuros

A partir del desarrollo del presente trabajo han surgido los siguientes temas de interés para futuros proyectos:

- Evaluación de la erosión por salpicadura en bosques.
- Evaluación de la erosión eólica en taludes de caminos.
- Determinación del potencial erosivo en caminos rurales: capa de rodamiento y taludes de caminos.
- Evaluar los pastos como zonas de amortiguación de transporte de sedimentos.
- Evaluar técnicas en pasto para aumentar la infiltración en este tipo de uso de suelo.
- Evaluación de un plan piloto implementando obras de bioingeniería para restaurar un talud de camino.

BIBLIOGRAFÍA

1. Agüero, M. –**“Veranillo prolongado, más seco amenaza producción en Pacífico”**
En la web: http://www.nacion.com/ln_ee/2009/agosto/14/economia2055722.html
2. Aguirre, J; Araya, J. –**“Caracterización general de la microcuenca del Río Santa Rosa”** Centro Nacional de Planificación Eléctrica, Proceso de Planeamiento Ambiental. Instituto Costarricense de Electricidad. San José, 2007
3. Cervantes, C. –**“Características físicas y pérdidas de nutrimentos de las parcelas de erosión de Cerbatana de Puriscal, Costa Rica”** Agronomía Costarricense. 1992
4. Cubero, D. (editor) –**“Manual de manejo y conservación de suelos y aguas”** EUNED. Costa Rica. 1996
5. Duff, M. –**“Rural roads and trails as a source of sediment: Preliminary evaluation of models for the Alegre watershed in Eastern Brazil”** Virginia Tech. 2010
6. FAO. –**“Guía FAO de conservación: Diseño y construcción de caminos en cuencas hidrográficas frágiles”** Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas. Italia. 1990
7. Fernández, A. y Aylward, B. –**“Participación, pluralismo y policentrismo: el manejo de cuencas en Costa Rica”** Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. Italia. 1999
8. Gómez, F. –**“Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentos en tres cuencas de Costa Rica”** Informe de trabajo de graduación. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. Costa Rica. 2002
9. Grupo ICE. Dirección de Mercadeo Corporativo y Relaciones Públicas.
10. Hudson, N. –**“Conservación del suelo”** Editorial Reverté S.A. España. 1982

11. Ivés, N. –“**Soil and water runoff Studies in a tropical region**” Turrialba. Costa Rica. 1951
12. Kirkby, M.J. –“**Erosión del suelo**” John Wiley and sons Ltd. 1980
13. Leaf, C. –“**Sediment yield from central Colorado snow zone to intensity**” Transactions of the hydraulics division ASCE. 1970
14. López C, F. –“**Apectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica, y del transporte y depósito de materiales**” Ministerio de Agricultura. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Madrid, España. 1968
15. Marchamalo, M. –“**Ordenación del territorio para la producción de servicios ambientales hídricos. Aplicación a la cuenca del río Birrís (Costa Rica)**” Tesis de maestría. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. 2004
16. Mora, Ileana. –“**Evaluación de la pérdida de suelo mediante la ecuación universal (EUPS): Aplicación para definir acciones de manejo en la cuenca del río Pejibaye, Vertiente Atlántica**” Tesis Mag. Sc. Universidad de Costa Rica – CATIE. Turrialba. 1987
17. Morales, R. –“**Muros, taludes y terraplenes de suelo reforzado: control de erosión**” México. 2003
18. Morgan, R. –“**Erosión y conservación del suelo**” Ediciones Mundi-Prensa. España. 1997
19. Porras, G. –“**Uso de la vegetación para la estabilización de taludes**” Informe de proyecto de graduación. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. Costa Rica. 2000
20. Prado, R. –“**Manual de instalación de barreras con geotextil silt fence para la medición de la erosión en parcelas experimentales**” Proyecto microcuenca Plantón-Pacayas. Documento Técnico N°. 4. Área Suelo y Aguas. Costa Rica. 2007

21. Prado, R. –“**Metodología ajustada para la determinación de pérdida de suelo**” Informe de proyecto de graduación. Escuela de Ingeniería Agrícola. Universidad de Costa Rica. 2009
22. Robichaud, P. –“**Silt fence: An economical technique for measuring hillslope soil erosion**” United States Department of Agriculture. 2002
23. Sánchez, K. –“**Informe de labores de la Unidad de Cuenca en los embalses del Centro de Generación ArCoSa**” Unidad Estratégica de Negocios Producción. Instituto Costarricense de Electricidad. 2009

APÉNDICES

APÉNDICE A. Metodología ajustada para la determinación de pérdida de suelo (Prado, 2009).

A continuación se muestra el apartado cuatro 4. “Metodología de instalación”, del folleto elaborado por el Ing. Rodolfo Prado Segura en el “Manual de instalación de barreras con geotextil “silt fence” para la medición de la erosión en parcelas experimentales, 2007”.

Es importante mencionar, antes de iniciar con el manual de instalación, que debido a las condiciones climáticas dadas en Tilarán, específicamente lo ventoso que es esa zona del país, a la hora de la instalación y revisión semanal de las parcelas, fue necesario ejecutar los siguientes puntos:

- Reducir la distancia entre estacas. Como se verá en el manual, la distancia recomendada es de 80cm. En el caso de estudio, fue necesario colocar estacas cada 40cm.
- Aumentar el número de grapas para la sujeción del geotextil a las estacas. Se recomienda la colocación de tres grapas por hilera, una en la parte inferior, otra en el medio y, por último, una en la parte superior. En el caso de estudio fue necesario colocar hasta 10 grapas por estacas.
- Proteger el geotextil contra rasgaduras. Debido al empuje que ejercía el viento contra el geotextil, el cual era capaz de rasgar y desprender el geotextil de la estaca, fue necesario colocar tape gris (de tela) en la zona del geotextil que iba sujeta a la estaca y nuevamente colocar las grapas.
- En casos extremos, se utilizaron piedras (diámetro aproximado de 20cm) para colocarlas en el sobre el geotextil, junto a las estacas, para impedir que el viento levantara la parte inferior del geotextil.
- Para la limpieza semanal del geotextil, además de las herramientas recomendadas en el manual (palín, pala, escobón) es útil contar también con una pala

pequeña de albañil, y una escobita, pues facilita la recolección del material cuando es escaso en el geotextil.

4. Metodología de instalación

4.1. Delimitación de las áreas de estudio

Seleccionado el sitio que reúne las características requeridas y una vez elaborado el levantamiento topográfico del mismo, se procede a analizar las variables topográficas e hidráulicas que presenta el terreno, para definir el lugar donde se realizará la instalación del geotextil. Durante esta fase se debe programar; antes de la instalación, una visita a la zona para coordinar todos los detalles que conlleva este trabajo y conversar con el propietario de la parcela acerca de las diferentes labores a seguir desde el momento en que se inicie con la instalación de la barrera y posteriormente durante el monitoreo continuo y recolección de datos obtenidos en el sitio.

Una de las primeras actividades que se debe llevar a cabo, es asegurarse que la parcela de trabajo se encuentre bien delimitada para impedir el ingreso de las aguas descontroladas de escorrentía al área de estudio y de esta forma evitar la toma de datos que no corresponda a la definida. En caso que no se logre esta demarcación bien definida, se deben realizar los trabajos de delimitación que sean necesarios para el encauzamiento adecuado de las aguas. Es importante recalcar que estas aguas deberán ser transportadas de forma que no ocasionen daños a las zonas aledañas. En la Figura 2 se muestran diferentes tipos de delimitaciones que se pueden aplicar a las parcelas experimentales.



Figura 2. Ejemplo de delimitaciones realizadas a la parcela de estudio situada en la parte alta de la Microcuenca Plantón-Pacayas, Cartago, Costa Rica (Prado, 2007).

El ejemplo que se presenta corresponde a una parcela recién preparada para la siembra de papa para semilla. Se observa claramente las obras de delimitación y conducción de aguas, a las cuales debe darse un mantenimiento preventivo continuo, lo que puede prevenir la ruptura o mal funcionamiento de ellos y así evitar una toma de datos incorrecta.

Existen diferentes tipos de obras hidráulicas de fácil construcción que se pueden utilizar para la conducción de las aguas, para evitar el ingreso al área de trabajo y que aumente el riesgo de ocasionar erosión debido a la velocidad con la que se conduce el agua sobre la pendiente. Entre las diferentes obras podemos mencionar: canales de guardia, vías de agua empastadas, terrazas de desagüe, acequias de ladera, canales de infiltración, entre las más comunes. La Figura 3 muestra otros ejemplos de fácil implementación.



Figura 3. Otros ejemplos de delimitación en parcelas experimentales (Prado, 2007).

4.2. Ubicación del sitio de instalación

El sitio de instalación del geotextil dentro del área de estudio se definirá a partir de la información que proporciona el levantamiento topográfico. Este sitio se ubicará en la parte baja de la parcela, donde está debidamente delimitada sus aguas para garantizar el área de intersección de las aguas que escurren sobre el terreno al sitio de instalación.

Una vez identificado este sitio, se debe marcar por medio de estacas pequeñas o una cuerda la línea donde se excavará el canal para posteriormente colocar el geotextil; como se muestra en la Figura 4. Se debe tener el cuidado de realizar el trazado de forma que la cuerda este lo más recta posible, con el objetivo de asegurar que la concentración del flujo de escorrentía sobre la barrera será lo más uniforme posible, para efectos de estabilidad en momentos de carga hidrostática debido a la combinación de sedimentos y agua.

Es importante mencionar que la función de la barrera de geotextil “silt fence” es de compactación de sedimentos; es decir, promover velocidad cero en el agua de escorrentía que viene con partículas de suelo y con ello hacer que pase el agua y el sedimento se deposite. En este sentido, el geotextil no se debe utilizar como un sistema de conducción del agua; para ello son las diferentes obras de delimitación y conducción que se realizarán dentro de la parcela de trabajo.



Figura 4. Ubicación del sitio de instalación (Prado, 2007).

4.3. Excavación de la fosa de instalación

El proceso de instalación del geotextil se inicia con la excavación de una fosa donde se colocará el geotextil para ser fijado al suelo. Esta fosa debe ir a todo lo largo de la parte baja de la parcela donde se definió el punto donde se colectará la mayor cantidad de escorrentía. Las dimensiones de la fosa deben ser de 15cm-10cm de ancho por 15cm-20cm de profundidad. Esta gaveta deber ser excavada con herramientas manuales de fácil transporte tales como pala, pico, palín, azada, entre otros.

El material que va siendo removido, debe colocarse al lado del declive (parte más baja del terreno), para ser utilizado posteriormente en rellenar la fosa y enterrar el geotextil (Figura 5).

4.4. Colocación del geotextil en la fosa

Coloque el geotextil a lo largo de la fosa excavada. Introduzca la parte inferior del geotextil de la forma como se muestra en la Figura 6. Posteriormente, se procede a rellenar el agujero con la tierra excavada y se compacta de manera que quede bien sujeto al terreno; esto es necesario para evitar que sea sacado por el agua. En este punto el geotextil se coloca del lado arriba de la pendiente, para facilitar tanto la compactación de la tierra como la co-

locación de las estacas de madera y de esta forma evitar ocasionarle algún tipo de daño o rasgadura al geotextil, manteniéndolo lejos del área de trabajo.

El geotextil debe quedar en este momento enterrado cerca de 25cm y con el resto de superficie hacia arriba del terreno.



Figura 5. Dimensiones de la fosa de instalación del geotextil. (Prado, 2007)

4.5. Instalación de las estacas

Las estacas de madera se cortarán de 80cm-100cm. Estas deben colocarse a una distancia de 30cm hacia abajo (siguiendo la pendiente) de la fosa donde se enterró el geotextil. Las estacas que se van a utilizar deben ser de madera dura o semidura curada para que su vida útil sea duradera, ya que se encontrarán expuestas a las inclemencias del tiempo (Figura 7).

La estaca se entierra entre 30cm-40cm, dependiendo de los requerimientos que se observen en el campo en relación con el grado de compactación que presenta el terreno; lo que se debe asegurar es que las estacas queden muy bien enterradas en el suelo para evitar la caída del equipo. Las estacas se clavarán por medio de un mazo o martillo de mano; deberán estar separadas a una distancia de 80cm-120cm. Esta separación dependerá básica-

mente del tamaño de la parcela y de la pendiente de la misma (a mayor área y mayor pendiente, las estacas deberán ir a menor distancia).

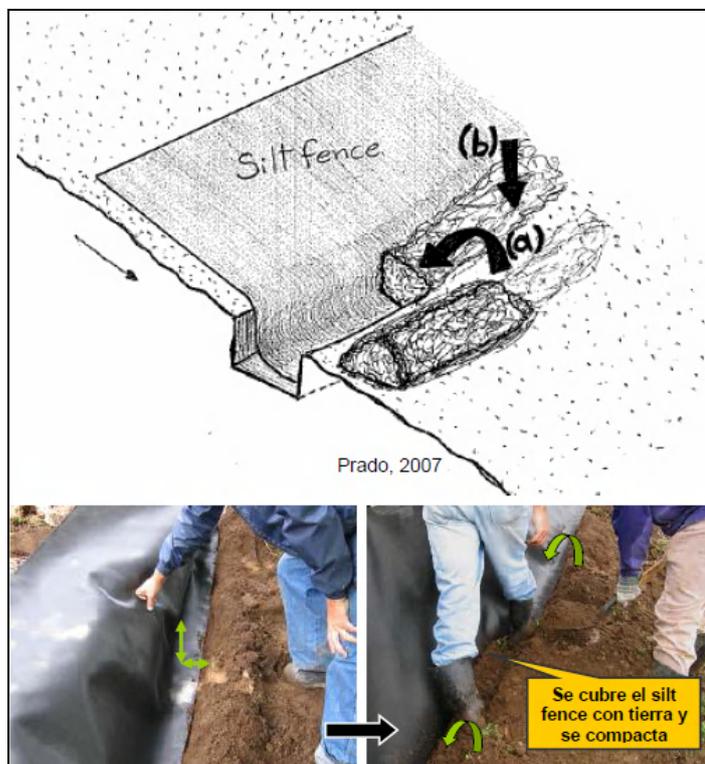


Figura 6. Colocación del geotextil dentro de la fosa de instalación (Prado, 2007).

4.6. Fijación del geotextil a las estacas.

Para sujetar el geotextil a las estacas, se puede realizar por medio de tres métodos diferentes. Las tres formas de sujeción son: por medio de grapas, con gasas plásticas o clavos con arandelas plásticas (Figura 8). Cualquiera de los métodos es de fácil aplicación, pero la utilización de las grapas se presenta como la mejor opción, ya que con esta práctica disminuimos el daño que se ocasiona al geotextil (a diferencia de utilizar gasas plásticas, donde se debe romper el geotextil), y se reduce el efecto de golpear y debilitar las estacas ya enterradas, como es el caso de utilizar clavos con arandelas de plástico.

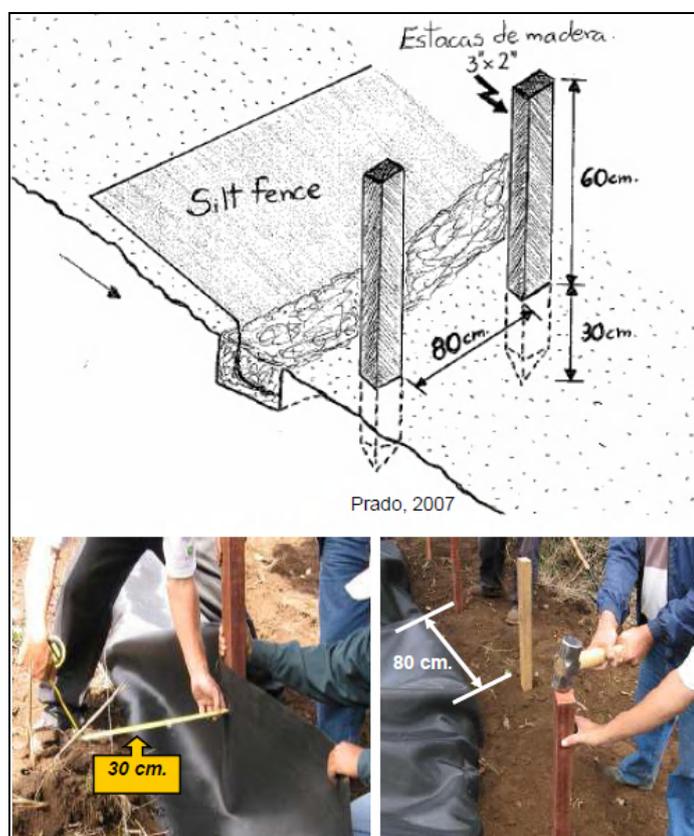


Figura 7. Colocación de las estacas que soportarán el geotextil (Prado, 2007).

El geotextil que se encuentra sobre el terreno se voltea hacia las estacas de madera y debe asegurarse que permanezca sobre el terreno bien ajustado, para evitar la formación de “bolsas” en la parte adyacente al suelo, lo que podría dificultar el recorrido del agua sobre la barrera. Primero se asegura que el terreno que servirá de lecho al geotextil se encuentre bien nivelado y que no haya terrones o montículos que favorezcan la formación de estas “bolsas”; aparte que esta porción del suelo debe tener una pendiente adecuada para favorecer la sedimentación en la parte interna de la barrera (Figura 9).

Posterior al proceso de nivelación, se pasa a la parte de fijación del geotextil a las estacas. En esta parte lo primordial es asegurarse que la barrera quede bien ajustada y seguidamente proceder a grapar el geotextil a las estacas por medio de una grapadora de mano. Se aconseja colocar las grapas de 8mm (hasta 13mm) a una distancia de 15cm-20cm una de otra, para asegurar la colocación de tres grapas por estaca (como mínimo); importante re-

calcar que las grapas se deben colocar diagonalmente para abarcar un mayor número de fibras horizontales y disminuir el riesgo de rasgaduras en el geotextil (Figura 10).

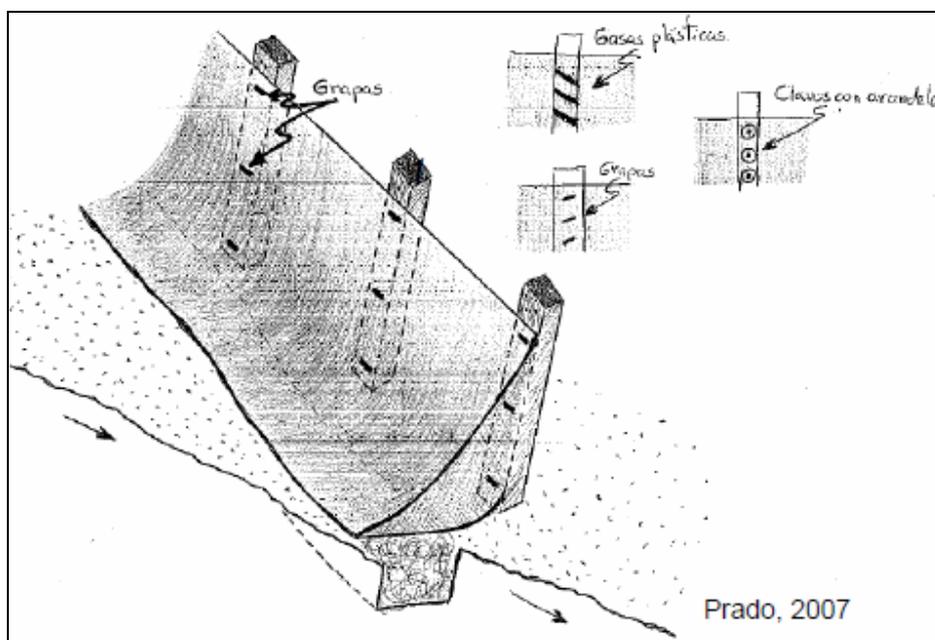


Figura 8. Diagramas de diferentes formas de sujeción del geotextil a las estacas (Prado, 2007).



Figura 9. Nivelación del terreno bajo el geotextil y estirarlo para colocar sobre las estacas (Prado, 2007).



Figura 10. Colocación de las grapas para la fijación del geotextil a las estacas (Prado, 2007).

4.7. Correcciones finales.

En la etapa final de la instalación de las barreras de geotextil es muy importante evitar que el terreno suelto que se encuentre en las cercanías de ésta, no se deslice hacia la barrera. Para ello se deben nivelar bien los finales de los surcos a fin de darle al terreno el ángulo de reposo del mismo y con ello evitar su desprendimiento.

Para este trabajo se utilizará la pala o el palín, dependiendo de las condiciones mecánicas del suelo. Por último se debe realizar la limpieza general de toda la barrera con una escoba eliminando las partículas mas finas; para iniciar a partir de este momento las mediciones correspondientes.

4.8. Seguimiento y cuantificación de la erosión

El seguimiento para la cuantificación de la erosión estará en función de la dinámica de la lluvia, donde es importante tener presente que la erosión es un fenómeno no puntual, es decir, que es espacial y temporalmente variable. En este sentido, dependiendo del área de estudio, puede que para un evento de precipitación se tenga erosión dentro del área de estudio, sin que esta masa de suelo haya logrado transportarse y sedimentar en el “silt fence”.



Figura 11. Desgaste a los bordes del surco colindantes con el geotextil (Prado, 2007).

Por lo anterior, el monitoreo estará en función de eventos de lluvia, de los cuales hay que prestar especial atención en eventos fuertes, donde hay que verificar la estabilidad de los límites de agua que definen el área de estudio, misma que se convierte en la base para establecer la tasa de erosión. Por tanto, la cantidad de masa de sedimento se define en kilogramos (kg) y esta se divide entre el área respectiva (m^2), donde ambas unidades pueden ser convertidas a kilogramo o tonelada (Ton) por hectárea (Ha). Una evaluación y seguimiento anual implicará las unidades tradicionales de expresión de erosión: Toneladas por hectárea por año (Ton/Ha/año); unidades muy comunes en publicaciones científicas y modelos de erosión.

El equipo utilizado para la medición de masa de sedimentos retenida en la barrera, debe ser necesariamente tanto ligero como de fácil manejo para poder ser transportado hasta el sitio de la medición. Además, este equipo no debe ser afectado por el transporte continuo o susceptibilidad al agua. Un balde de hule es una buena opción económica y duradera para realizar las mediciones de masa del suelo depositado en la barrera.

Al realizar las visitas de inspección a la zona de estudio, siempre se debe llevar el equipo de cuantificación compuesto por: una balanza de mano, 2-4 baldes (esto depende de la cantidad de personas que realicen la visita), una pala o palín, una escoba, hojas de campo

para anotar las mediciones de erosión, lapicero ó lápiz, bolsas plásticas para la toma de muestras y marcador permanente.

Al llegar al sitio de estudio, se coloca la balanza sobre el suelo y se calibra de manera que marque cero. Se colocan, uno a la vez, los baldes vacíos para determinar el peso de cada uno de ellos. Como todos los baldes tienen peso diferente, se deben enumerar para poder identificarlos adecuadamente al momento de la medición.

Utilizando la pala o palín se carga el balde hasta llenarlo por completo y con ayuda de la mano se nivelará la tierra; esto con el fin de estandarizar las mediciones. Se coloca el balde con tierra sobre la balanza; como se observa en la Figura 12 y se anota la lectura en la hoja de campo (Figura 13). Así se continúa hasta que se acabe de pesar todo el sedimento que se encuentre atrapado en el geotextil.

Concluido el proceso de pesaje, se procede con la limpieza de la barrera con la pala y la escoba o escobón; de manera que se elimine todas las partículas de suelo que se encuentran sobre el geotextil (Figura 14).



Figura 12. Metodología de cuantificación de los sedimentos. (Prado, 2007)

Una vez finalizado el proceso de cuantificación de los sedimentos, se debe tomar la decisión en conjunto con el agricultor sobre que hacer con ellos. Una buena alternativa es devolver este suelo a la parcela de la cuál fueron arrastrados o utilizar la tierra para rellenar cárcava, conformar surcos, entre otros.

SILT FENCE : HOJA DE CAMPO
CUANTIFICACIÓN DE SEDIMENTOS Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

Fecha: _____ Nombre: _____

Localización: _____

Descripción: _____

# Balde	1	2	3	4
Peso (kg)				

Muestra	# Balde	Balde + Sedimentos Peso 1 (kg)	Balde Peso 2 (kg)	Sedimentos Peso 3 (kg)	Muestra de suelo
1	1				
2	2				
3	3				
4	4				
5	1				
6	2				
7	3				
8	4				
9	1				
10	2				
11	3				
12	4				
13	1				
14	2				
15	3				
16	4				
17	1				
18	2				
19	3				
20	4				
21	1				
22	2				
23	3				
24	4				
25	1				
26	2				
27	3				
28	4				
29	1				
30	2				
31	3				
32	4				

Observaciones: _____

Figura 13. Hoja de campo para la cuantificación de erosión en sitio (Prado, 2007).



Figura 14. Limpieza de la barrera de geotextil luego de la recolección de sedimento (Prado, 2007).

4.9. Recolección de las muestras

El dato sobre contenido de humedad del suelo es un factor muy importante a la hora de analizar el fenómeno de erosión, ya que este nos indica la cantidad de agua que puede retener el suelo. Si se desea conocer la cantidad de suelo seco atrapado o el contenido de humedad del suelo depositado en la barrera; se debe realizar el secado de las muestras en horno. Este sistema de medición del contenido de humedad debe ser realizado en un horno de laboratorio por un período de 24 horas a una temperatura promedio de 105°C.

Las muestras deben ser tomadas en el momento que se realiza la cuantificación del suelo atrapado sobre el geotextil. La muestra recolectadas serán de 1kg; esto con el fin de obtener por lo menos tres submuestras que permitan generar un promedio al final de la prueba de secado y así corroborar cuando alguno de los datos de contenido de humedad que se obtendrán no concuerde con los demás valores obtenidos. El transporte del campo al laboratorio de las muestras debe llevarse a cabo en un recipiente cerrado (bolsa plástica o frasco plástico) identificado con la fecha de recolección, el sitio de muestra y el peso.

De cada muestra de 1kg se obtendrán por lo menos tres muestras, las cuales se utilizarán para la prueba de secado, el resto de sedimento recolectado debe ser guardado en un recipiente sellado, en un lugar fresco hasta que finalice la prueba de contenido de humedad.

En el Cuadro 1 se muestra la hoja de trabajo utilizada para los datos obtenidos durante la prueba de secado para la determinación de contenido de humedad de las muestras. Para llevar a cabo esta prueba se deben seguir una serie de pasos que se detallan a continuación:

1. Identificar cada recipiente con una letra o una combinación de número y letra.
2. Registrar el peso de cada recipiente con una balanza analítica y anotarlo.
3. Anotado el peso del recipiente y aún con este sobre la balanza, se tara la balanza y se comienza a llenar el recipiente con los sedimentos. Anotamos el peso de los sedimentos.
4. El horno debe ser previamente encendido y debe tener una temperatura interna de 105°C. Colocamos las muestras destapadas dentro del horno, donde permanecerán 24 horas.
5. Una vez concluido el tiempo de secado, se sacan las muestras del horno, se tapan y dejan reposar por un lapso de tiempo (entre 1 y 2 horas), de manera que alcancen la temperatura ambiente.
6. Se pesan los recipientes que contienen la muestra seca y anotamos el peso.
7. Para el cálculo del contenido de humedad utilizamos la ecuación (1).

$$\text{Contenido de humedad del suelo} = \frac{\text{Masa de agua (100)}}{\text{Masa de suelo}} \quad (1) \text{ (Gavande, 1987)}$$

Cuadro 1. Hoja utilizada durante la prueba de secado para la determinación del contenido de humedad de las muestras de sedimentos.

Número de recipiente	Descripción	Peso				Contenido de Humedad (%)
		Recipiente (g)	Muestra (g)	Recipiente + Muestra Seca (g)	Suelo Seco (g)	
1						
2						
3						
4						
5						



Figura 15. Muestras de suelo y secado en horno

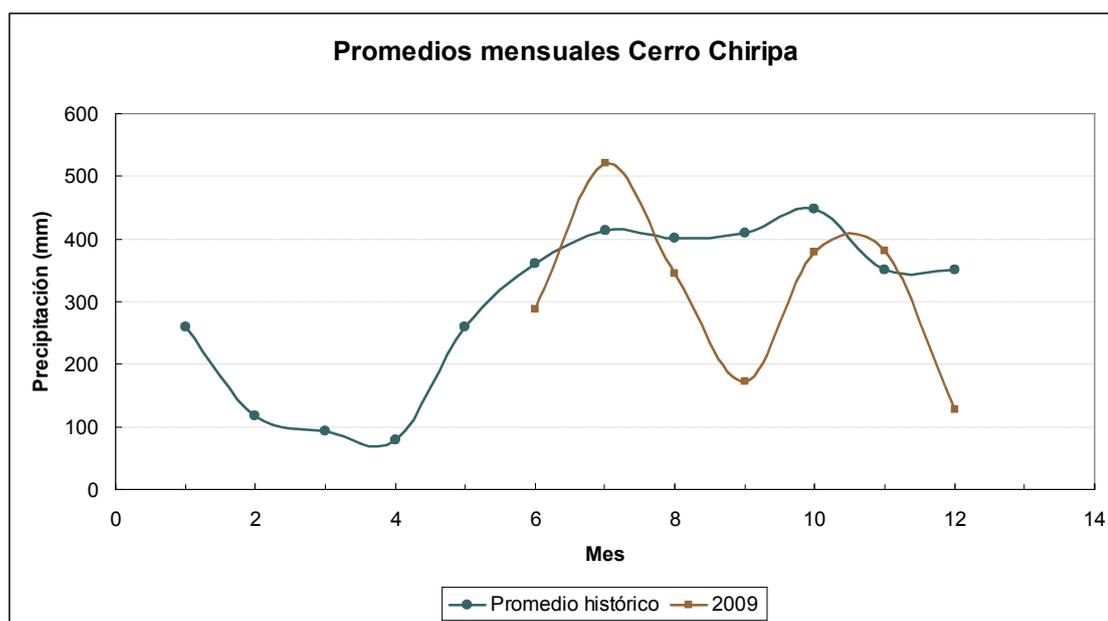
APÉNDICE B. Energías de la lluvia ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$) y factor R ($\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{mm}/(\text{m}^2\cdot\text{hr})$) registradas por fecha para cada estación pluviográfica de influencia en la microcuenca del río Santa Rosa, generada por el programa Lluvias Erosivas.

76020 Libano			76021 Chopo			76022 Quesera			76024 Coyol		
Fecha	R	Energía	Fecha	R	Energía	Fecha	R	Energía	Fecha	R	Energía
05-Jun	109.87	153.42	05-Jun	33.94	96.82	05-Jun	11.88	63.21	05-Jun	18.08	59.11
07-Jun	24.88	74.21	08-Jun	7.97	35.65	06-Jun	18.22	51.23	30-Jun	154.72	215.99
13-Jun	51.46	115.13	13-Jun	4.20	33.08	07-Jun	10.08	47.22	20-Ago	3.09	32.01
23-Jun	4.85	32.95	23-Jun	22.75	57.42	08-Jun	13.76	44.41	26-Ago	12.30	54.52
27-Jun	114.32	151.05	28-Jun	4.28	30.10	20-Jun	36.20	80.97	11-Sep	3.43	32.18
29-Jun	21.12	56.19	30-Jun	54.55	109.57	23-Jun	16.50	73.81	24-Sep	5.01	37.18
10-Jul	20.14	61.94	06-Jul	13.76	50.60	27-Jun	10.53	44.10	02-Oct	12.75	57.05
21-Jul	37.20	114.43	15-Ago	12.88	46.94	28-Jun	2.84	29.48	05-Oct	40.93	101.98
15-Ago	57.76	137.76	26-Ago	66.65	152.55	30-Jun	37.52	92.32	08-Oct	7.89	32.35
20-Ago	2.03	30.71	11-Sep	96.28	135.34	03-Jul	1.94	29.41	09-Oct	33.71	88.47
05-Sep	73.76	115.25	24-Sep	30.42	72.12	03-Jul	7.12	42.48	19-Oct	9.75	40.82
10-Sep	28.29	66.28	02-Oct	29.66	71.20	06-Jul	46.00	101.74	20-Oct	8.79	54.1
11-Sep	18.78	78.68	05-Oct	51.32	102.05	10-Jul	73.19	133.40	25-Oct	2.63	32.39
17-Sep	25.49	104.52	08-Oct	28.74	63.57	16-Jul	39.49	141.33	01-Nov	5.08	33.32
24-Sep	71.86	142.88	09-Oct	12.11	51.83	03-Ago	5.71	41.66	02-Nov	2.79	26.12
05-Oct	48.18	121.60	19-Oct	24.87	62.77	20-Ago	5.40	40.92	04-Nov	12.85	68.35
09-Oct	61.69	126.50	20-Oct	14.51	84.00	26-Ago	15.19	57.50	05-Nov	19.05	70.74
20-Oct	44.10	114.22	21-Oct	2.39	26.12	05-Sep	12.62	43.59	07-Nov	7.95	62.57
23-Oct	12.01	45.46	26-Oct	7.46	36.70	10-Sep	53.86	93.01			
25-Oct	7.54	46.38	04-Nov	24.56	74.38	11-Sep	3.62	29.65			
26-Oct	8.17	47.33	05-Nov	54.23	107.83	24-Sep	61.68	129.67			
01-Nov	27.14	90.88	07-Nov	82.73	185.05	05-Oct	18.44	68.50			
04-Nov	15.12	76.32				09-Oct	27.00	83.06			
05-Nov	7.14	46.85				19-Oct	14.12	48.76			
07-Nov	4.12	40.60				23-Oct	5.92	41.60			
						25-Oct	65.28	122.40			
						01-Nov	14.95	66.89			
						04-Nov	14.22	69.98			
						05-Nov	11.73	50.21			
						07-Nov	40.07	89.64			
						26-Nov	4.30	28.22			

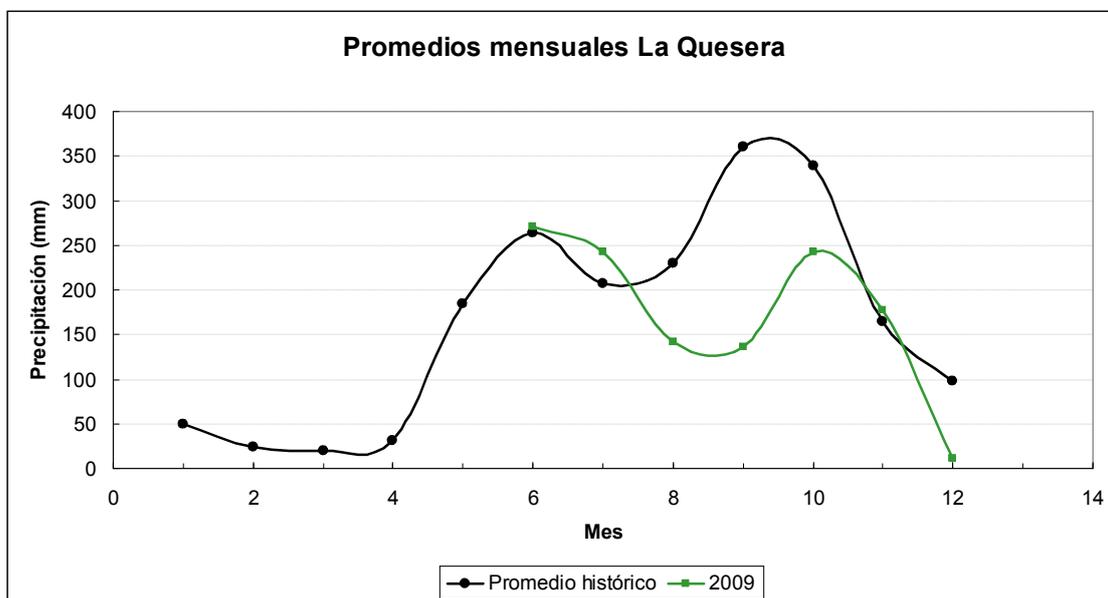
76040 Sandillal			69552 Tejona			69630 Chiripa			69585 Tronadora		
Fecha	R	Energía	Fecha	R	Energía	Fecha	R	Energía	Fecha	R	Energía
05-Jun	12.76	58.42	05-Jun	8.40	44.71	5.06	33.93	79.53	05-Jun	8.29	50.98
12-Jun	60.54	94.60	13-Jun	9.30	45.78	16-Jun	26.25	75.99	16-Jun	67.02	106.38
13-Jun	17.13	62.45	16-Jun	17.37	52.60	19-Jun	2.76	27.18	23-Jun	44.11	96.48
20-Jun	7.87	34.44	20-Jun	4.91	29.30	23-Jun	46.12	95.56	02-Jul	7.40	32.36
23-Jun	44.56	81.96	23-Jun	13.95	56.04	27-Jun	77.89	127.79	03-Jul	4.98	32.69
26-Jun	20.38	71.64	28-Jun	25.49	65.15	28-Jun	3.31	27.14	03-Jul	41.73	112.52
30-Jun	78.32	117.70	30-Jun	5.84	31.07	30-Jun	11.63	52.04	06-Jul	43.65	99.91
18-Ago	18.28	66.62	03-Jul	14.70	56.72	02-Jul	10.64	42.73	10-Jul	44.88	110.44
26-Ago	112.56	226.13	06-Jul	37.52	93.50	03-Jul	75.44	183.33	16-Jul	34.30	177.71
11-Sep	19.02	72.01	10-Jul	13.56	56.80	04-Jul	1.61	26.39	21-Jul	40.08	108.07
24-Sep	10.58	44.33	16-Jul	30.91	148.39	06-Jul	48.82	113.07	04-Ago	22.21	79.49
05-Oct	150.94	165.08	21-Jul	26.36	84.24	10-Jul	125.27	188.21	07-Ago	3.93	30.98
09-Oct	4.24	33.36	04-Ago	8.91	50.10	12-Jul	4.11	42.61	09-Ago	7.75	36.32
10-Oct	5.53	31.10	20-Jun	6.77	51.25	16-Jul	117.70	345.82	18-Ago	10.70	60.20
20-Oct	46.70	141.42	24-Sep	3.18	28.45	26-Jul	6.26	64.82	20-Ago	11.18	66.68
21-Oct	13.38	28.62	03-Oct	13.31	48.54	01-Ago	12.14	64.58	10-Sep	7.60	34.01
01-Nov	13.48	42.80	05-Oct	5.80	40.79	02-Ago	54.30	242.92	24-Sep	2.88	31.55
04-Nov	14.67	62.78	09-Oct	2.92	28.72	06-Ago	14.79	59.40	05-Oct	50.40	121.24
05-Nov	12.18	48.93	19-Oct	4.89	34.38	08-Ago	7.73	51.00	09-Oct	13.01	59.54
07-Nov	125.27	189.68	21-Oct	8.56	77.35	19-Ago	2.06	33.76	19-Oct	2.66	32.69
			23-Oct	60.60	42.10	20-Ago	19.67	90.06	20-Oct	3.79	28.70
			25-Oct	12.56	112.56	05-Sep	4.96	44.41	21-Oct	4.43	37.96
			31-Oct	15.22	70.61	10-Sep	20.72	56.65	25-Oct	7.14	50.23
			01-Nov	35.58	68.09	11-Sep	20.00	60.55	26-Oct	1.57	23.83
			04-Nov	5.44	84.39	17-Sep	6.98	32.71	31-Oct	17.65	60.95
			05-Nov	6.29	42.86	24-Sep	26.85	96.11	01-Nov	64.34	129.23
			07-Nov	15.94	42.69	05-Oct	98.24	157.23	04-Nov	7.12	43.82
			08-Nov	4.02	74.69	06-Oct	6.89	31.55	05-Nov	17.06	69.98
			15-Nov	7.56	46.50	09-Oct	86.93	136.92	07-Nov	3.15	41.28
			19-Nov	0.90	25.32	16-Oct	3.32	29.68	08-Nov	6.88	52.06
			26-Nov	11.61	55.72	19-Oct	2.55	31.38	15-Nov	10.54	62.87
						20-Oct	15.90	68.05	19-Nov	1.50	32.76
						23-Oct	9.13	42.78	26-Nov	5.49	51.43
						25-Oct	30.42	99.81	13-Dic	2.52	45.92
						26-Oct	1.87	30.65			
						27-Oct	4.82	28.76			
						01-Nov	26.92	88.34			
						04-Nov	58.26	124.63			
						05-Nov	78.95	120.44			
						07-Nov	63.44	122.43			
						09-Nov	4.91	37.94			
						12-Nov	3.28	30.74			
						14-Nov	29.38	240.99			

APÉNDICE C. Registro histórico de lluvias.

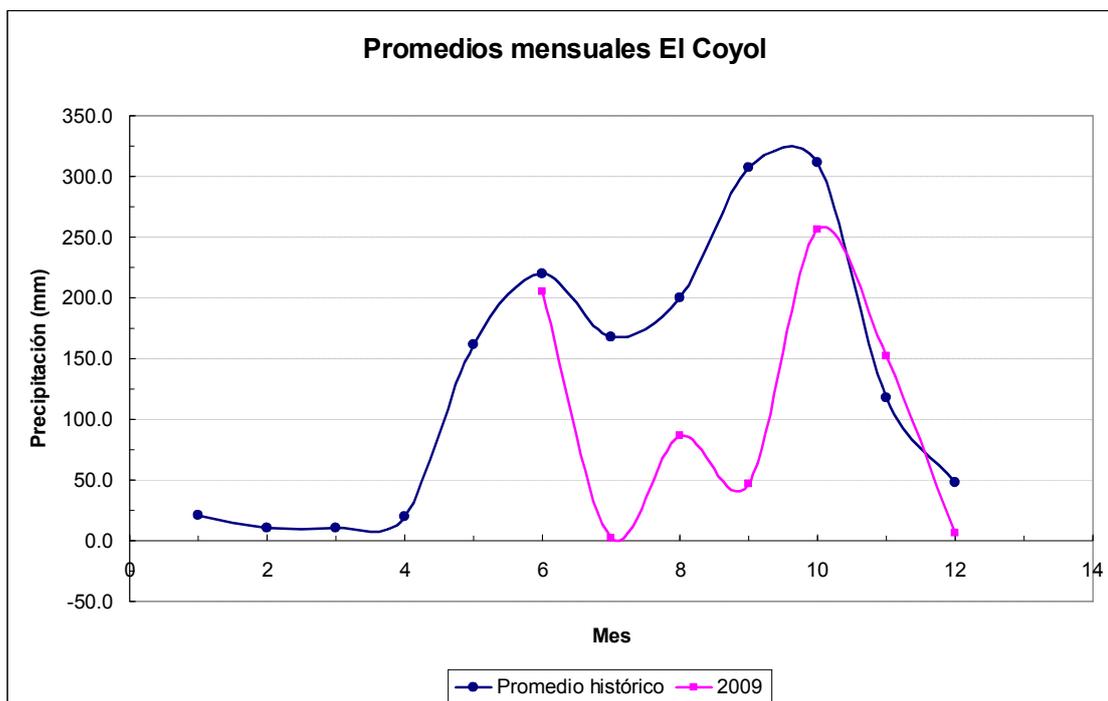
Se muestra a continuación el comportamiento de las lluvias históricas de enero a diciembre y se compara con las precipitaciones dadas en el 2009 para los meses de prueba, de junio a diciembre. Se nota claramente el efecto del fenómeno del Niño en todas las estaciones. Fuente. Departamento de Hidrología, Estudios Básicos del ICE.



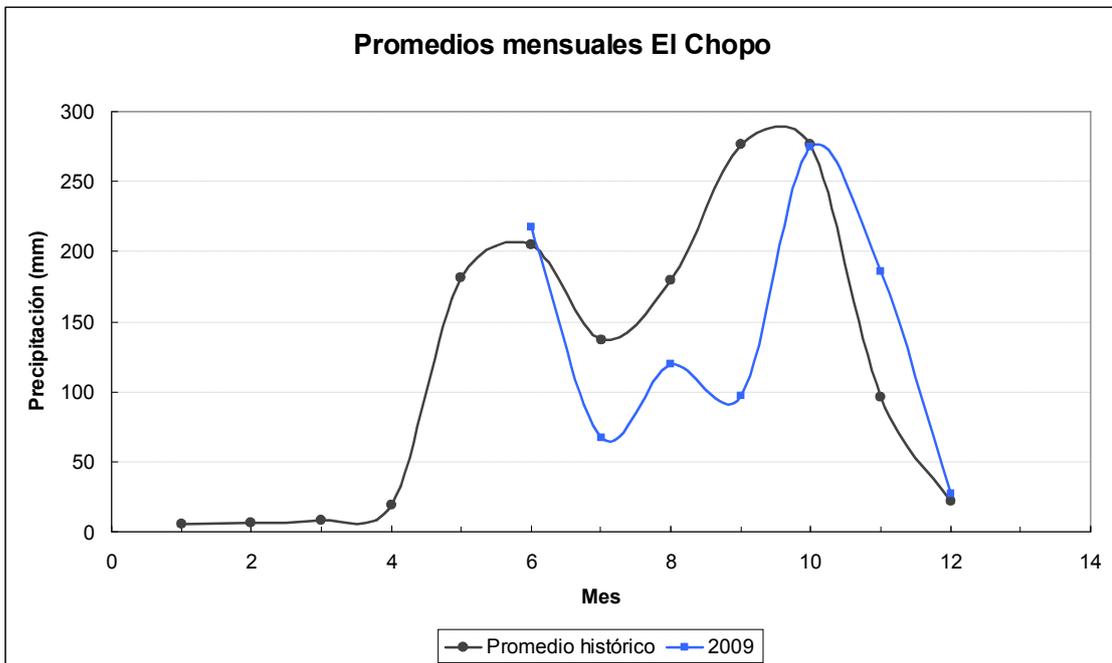
Ubicación: Cerro Chiripa, OSIVAN-ICE.



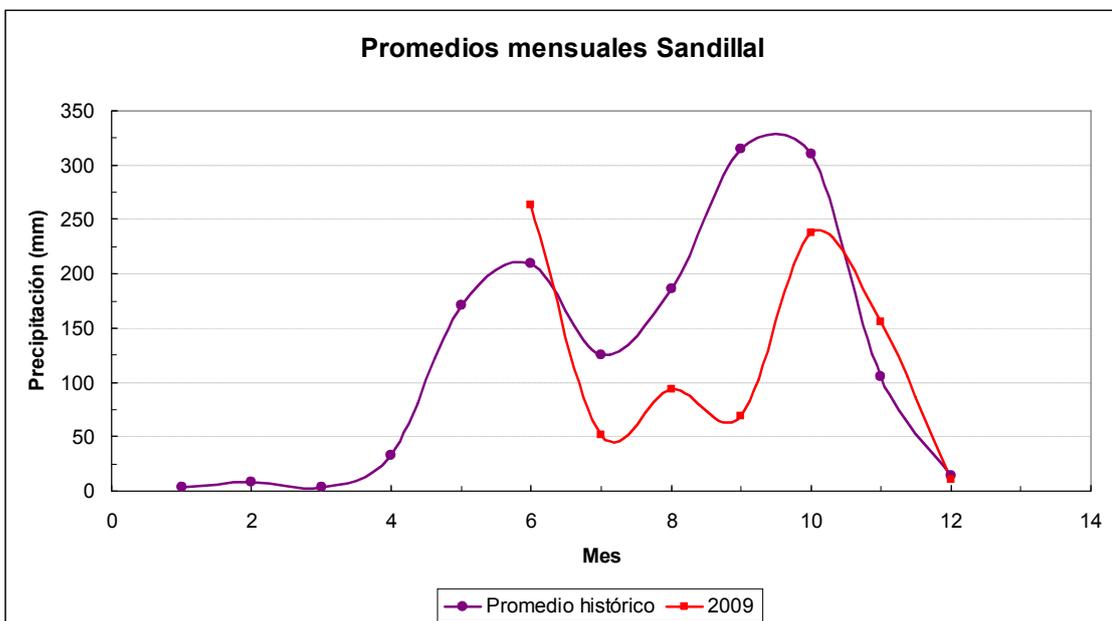
Ubicación: La Quesera, Finca de Don Stefano Pomma.



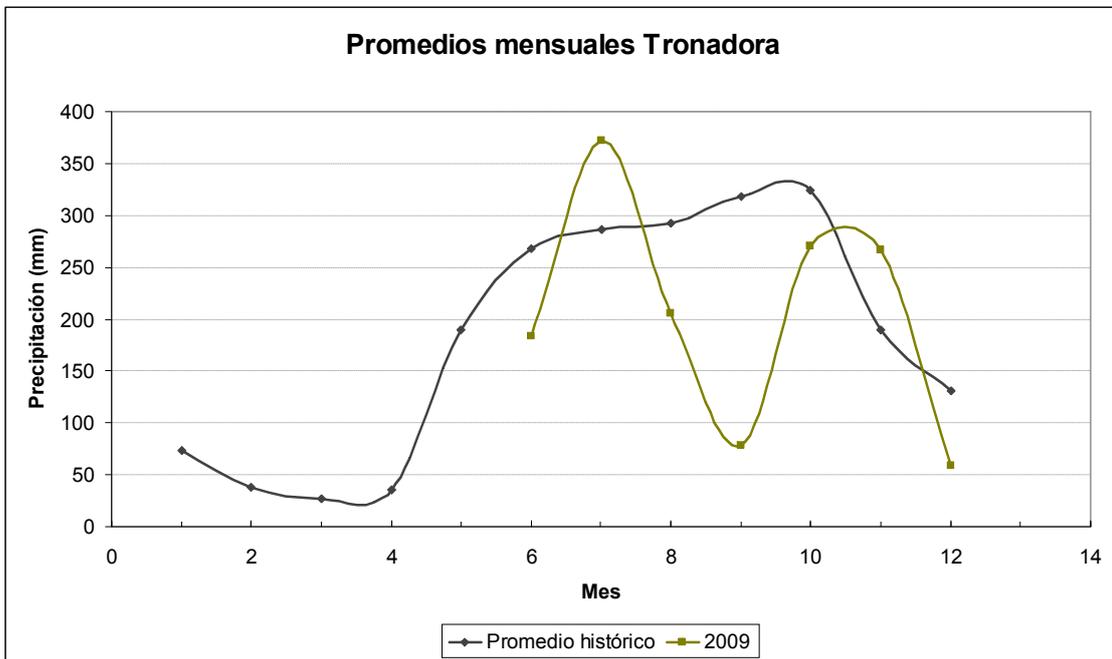
Ubicación: EL Coyol, Los Ángeles.



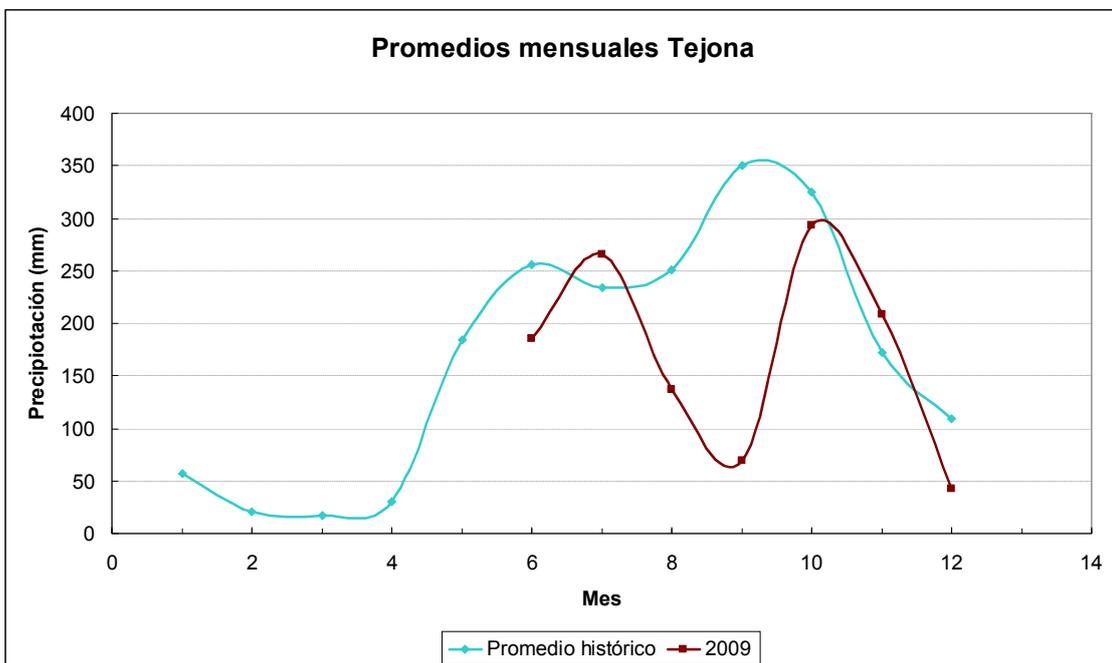
Ubicación: Puente del Río Santa Rosa.



Ubicación: Embalse Sandillal



Ubicación: Embalse Sandillal



Ubicación: Embalse Sandillal

ANEXOS

ANEXO A. Diferencias entre la parte alta y baja de la microcuenca del Río Santa Rosa.

Se utilizó como criterio para la división de la microcuenca en dos a la altura de la curva 540msnm, en donde limitan las zonas de vida de bosque tropical húmedo a bosque tropical seco.



Figura A.1 Fincas ubicadas en la parte baja de la microcuenca, cercano a Los Ángeles de Tilarán. Se aprecia la pobre cobertura del pasto, así como síntomas de erosión. Fuente. El autor.



Figura A.2 Fincas aledañas a Cerro Chiripa, Tilarán. Los pastos presentan una cobertura del 100% sobre el terreno. Fuente. El autor.



Figura A.3 Bosque tropical húmedo ubicado en Cerro Chiripa. Fuente. El autor.



Figura A.4 Bosque tropical seco ubicado en propiedad ICE, Centro de Producción Miguel Pablo Dengo B. y Sandillal. Fuente. El autor.

ANEXO B. Formulario de solicitud de permiso

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD CENTRO DE GENERACIÓN ARCOSA PERMISO PARA TRABAJOS	
YO: _____	
EN CALIDAD DE: _____ DE LA FINCA: _____	
SITUADA EN: _____ LUGAR: _____	
DISTRITO: _____ CANTON: _____ PROVINCIA: _____	
NUMERO DE FINCA: _____ # PLANO CASTASTRADO _____	
<p>Por este medio autorizo a los empleados del Instituto Costarricense de Electricidad, para que dentro de esta finca lleven a cabo trabajos de medición de pendientes, instalación de membrana geotextil y recolección de muestras de suelo depositado por acción de la erosión durante un periodo de 10 meses que inicia en Mayo de 2009 y finaliza en Febrero de 2010.</p>	
Observaciones:	
_____ _____ _____ _____	
En fe de aceptación firmo la siguiente en: _____ a las _____ días del mes de _____ de _____.	
NOMBRE _____	FIRMA _____
(Representante autorizado ICE)	
NOMBRE _____	FIRMA _____
(Propietario o encargado)	
Dirección exacta del propietario y número de teléfono: _____	
_____ _____	
Nota: favor tomar en cuenta las observaciones.	

ANEXO C. Propiedades físicas e hidráulicas: geotextil W330

Geotextil tejido elaborado a partir de cintas (no filamentos) de polipropileno estabilizado contra rayos UV

Fabricante: AMOCO

Modelo: PROPEX 1198

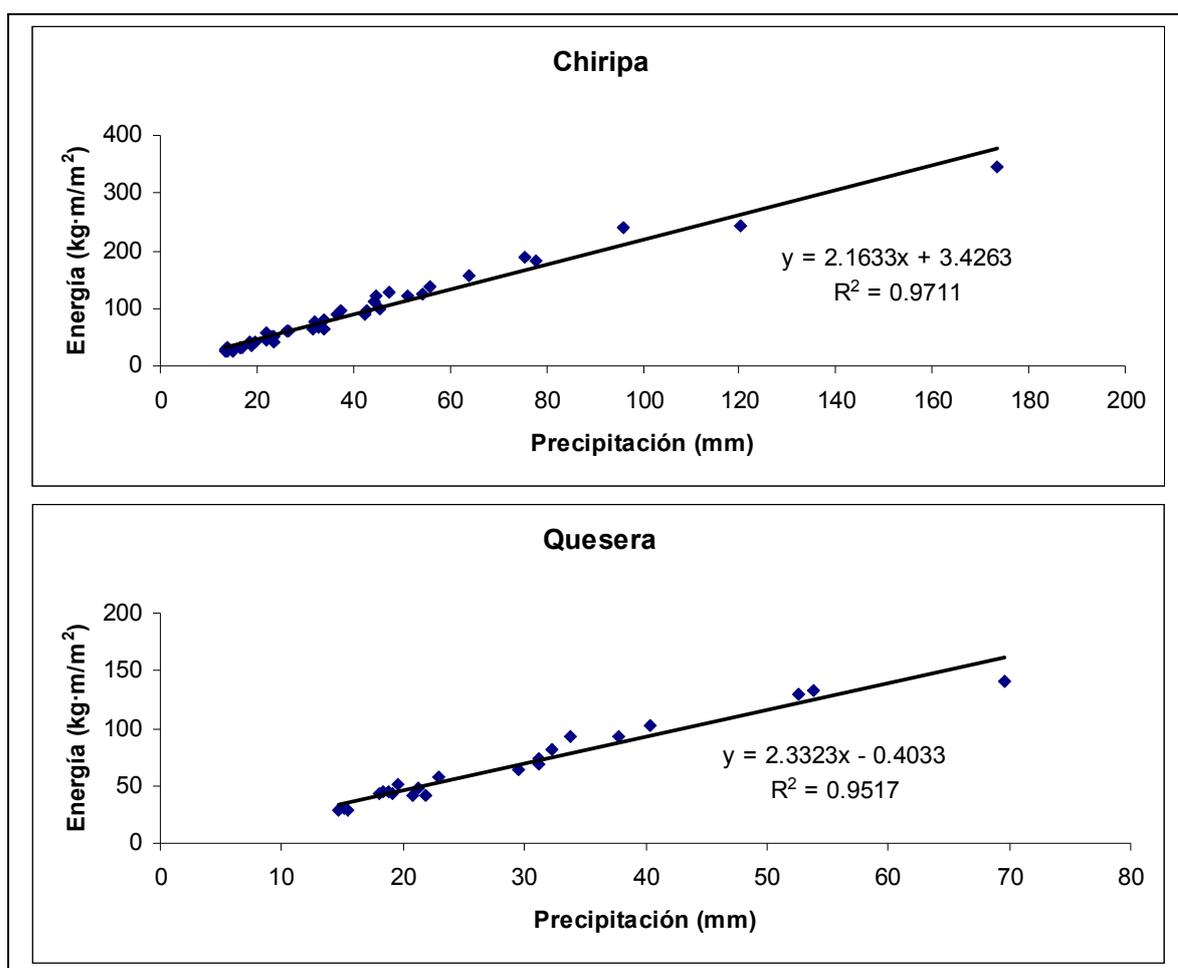
Dimensiones/rollo: 0,91m x 137,35 m

Área: 125 m²

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. Análisis de las parcelas de tipo de uso de suelo de pasto de la microcuenca media-alta

La precipitación y energía producida, las estaciones pluviográficas utilizadas muestran una correlación muy lineal, con “R²” cercanos a uno, la estación de Cerro Chiripa con R² = 0,97, Quesera con R² = 0,95 y Nueva Tronadora con R² = 0,94 (Figura A.5).



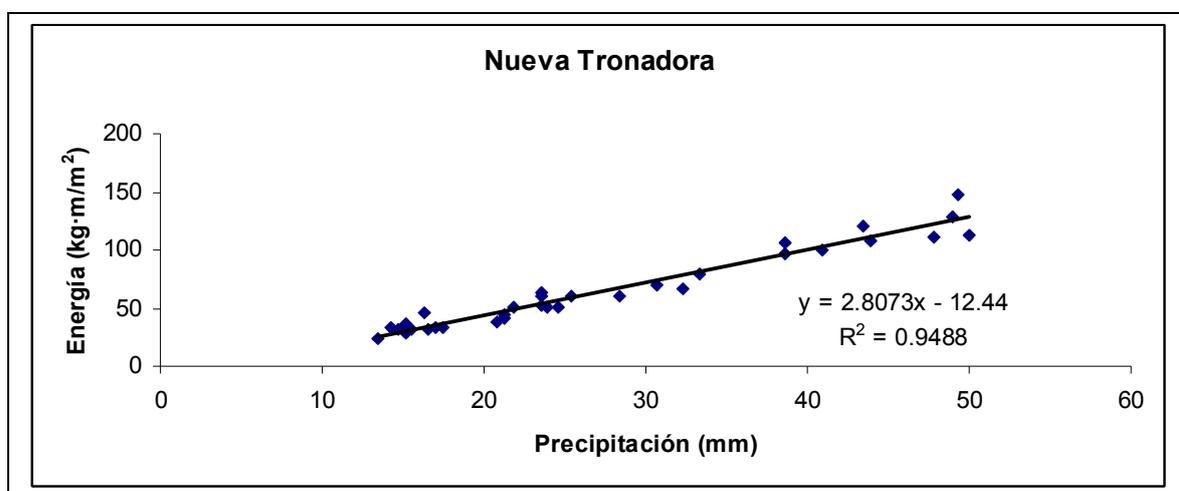


Figura A.5 Relación mostrada entre la precipitación registrada por las estaciones pluviográficas Quesera y Chiripa y su respectiva energía. Fuente. El autor, a partir de los datos pluviográficos del ICE.

La Figura A.6 muestra la cantidad total recolectada de sedimentos en las parcelas experimentales ubicadas en el rango de 0%-15%.

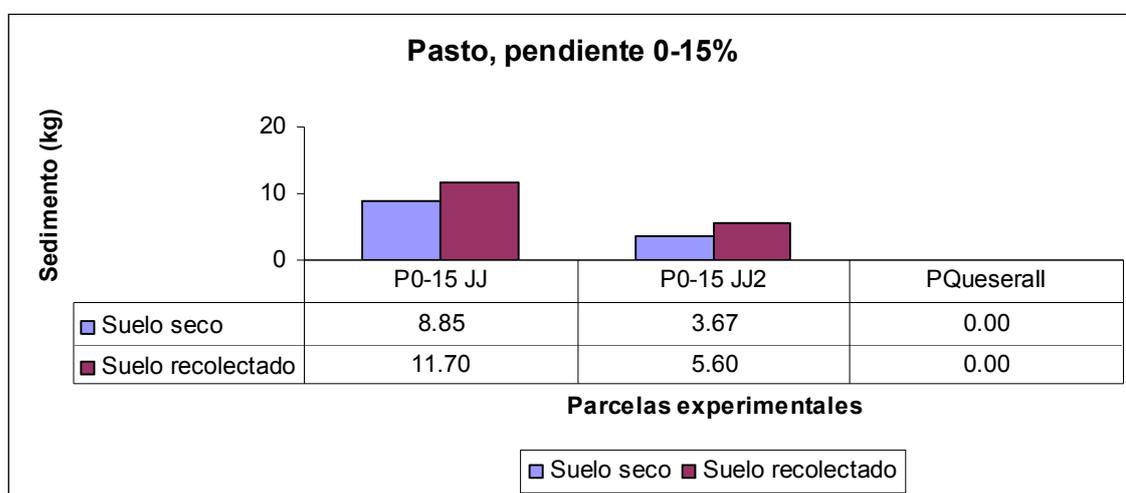


Figura A.6 Resultados obtenidos en las parcelas de pasto con pendiente de 0%-15% de la microcuenca media-alta. Fuente. El autor.

Como se puede observar solo en dos parcelas se recolectó material. La parcela P 0-15 JJ con 11,70kg de suelo recolectado y contenido de humedad de 24,34%, por lo que 8,85kg corresponden a suelo. Ese resultado se debió a un único muestreo, el cual se realizó el 31 de julio. La textura es franco-arenoso.

En la parcela P 0-15 JJ2 la única fecha de recolección fue el 6 de agosto, con un total de 5,60kg el cual presentaba un contenido de humedad de 34,49% con lo cual la cantidad neta de suelo perdido es 3,67kg. La textura es Arcillo-arenoso.

Por otro lado, la parcela PQueseraII no cuantificó erosión en el periodo de prueba.

La razón por lo cual las parcelas P 0-15 JJ y P 0-15 JJ2 recolectaron material se debe a que a la hora de su instalación, se dejó una franja 20cm de suelo desprotegido antes del geotextil. Esto ocasionó que ante los eventos de precipitación dados mientras el pasto volvía a crecer en ese sitio, la energía manifestada por las gotas de lluvia en ese lugar promoviera el desprendimiento de partículas de suelo y el traslado por salpicadura al geotextil. Por lo cual, el comportamiento de pastos en pendiente de 0%-15% corresponde más al resultado mostrado por la parcela PQueseraII, en la cual nunca se produjo sedimentación debido a que el proceso erosivo es imperceptible en las condiciones de pasto y pendiente de estudio. Estas mismas condiciones, de pasto y pendiente, las presentaban las otras dos parcelas analizadas, y como no se volvió a recolectar suelo sedimentado, debido a que el pasto repobló rápidamente la franja de suelo desprotegida, se considera, como se dijo arriba, que en esta combinación de pasto y pendiente de 0%-15% los procesos erosivos no se dan a la escala necesaria para ser cuantificables.

Para las parcelas de pasto en pendiente de 15%-30% se observa en la Figura A.7 que a pesar de la excelente cobertura de pasto, se obtuvo sedimentos. La parcela PM 1-30 obtuvo la mayor cantidad de sedimento y se debió a que al ser instalada se dejó una franja de 20cm de suelo desprotegido y a la fecha del 30 de julio (mes y 12 días después de su instalación) las precipitaciones dadas provocaron el desprendimiento y traslado al geotextil de 1,37kg de suelo seco. Luego de esa fecha, cuando ya la franja se repobló de pasto, el comportamiento de esta parcela fue similar a las otras dos, con 2,97kg, 1,37kg y 1,36kg, en las parcelas P 15-30 JJ, PM 1-30 y S-15-30 SP, respectivamente. Se hace la corrección de da-

tos para la parcela PM 1-30, por lo cual para el tipo de uso de pasto y pendiente de 15%-30% los procesos erosivos son imperceptibles y la sedimentación es casi nula, según los resultados obtenidos, 0,00 ton/ha. La tasa erosiva es mínima pero por la extensión de este tipo de uso en este rango de pendiente las toneladas producidas para el estudio es de 5,03ton.

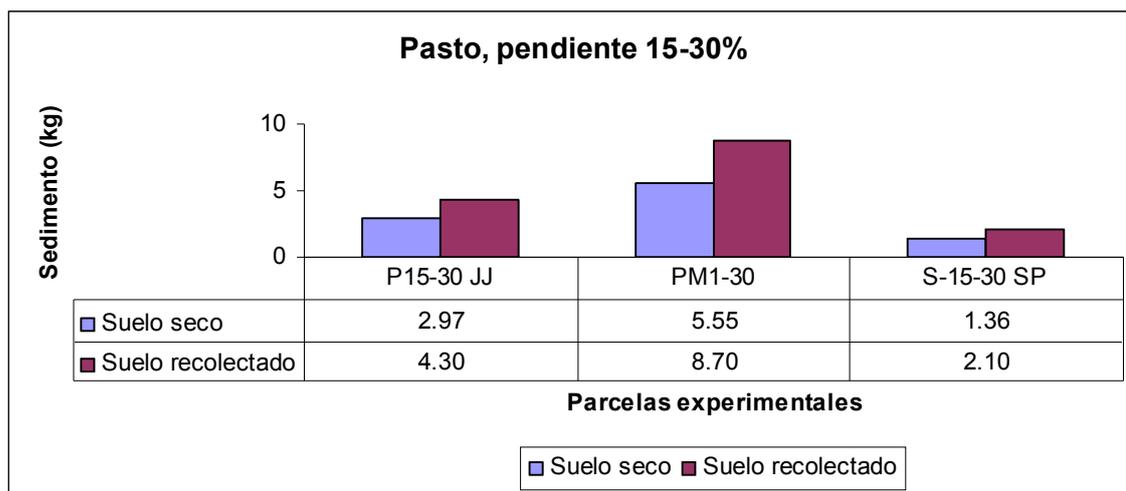


Figura A.7 Resultados obtenidos en las parcelas de pasto con pendiente de 15%-30% de la microcuenca media-alta. Fuente. El autor.

Para las parcelas de 30% a 45% (Figura A.8), se debe hacer un reajuste de los datos, ya que al igual que en otras parcelas mencionadas anteriormente, la P 30-45 JJ fue instalada dejando una franja de suelo desprotegido de 20cm a la par de la geomembrana. Como se observa en la Figura A.8 esta parcela, en un solo muestreo, obtiene 12,07kg de suelo seco sedimentado al mes y diez días de haber sido instalada. La parcela P 30-45 JJ cuenta con condiciones similares de cobertura de pasto sobre el terreno como las parcelas M 3-45 y M 4-30-45, las cuales en todo el periodo de prueba, obtuvieron 0,88kg y 0,68kg de suelo seco sedimentado en el geotextil. Eliminando por tanto el dato de la parcela P 30-45 JJ, se tiene para la combinación de uso de suelo de pasto y pendiente entre 30%-45% una producción de 0,00 ton/ha. Esta tasa erosiva es casi nula, pero extendiéndola a toda el área cobertura de pasto y pendiente de 30%-45% se tiene una producción de 0,90ton.

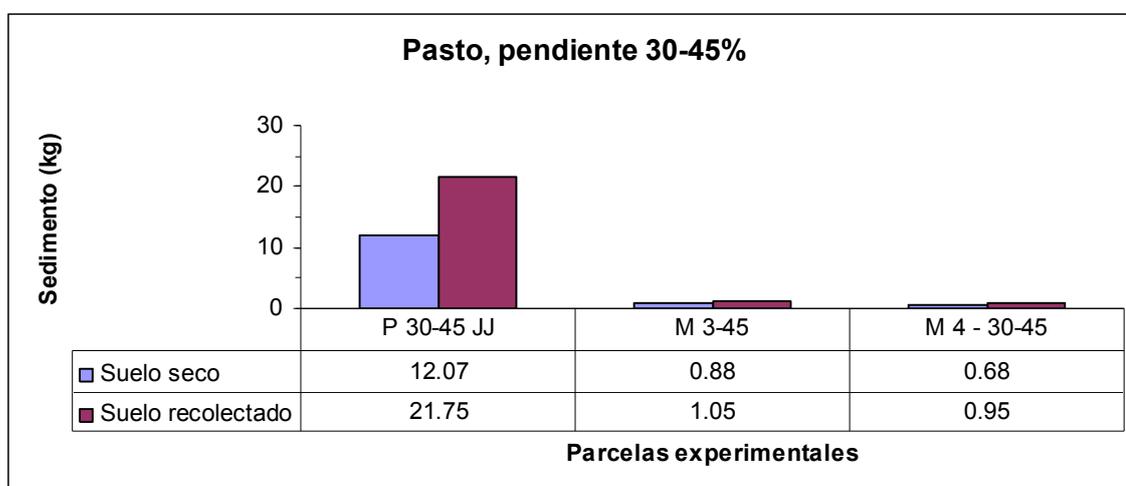


Figura A. 8 Resultados obtenidos en las parcelas de pasto con pendiente de 30%-45% de la microcuencia media-alta. Fuente. El autor.

ANEXO E. Análisis de las parcelas de tipo de uso de suelo de bosque de la microcuenca media-alta

La zona del cerro Chiripa, donde se ubican todas las parcelas de bosque, se caracteriza por presentar precipitaciones durante lapsos largos, abarcando inclusive dos o tres días de temporal. Esto hace que en algunos casos, de un total precipitado, menos del 50% corresponda a eventos con potencial erosivo. La garúa, es la precipitación más representativa de la zona y esta es captada por el dosel del bosque, a lo que se le llama lluvia horizontal. Las gotas formadas en el dosel son de gran tamaño (5mm de diámetro aproximadamente) y al caer al suelo proporcionan gran energía para el desprendimiento de partículas, en caso que no la cobertura no sea la adecuada y no haya un sotobosque bien establecido.

El periodo de prueba, de 4 a 5 meses, varía en función del día de la instalación de la geomembrana. En este sector, según los datos de la estación pluviográfica, el efecto en la disminución de las lluvias debido al fenómeno del Niño se da a partir de mediados de julio en adelante.

Las parcelas de bosque dentro del rango de pendiente de 0%-15% se distribuyen de la siguiente manera: dos en la finca Municipal de Tilarán (FM 0-15-1 y FM 0-15-2) y una en la finca de don Jesús Murillo (P 0-15 JM). Esta última parcela, es un parche boscoso dentro de una finca con dedicación ganadera, el cual funciona como cortavientos y refugio para el ganado. Por otro lado, las parcelas en la finca municipal están dentro del uso exclusivo de bosque.

Parcela FM 0-15-1 presenta una buena cobertura vegetal (sotobosque) de árboles pequeños en desarrollo y del dosel del bosque establecido. Cuenta con un 20% de protección por parte de hojas y troncos en el suelo. En total se recolectó 4,11kg de suelo seco. Contenido de humedad promedio del suelo recolectado es de 55,40%. Para el área de prueba de 1438,52m² se tiene una pérdida de suelo de 0,03 ton/ha, debido al proceso que se observa en la Figura A.9. El repunte de energía del 43,82% (1 424,88 kg·m/m²) dado de la fecha de inicio al 18 de agosto ocasiona el desprendimiento y traslado de suelo de 1,53kg (37,23%). Luego la energía descende debido al veranillo prolongado causado por el fenómeno del

Niño, pero siendo ésta suficiente para mantener los procesos erosivos de desprendimiento y salpicadura a la geomembrana, en cantidades menores de recolección 1,27kg; 0,88kg y 0,43kg de suelo seco, respectivamente a las energías 739,95 kg·m/m²; 419,45 kg·m/m² y 667,17 kg·m/m². La erosión por salpicadura fue la predominante. Textura: Limo-arenoso.

La Figura A.10 muestra como se va dando el fenómeno erosivo con respecto a la energía que se presenta. Cada segmento horizontal significa pequeños traslados de partículas de suelo por salpicadura, pero que por ser menos de un kilo en la geomembrana la recolección del material no se hacía.

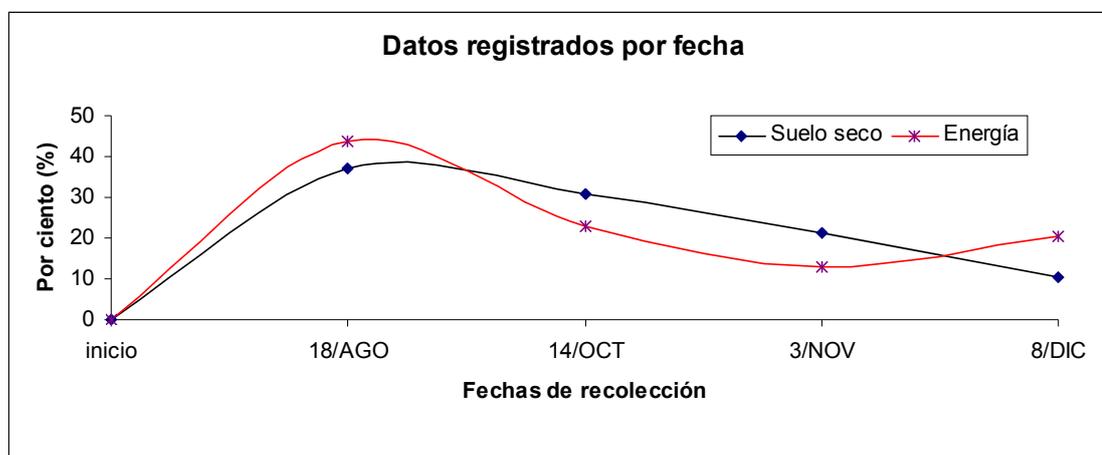


Figura A.9 Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela FM 0-15-1. Fuente. El autor.

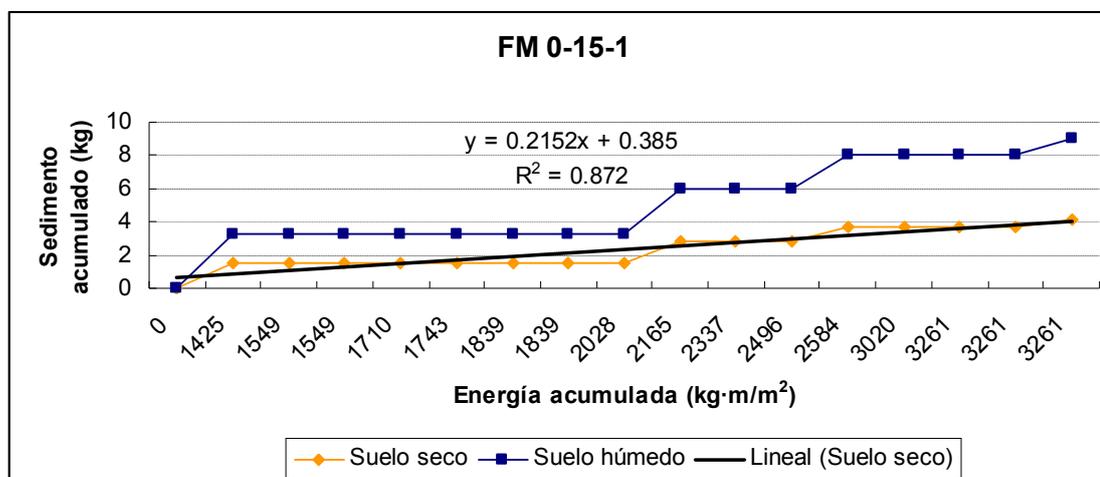


Figura A.10 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela FM 0-15-1, microcuencas media-alta. Fuente. El autor.

La energía total en el periodo de prueba es de 3 261,45 kg·m/m², de los cuales 1424,88 kg·m/m² se requirieron para desprender 1,53kg de suelo seco. Luego se presenta un periodo de cero erosión en donde la energía que se iba acumulando actuaba sobre el terreno desprendiendo sus partículas, hasta el 14 de octubre donde la energía acumulada es de 2 164,83 kg·m/m² y acumula en la geomembrana 1,27kg de suelo. Finalmente se observan dos periodos más de cero erosión, desprendimiento y traslado por salpicadura de partículas por parte de las gotas de lluvia al impactar el suelo, con energías de 2 548,28 kg·m/m² y 3261,45 kg·m/m² y producciones de sedimento de 0,88kg y 0,43kg, respectivamente.

La parcela FM 0-15-2 presenta condiciones similares de cobertura vegetal y materia orgánica en descomposición que la parcela FM 0-15-1. En total se recolectó 3,57kg de suelo seco. El contenido de humedad promedio es de 62,07%, y se produce 0,03 ton/ha en un área de estudio de 1 267,57m². La salpicadura fue el proceso predominante, ayudado en poca medida por escorrentía. Textura: Limo-arenoso.

Se observa en Figura A.11 que conforme la energía va aumentando, 482,72 kg·m/m² y 739,95 kg·m/m², la cantidad de suelo sedimentado también aumenta, 0,93kg y 1,29g, respectivamente, debido a la acción de las gotas de lluvia sobre el terreno. De la fecha del 18

de agosto al de 14 de octubre, se da un proceso de cero erosión y desprendimiento de partículas de suelo que quedan susceptibles a ser arrastradas por flujo superficial, mostrado como una línea horizontal en la Figura A.12. Luego de esa fecha se da una disminución de la energía ($419,45 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$) pero la tasa erosiva se mantiene, cercano al valor máximo registrado, en $1,01 \text{ kg}$, lo cual se debe a que las precipitaciones dadas si bien no son erosivas, promueven la formación de gotas de gran dimensión en el follaje de los árboles que al caer desprenden partículas de suelo dejándolas susceptibles a ser arrastradas por escorrentía.

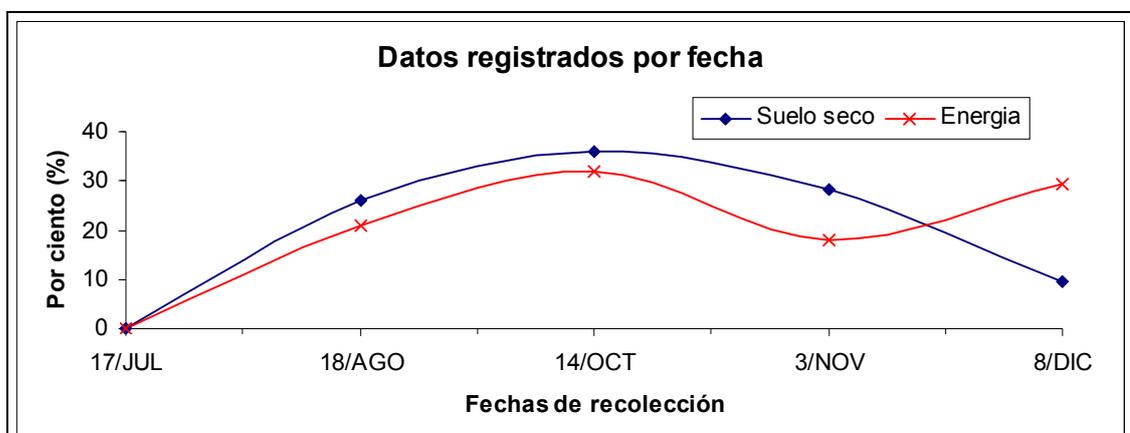


Figura A.11. Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela FM 0-15-2. Fuente. El autor.

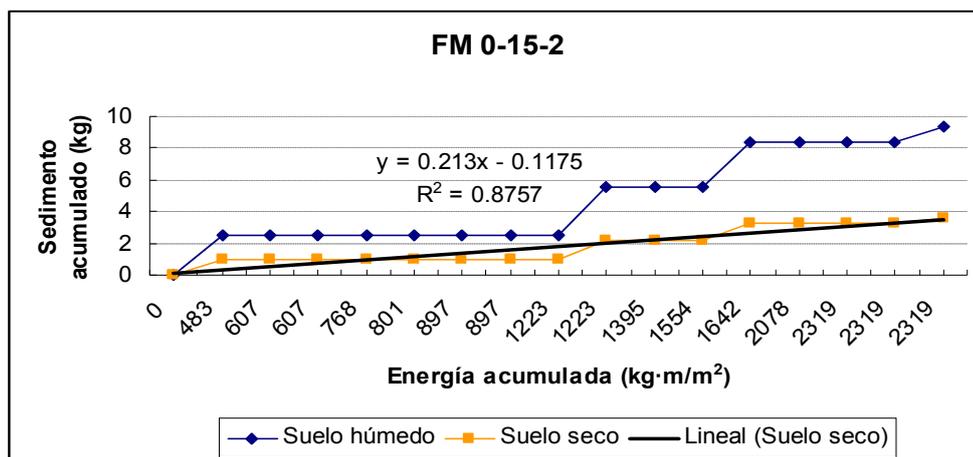


Figura A.12 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela FM 0-15-2, microcuenca media-alta. Fuente. El autor.

La parcela P 0-15 JM es un parche boscoso dentro de una finca ganadera en el cerro Chiripa. Hay en la transición del pasto al bosque hay una zona en la cual el ganado se refugia, y por pisoteo hay una capa muy suelta de suelo en sus primeros centímetros de profundidad, la cual es de fácil transporte por escorrentía. Esta parcela se encuentra en similares condiciones de cobertura del dosel de los árboles, árboles pequeños en crecimiento y cobertura de materia orgánica a las FM 0-15-1 y FM 0-15-2. Textura: Limoso. Fenómeno de erosión predominante: laminar.

Esta condición hizo que se recolectara 11,01kg de suelo seco. El contenido de humedad promedio es de 61,96%. Para un área de estudio de 811,92m² se tiene una producción total de 0,14 ton/ha.

Si bien hubo salpicadura cerca de la geomembrana, el efecto de la energía de la lluvia se enfocó en arrastrar el material susceptible en la zona de refugio del ganado, como se muestra en la Figura A.13. Se da un aumento de energía registrada de 482,72 kg·m/m² a 739,95 kg·m/m² (el pico de energía) con una producción de suelo respectiva de 1,57kg y 3,46kg (pico de sedimentación). En este punto se da el 45,69% de material sedimentado en el periodo de prueba con el 59,71% de la energía. Se mantuvo una relación entre energía y material sedimentado, con 88,34 kg·m/m² y 405,44 kg·m/m² de energía generando 1,28kg y 2.16kg de sedimento.

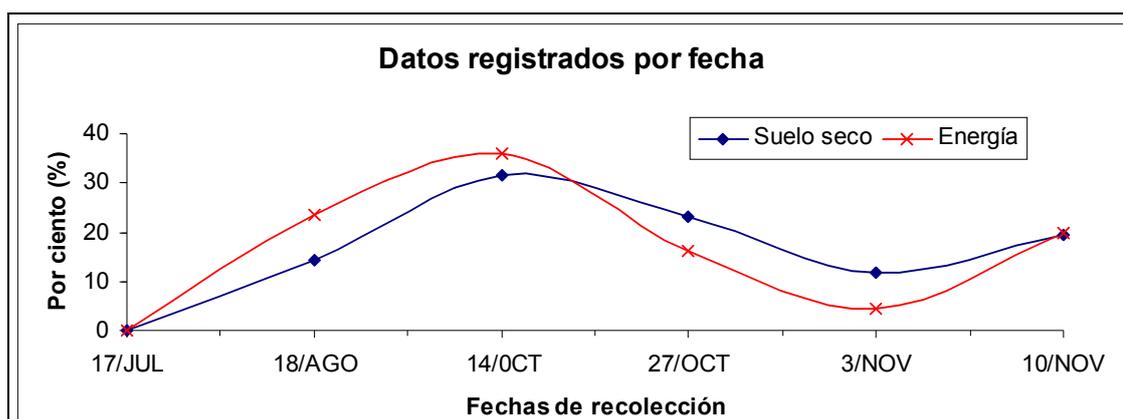


Figura A.13 Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela P 0-15 JM. Fuente. El autor.

La Figura A.14 muestra la cantidad de energía acumulada al 14 de octubre de 1222,67 $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ la cual produce 5,03kg de suelo. Luego se sigue dando un aumento gradual del material sedimentado ante pequeñas variaciones de energía. Es importante ver, hacia el final del periodo de evaluación, que la reducción dada de energía no influyó en el arrastre gradual de sedimentos a la geomembrana, lo cual se aprecia en los pequeños cambios de pendiente de la línea de suelo seco. La línea azul, suelo húmedo, indica debido a su separación con la línea de suelo seco, la cantidad de agua que ayudó a trasladar el material sedimentado.

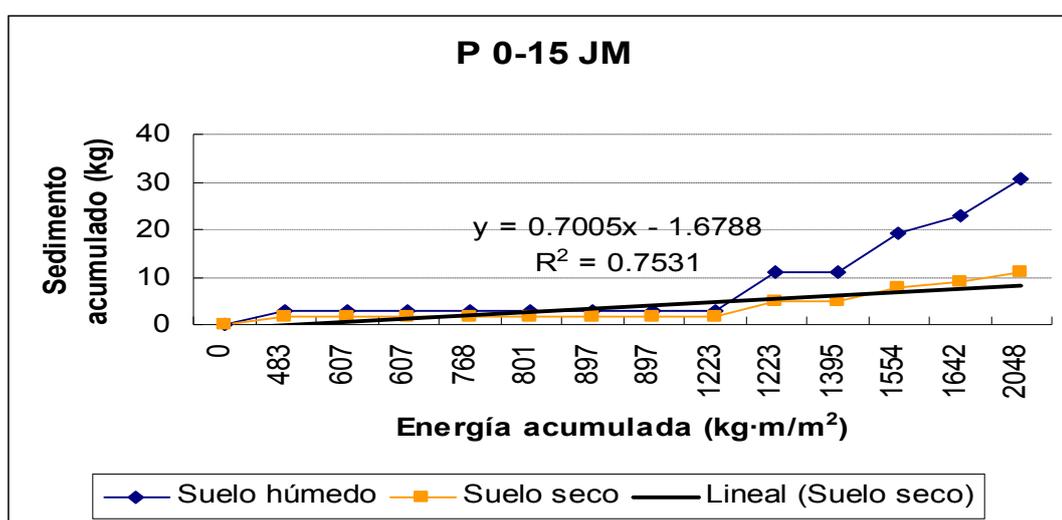


Figura A.14 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela P 0-15 JM, microcuenca media-alta. Fuente. El autor.

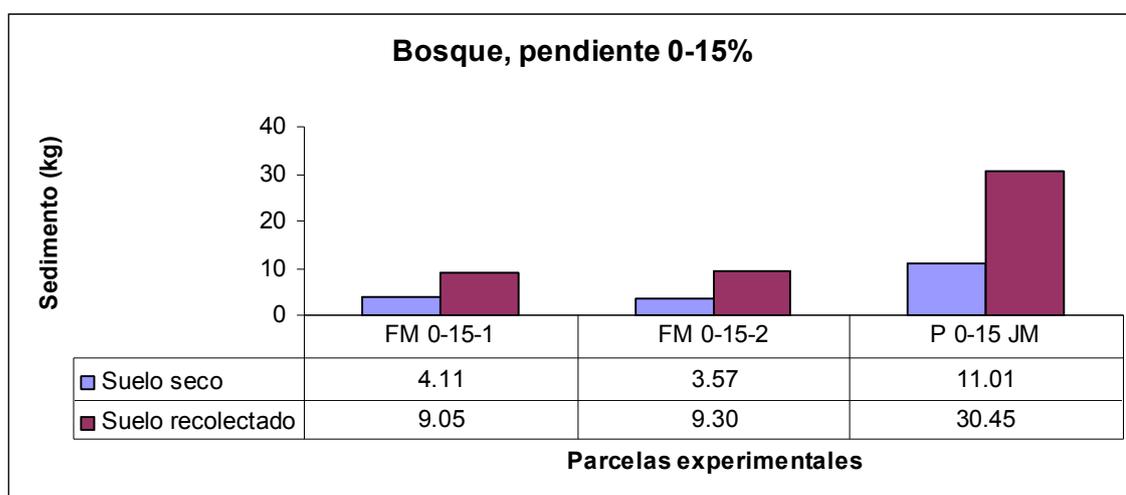


Figura A.15 Pérdida total de suelo en las parcelas experimentales de bosque en pendiente de 0%-15% de la microcuenca media-alta. Fuente. El autor.

En resumen las parcelas FM 0-15-1 y FM 0-15-2 se comportaron igual en cuanto a producción de sedimentos con un valor 0,03 ton/ha. La parcela P 0-15 JM se comportó distinta por la zona de transición entre el pasto y el bosque en donde siempre hubo material susceptible a ser arrastrada debido al pisoteo del ganado en esa zona la cual era usada como refugio.

La producción total neta de suelo en el tipo de uso de bosque y pendiente de 0%-15% es de 18,69kg. En promedio las tres parcelas producen 0,06 ton/ha. La producción total de sedimentos en el área de tipo de uso de bosque con pendiente de 0%-15% es de 38,22ton.

Las parcelas ubicadas en pendiente de 15%-30% se localizan en la finca municipal de Tilarán y están dentro del tipo de uso exclusivo de bosque en el Cerro Chiripa.

Parcela FM 15-30-1 posee una cobertura sobre su terreno en un 80% por presencia de hojas, ramas y un sotobosque bien establecido. El fenómeno de erosión predominante es el de salpicadura. En total se recolectó 4,23kg de suelo seco. Textura: limoso. El contenido de humedad es de 50,79%. Para el área de prueba de 227,79m² se tiene una pérdida de suelo de 0,02 ton/ha.

El material recolectado a la fecha del 18 de agosto corresponde al 43,97% (1,86kg) del total sedimentado y se acumuló por la acción de $1\,382,15\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$, un 54,38% de la energía dada en todo el periodo de prueba (Figura A.17) con una pendiente inicial bastante pronunciada. Se da una disminución del material recolectado debido a la reducción de las precipitaciones debido al fenómeno del Niño. La poca energía manifestada desprende material del suelo y por salpicadura acumula material en la geomembrana, pero no cuantificable por ser menos de un kilo y se muestra como una línea horizontal en la Figura A.17. Se mantiene una relación estrecha entre energía de la lluvia y material sedimentado pues se recolectan 1,36kg y 1,01kg en respuesta a las energías de $739,95\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ y $419,45\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ respectivamente (Figura A.16).

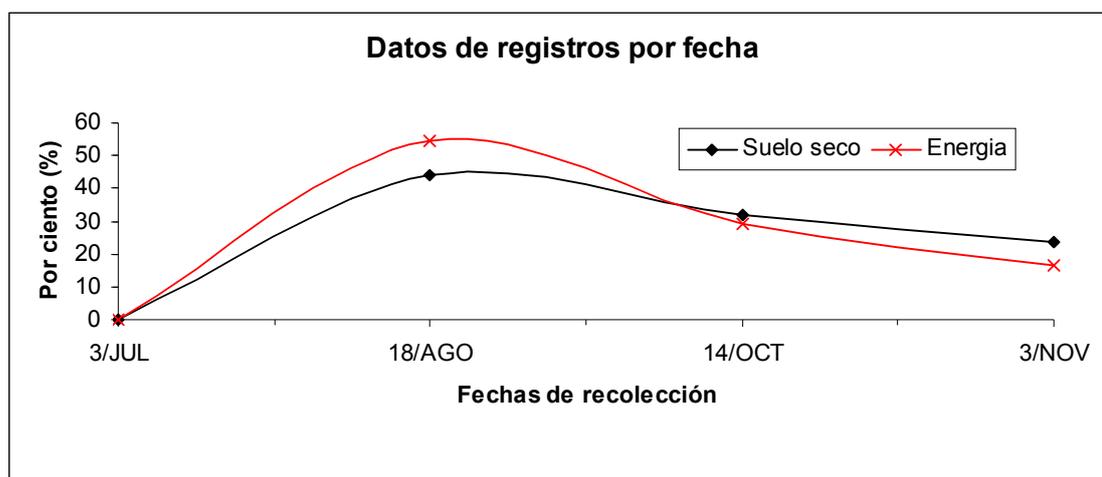


Figura A.16 Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela FM 15-30-1. Fuente. El autor.

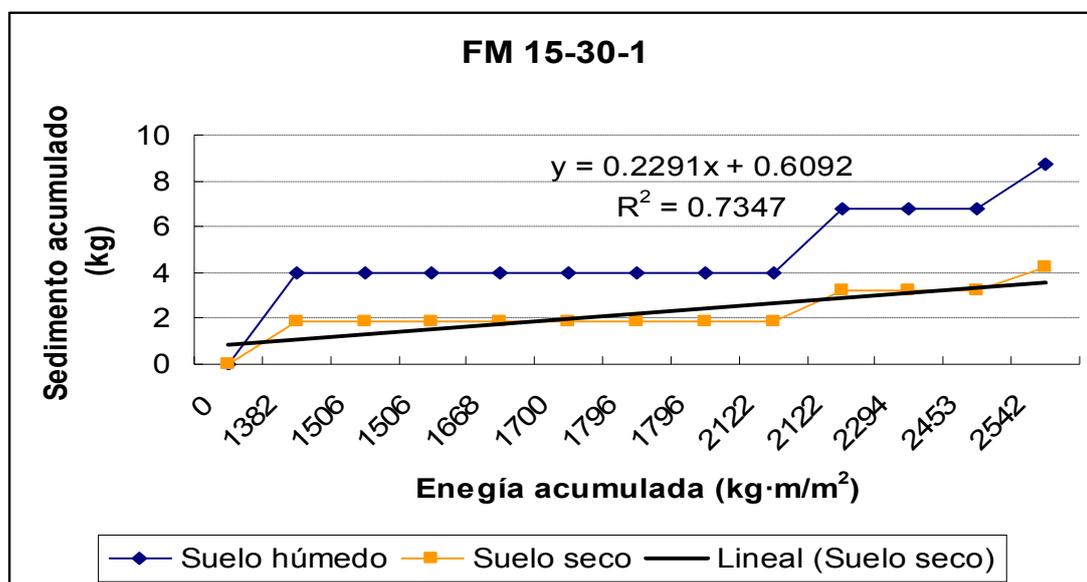


Figura A.17 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela FM 15-30-1, microcuencia media-alta. Fuente. El autor.

Parcela FM 15-30-2, presenta pobre condición de cobertura, 20% del suelo está cubierto por hojas en descomposición. No hay un sotobosque bien establecido que ayude en la protección del suelo. En total se recolectó 14,07kg de suelo seco. El contenido de humedad promedio es de 53,77%. En total se produce 0,01 ton/ha en un área de estudio de 1628,40 m². Textura: Limo-arenoso. El proceso de erosión se da por salpicadura.

Debido a la formación de grandes gotas en el dosel de los árboles, aún cuando la precipitación era garúa, la caída de estas fomentaban aún más el desprendimiento y salpicadura de partículas hacia la geomembrana.

En la gráfica de la Figura A.18 se muestra el comportamiento dado en la parcela. De las siete recolecciones dadas, el pico de energía y sedimento se dio el 18 de agosto con 1198,82 kg·m/m² y 4,61kg, mostrado con una fuerte pendiente inicial en la Figura A.19. Luego de eso la energía se mantuvo relativamente constante con valores de 318,14kg·m/m², 421,81 kg·m/m², 331,11 kg·m/m² y tasas de erosión promedio de 1,81kg a la fecha del 27 de octubre. Aunque la energía disminuyó a 88,34 kg·m/m² la tasa de erosión se mantuvo re-

lativamente constante, bajando a 1,39kg en la fecha del 3 de noviembre y siguió con la misma tendencia hasta el final del periodo de prueba. Todo este proceso se muestra en la Figura A.19, con cambios graduales en las pendientes hasta el final del periodo de prueba, donde se nota la correspondencia entre la energía de la lluvia dada y el sedimento producido con un $R^2 = 0,93$.

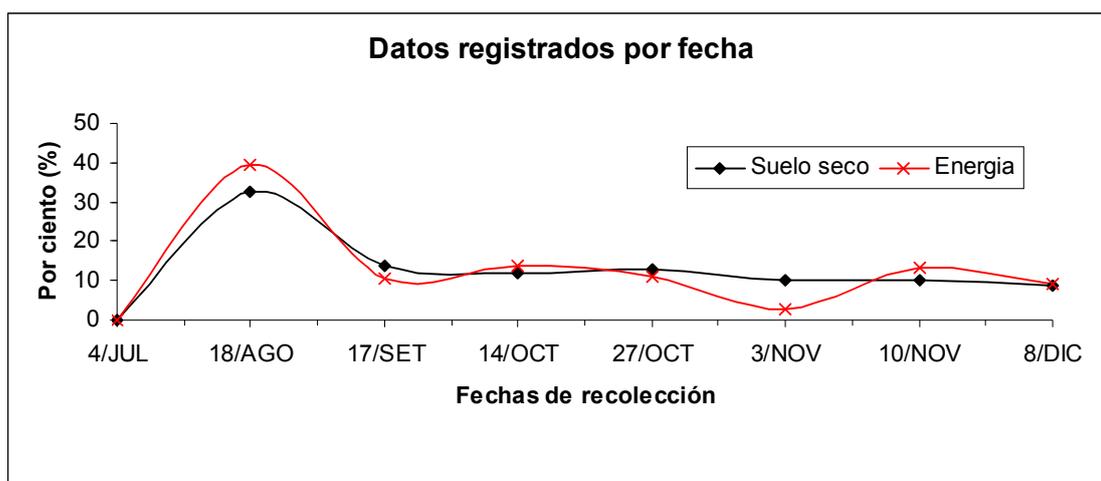


Figura A.18 Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela FM 15-30-2. Fuente. El autor.

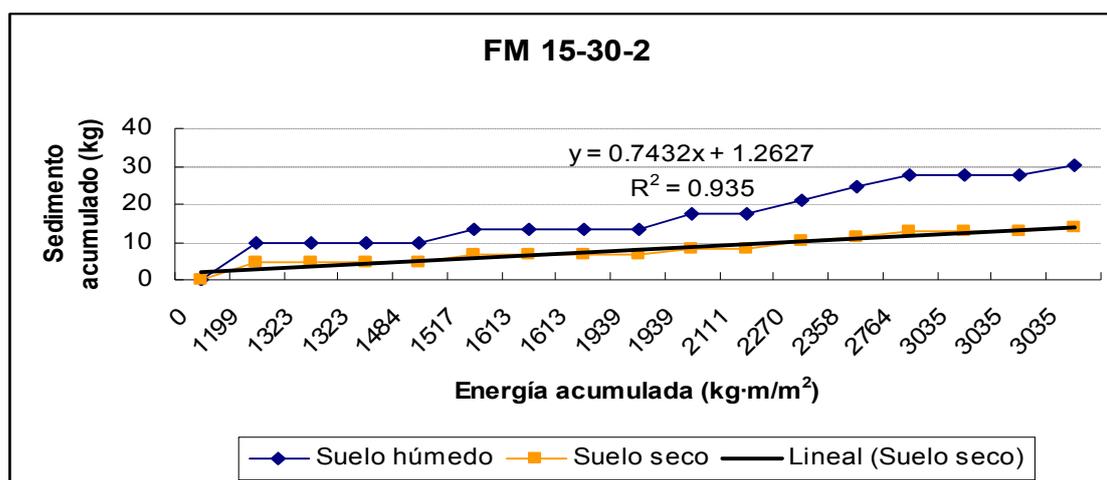


Figura A.19 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela FM 15-30-2, microcuencia media-alta. Fuente. El autor.

Parcela FM 15-30-3, presenta condiciones similares de cobertura vegetal que la parcela FM 15-30-2 (20% de cobertura y poca presencia de sotobosque). Además en su parte alta hay un hormiguero de gran dimensión. La parcela es atravesada por un cauce estacional que converge en el geotextil, lo que provoca que en cuatro semanas de recolección seguidas el material erosionado fuese difícil recoger pues aún no estaba totalmente sedimentado. La erosión fue de tipo laminar. Textura: Limo-arenoso.

Esta condición hizo que se recolectara 11,36kg de suelo seco. El contenido de humedad promedio es de 62,09%. Para un área de estudio de 613,62m² se tiene una producción total de 0,02 ton/ha.

La Figura A.20 muestra que el pico de energía se da en la fecha del 18 de agosto con un valor de 1 424,88 kg·m/m² que representa el 43,69% de toda la energía presentada. Esa energía no produjo el mismo efecto en el suelo seco recolectado, pues apenas representó el 20,33% (2,31kg). Después de esa fecha si hay una estrecha relación de la energía dada por la precipitación y la respuesta de los procesos erosivos de desprendimiento, traslado y sedimentación de partículas de suelo.

La Figura A.21 muestra el aumento paulatino que tuvo el material sedimentado con respecto a la energía. Es importante ver el cambio en la humedad del suelo recolectado en las últimas recolecciones (diferencia entre la línea de suelo seco y suelo húmedo) lo cual indica que la acción del agua fue la principal en el traslado de material a sedimentar.

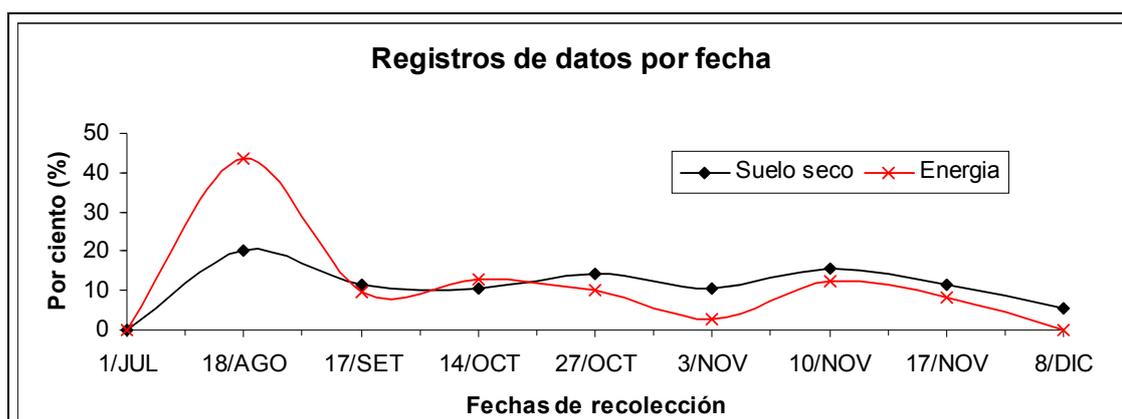


Figura A.20 Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela FM 15-30-3. Fuente. El autor.

La parcela FM 15-30-1 tiene buenas condiciones de cobertura sobre el terreno y sólo presentó erosión por salpicadura, con lo cual produce 4,23kg, que es la menor producción por peso de suelo seco por parcela, pues las parcelas FM 0-15-2 y FM 15-30-3 contabilizaron 14,07kg y 11,36kg de suelo seco, las cuales si tenían menos cobertura de materia orgánica sobre el terreno (Figura A.22). La producción total neta de suelo en el tipo de uso de bosque y pendiente de 15%-30% es de 29,66kg. En promedio las tres parcelas producen 0,15 ton/ha. La producción total de toneladas en el área de tipo de uso de bosque con pendiente de 0%-15% es de 69,86ton.

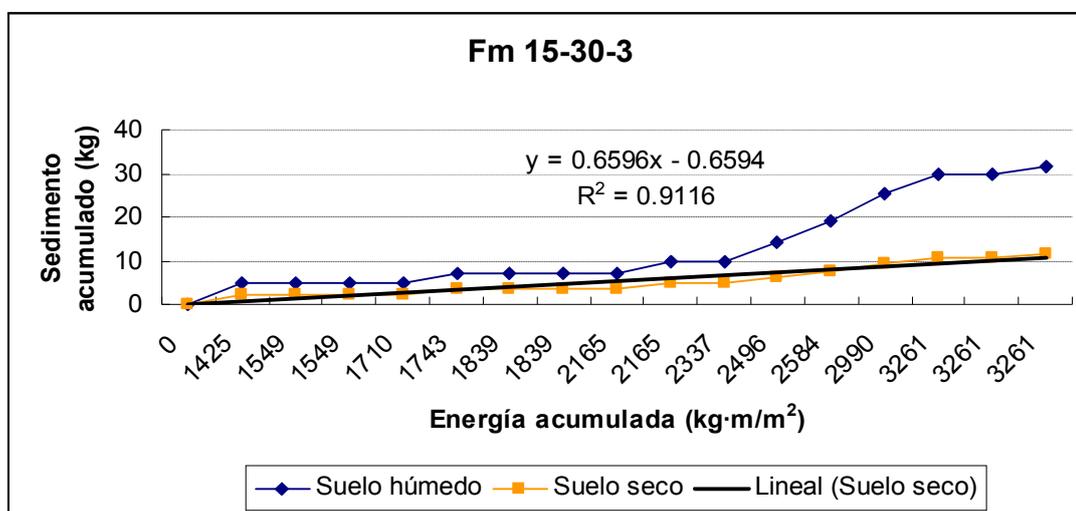


Figura A.21 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela FM 15-30-3, microcuencia media-alta. Fuente. El autor.

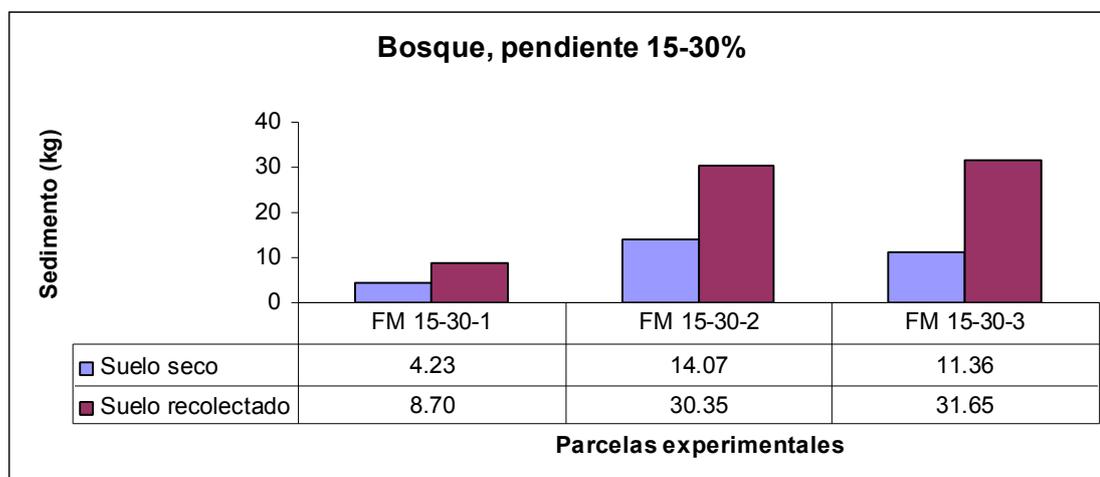


Figura A.22 Pérdida total de suelo en las parcelas experimentales de bosque en pendiente de 15%-30% de la microcuenca media-alta. Fuente. El autor.

Las parcelas de bosque en pendiente de 30%-45% se distribuyen de la siguiente manera: dos en la finca municipal de Tilarán en el cerro Chiripa, dentro del uso exclusivo de bosque, y una en una finca ganadera y es un parche boscoso que funciona como refugio para el ganado.

Parcela FM 30-45-1, se ubica pendiente debajo de la parcela FM 15-30-3 y presenta condiciones similares, 20% de cobertura de hojas y troncos y poco sotobosque establecido. Por esta parcela continúa el cauce estacional indicado en la parcela FM 15-30-3. En total se recolectó 7,23kg de suelo seco. El contenido de humedad promedio del suelo recolectado es de 77,66%. Para el área de prueba de 525,62m² se tiene una pérdida de suelo de 0,01ton/ha. La erosión laminar fue la predominante. Textura: Limoso.

La parcela presentó mucha escorrentía por su forma particular y se comporta totalmente distinta a la tendencia que han mostrado las demás en cuanto al efecto que la energía produjo en el material sedimentado, pues siempre el pico de energía inicial, en este caso el 18 de agosto, producía el pico de material sedimentado en la geomembrana. En este caso (Figura A.23) el material sedimentado no muestra un pico y se mantiene relativamente constante desde la fecha del 18 de agosto al 27 de octubre en 0,66kg, 0,67kg y 0,35kg, aún

cuando en este lapso se dan las mayores energías en todo el periodo de prueba, con $1424,88 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$, $739,95 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ y $331,11 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{m}^2$. Los contenidos de humedad de las muestras de las fechas antes dichas son altos, $71,50\%$, $72,20\%$ y $82,28\%$, por lo cual el material en la geomembrana se encontraba muy acuoso y era difícil su recolección, al punto que en la geomembrana siempre quedó material sedimentándose. Para las últimas fechas, donde la energía de la lluvia disminuye, pero no así la precipitación, el estado del material sedimentado seguía siendo acuoso presentándose los mayores contenidos de humedad, $82,80\%$, $81,45\%$, $80,17\%$ y $73,22\%$, lo cual influye en que mucho del material en la geomembrana no se pueda recoger porque prácticamente el agua estaba empozada en el geotextil. A la fecha del 24 de noviembre es posible recolectar todo el material de la geomembrana la cual acumuló por varias fechas material sedimentado producto de precipitaciones pasadas, alcanzándose el $43,85\%$ ($3,17\text{kg}$) del material sedimentado.

Como se indicó anteriormente, se ve la acción del agua como agente erosivo en el desprendimiento y traslado de material a la geomembrana en las fechas finales de prueba, donde se da un aumento del contenido de humedad de las muestras, mostrado en la Figura A.24 con la separación entre las líneas de suelo seco y suelo húmedo.

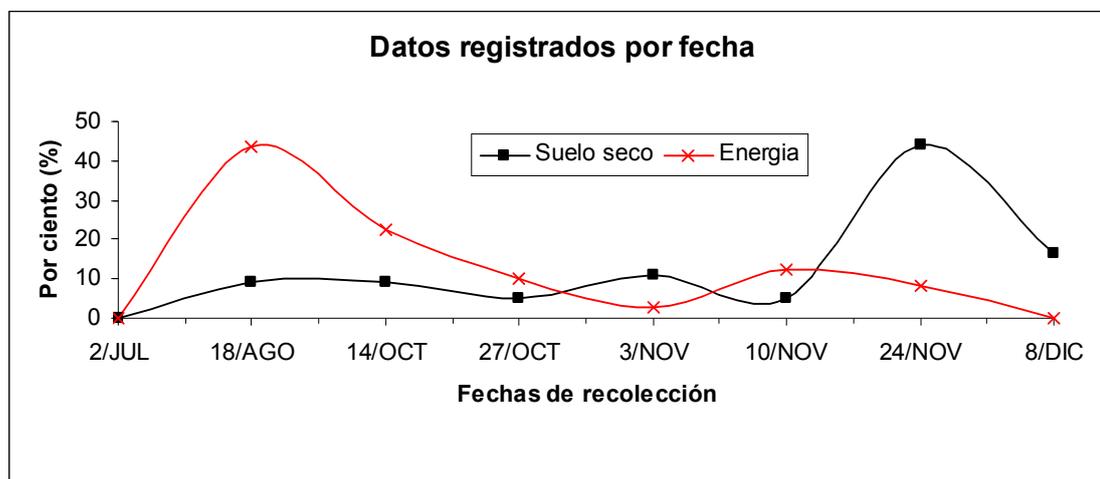


Figura A.23 Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela FM 30-45-1. Fuente. El autor.

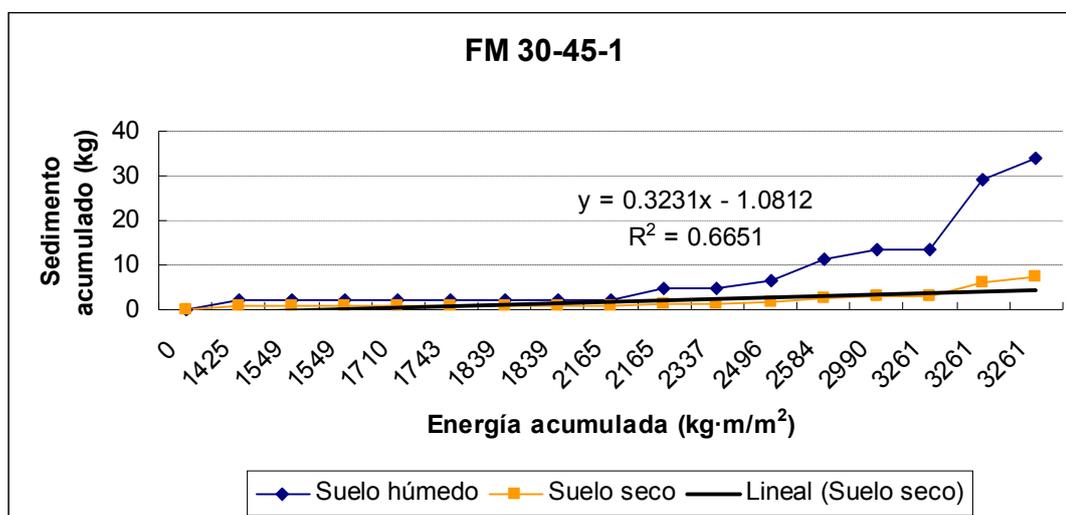


Figura A.24 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela FM 30-45-1, microcuenca media-alta. Fuente. El autor.

La parcela FM 30-45-2 presenta buena cobertura vegetal hojas en superficie del suelo. El proceso de erosión por salpicadura fue el que dominó. En total se recolectó 27,22kg de suelo seco. El contenido de humedad promedio es de 55,04%. En total se produce 0,20 ton/ha en un área de estudio de 1 376,01 m². Esta parcela se caracterizó por su gran extensión y longitud de geomembrana. Textura: Limo-arenoso.

El proceso de erosión se mantuvo a una tasa relativamente constante durante el periodo de prueba, pues no se produjo un pico de erosión en la fecha del 18 de agosto, en donde, para una energía de 1 198,82 kg·m/m² se recogió en el geotextil 4,85kg, mientras que la fecha del 14 de octubre para una energía de 421,81 kg·m/m² se recolectó 5,11kg, más material que para la fecha del 18 de agosto aún cuando la energía presentada el 14 de octubre es el 35% de la primera. Se nota además el periodo donde afectó el fenómeno del Niño, tiempo en el que la línea de energía muestra gran relación con el material sedimentado. Esta tasa erosiva constante se nota en la Figura A.26 con un $R^2 = 0,92$ y aumentos graduales del sedimento acumulado con respecto a la energía acumulada.

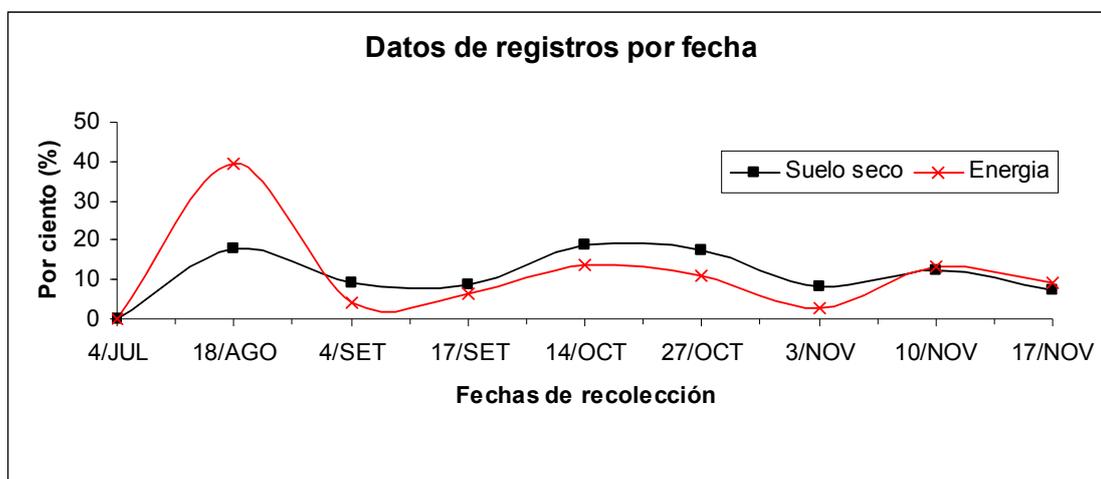


Figura A.25 Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela FM 30-45-2. Fuente. El autor.

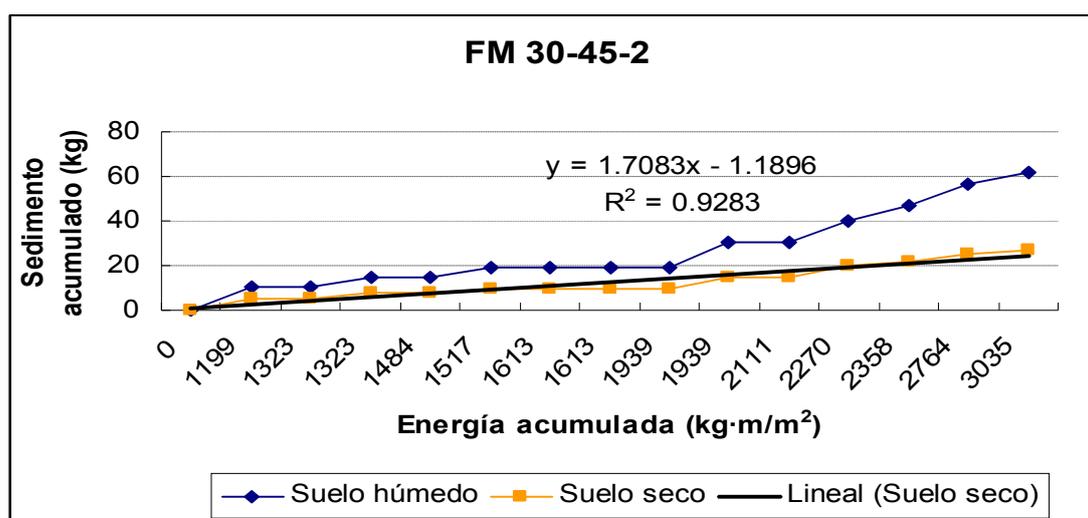


Figura A.26 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela FM 30-45-2, microcuencia media-alta. Fuente. El autor.

Parcela P 30-45 JM, presenta buena cobertura del terreno con pequeños arbustos y árboles establecidos. El principal proceso de erosión es el de salpicadura. En ella se recolectó 21,40kg de suelo seco, los cuales para una extensión de área de estudio de 443,54m² produ-

cen una pérdida de suelo de 0,48 ton/ha. El contenido de humedad promedio es de 38,37%. Textura: Limo-arenoso.

Esta parcela presenta una relación estrecha entre la energía y la erosión presentada. En la Figura A.27 se ve que con cada pico de energía dado se da un pico de material sedimentado en la geomembrana. Ejemplo de la relación tan cercana entre energía y suelo sedimentado se tiene la fecha del 18 de agosto en donde un 20,81% de la energía ($482,72 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$) produce el 23,74% de suelo seco (5,08kg). Esta estrecha relación queda confirmada con el $R^2 = 0,94$ de la Figura A.28.

En resumen para las pendientes entre 30%-45%, las parcelas P 30-45 JM y FM 30-45-2 son las que presentan mejor cobertura sobre el terreno de prueba. Sin embargo son los que más producen pérdida de suelo seco neto, 36,00kg y 61,45kg respectivamente.

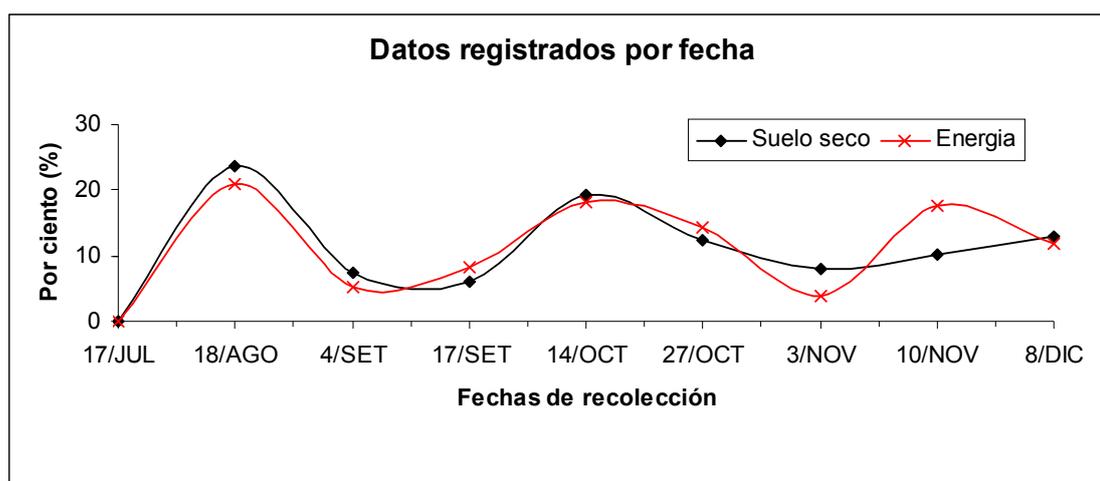


Figura A.27 Variación de la energía de la lluvia y su influencia en la producción de sedimentos con respecto al tiempo de la parcela P 30-45 JM. Fuente. El autor.

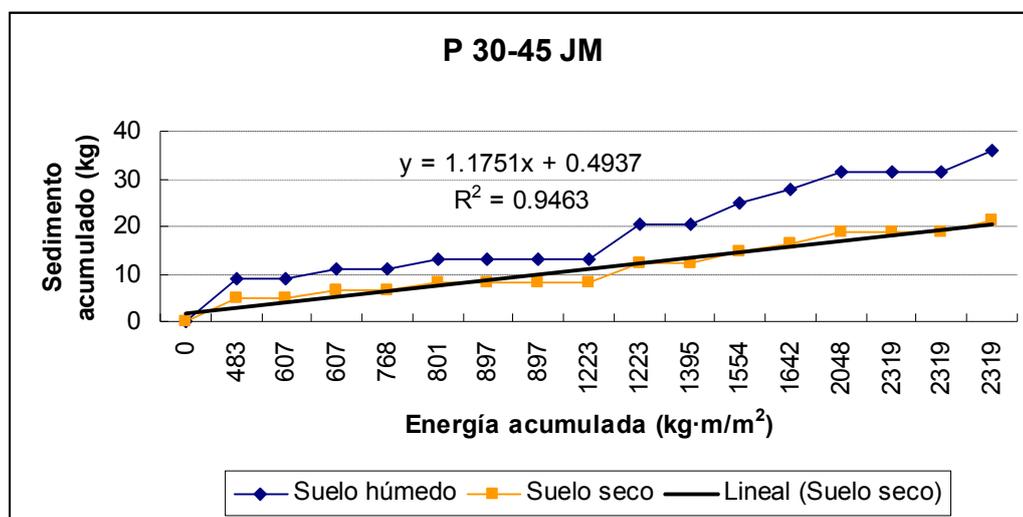


Figura A.28 Tasa de acumulación de sedimento en función de la energía de la lluvia para la parcela P 30-45 JM, microcuencia media-alta. Fuente. El autor.

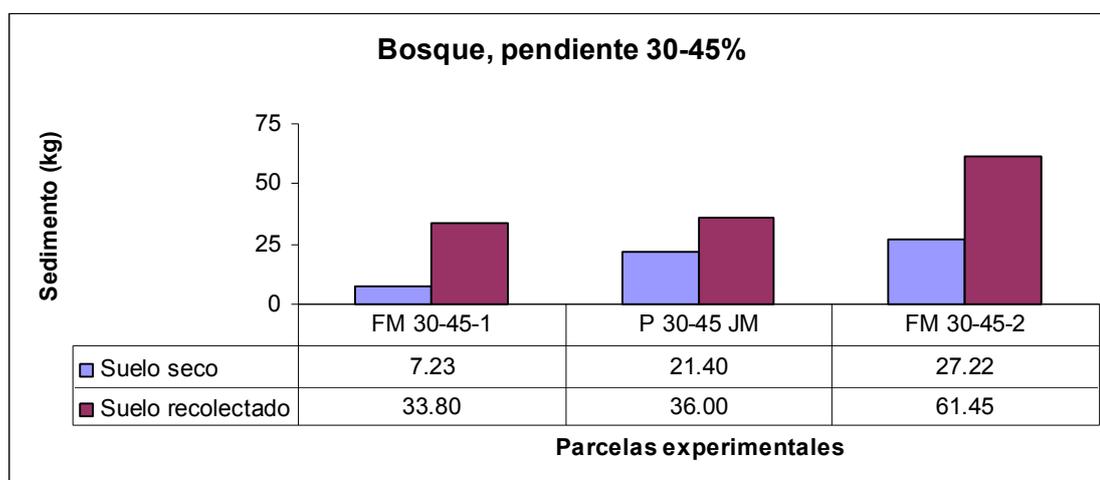


Figura A.29 Pérdida total de suelo en las parcelas experimentales de bosque en pendiente de 30%-45% de la microcuencia media-alta. Fuente. El autor.

La producción total neta de suelo en el tipo de uso de bosque y pendiente de 30% - 45% es de 55,85kg. En promedio las tres parcelas producen 0,27 ton/ha. La producción total de sedimentos en el área de tipo de uso de bosque con pendiente de 30%-45% es de 39,03ton. La parcela con mayor tasa erosiva es la P 30-45 JM con 0,48 ton/ha.

Tabla A.1 Valores totales encontrados para las parcelas de bosque en la microcuenca media-alta.

Pendiente (%)	Parcela	Área (m ²)	Suelo recolectado (kg)	Erosión (t/ha)	Promedio (ton/ha)	Área total (ha)	Sedimento total (ton)
0-15	FM 0-15-1	1438,52	4,11	0,03	0,06	596,09	38,22
	FM 0-15-2	1267,57	3,57	0,03			
	P 0-15 JM	811,92	11,01	0,14			
15-30	FM15-30-1	227,79	4,23	0,19	0,15	458,40	69,87
	FM 15-30-2	1628,40	14,07	0,09			
	FM 15-30-3	613,62	11,36	0,19			
30-45	FM 30-45-1	525,62	7,23	0,14	0,27	143,18	39,03
	P 30-45 JM	443,54	21,40	0,48			
	FM 30-45-2	1376,01	27,22	0,20			

Las parcelas de bosque de la microcuenca media-alta se tiene que la producción de erosión varía según la pendiente de la misma. Queda demostrado que conforme esta aumenta, la cantidad de material erosionado aumenta. Para pendientes de 0%-15% se tiene una producción de 0,06 ton/ha, para pendientes de 15%-30% se tiene una producción de 0,15 ton/ha y por último se da una producción de 0,27 ton/ha para pendientes entre 30%-45%.

ANEXO F. Análisis de las parcelas ubicadas en taludes de caminos de la microcuenca del río Santa Rosa

F.1 - Ruta N° 926: El Silencio-Tilarán

Deslizamiento D01, cuenta con un área de estudio de 81,02m² dentro de un área de 929,88m² total de talud. Durante todo el periodo de prueba se recolectó 2 096,86kg, los cuales presentaron, según las condiciones de precipitación, contenidos de humedad muy variables. Hubo días que el material recolectado correspondía a partículas desprendidas en el talud que por la acción del viento llegaban a la geomembrana, así como otras ocasiones donde se apreciaba claramente la acción del agua en el traslado del material hacia el geotextil. El efecto del fenómeno del Niño tuvo mucho que ver en esta variabilidad. Por ejemplo, con los contenidos de humedad menores (7%-9%) el material recolectado era producto de partículas desprendidas en el talud por la fuerza del viento. El otro proceso de erosión dado fue por surcos o regueros. El contenido de humedad promedio es de 27,79% con una desviación estándar de 9,56. El suelo seco neto perdido es de 1 396,60kg. Textura: Arcillo-limoso.

La Figura A.30 muestra el comportamiento que tuvo el talud con respecto a la energía de la lluvia y el material sedimentado en la geomembrana. Como se ve semana a semana fue necesario limpiar el geotextil aún cuando las precipitaciones bajaron, representado en la gráfica con la línea de Energía desde el 29 de julio al 28 de setiembre, fecha donde se empieza a dar un pequeño repunte en las precipitaciones. Al principio de la evaluación se presentaron fuertes precipitaciones que desprendieron y arrastraron alrededor el 45% del material recolectado en la geomembrana. Luego la reducción en las precipitaciones ocasionó que disminuyeran las tasas de erosión entre el 29 de julio y 28 de setiembre. Es importante notar que el 28 de agosto y el 11 de setiembre se dan picos de erosión ante poca energía, pero se debe a que el suelo presentaba susceptibilidad a ser transportado por el viento pues las lluvias dadas anteriormente desprendieron partículas de suelo. Luego para el 6 de noviembre se intensifican las precipitaciones con un claro aumento en la tasa erosiva.

La producción total de esta parcela es de 172,39 ton/ha, por lo tanto considerando toda el área del talud, se tiene que este punto produce 16,02ton.

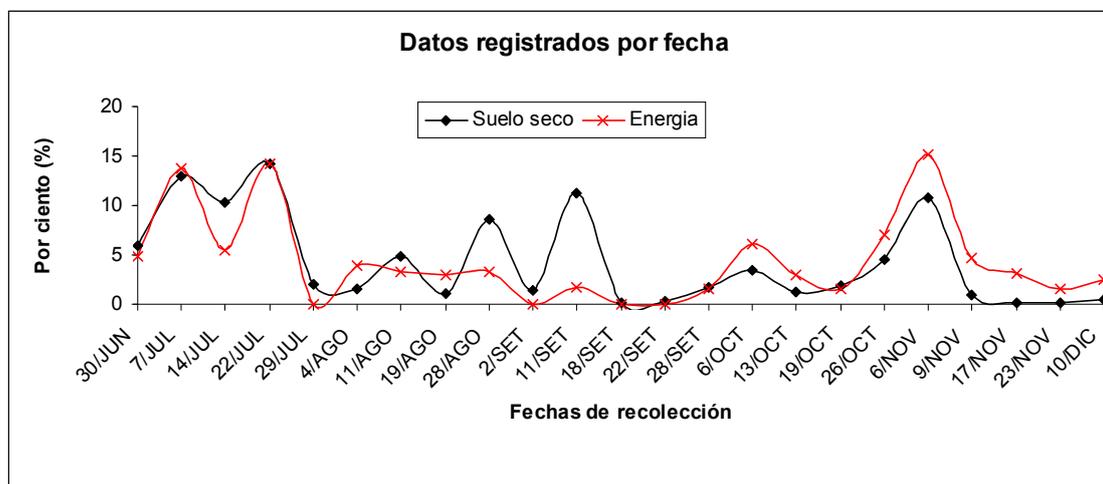


Figura A.30 Comportamiento semanal de energía y suelo recolectado de la parcela D01.

Fuente. El autor.

Deslizamiento D02, tiene un área de 616,67m² de los cuales solo 50,29m² son evaluados. Los contenidos de humedad presentan gran variabilidad por la inconsistencia en las precipitaciones y la presencia del fenómeno del Niño, visible en la Figura A.31 de la fecha 29 de julio al 19 de octubre. La cantidad total de suelo recolectado es de 1 300,78kg con un contenido de humedad de 26,28% y desviación estándar de 6,83. El suelo neto perdido es 949,80kg. Textura: Arcillo-limoso.

La Figura A.31 muestra entre las fechas del 23 de junio al 22 de julio precipitaciones que provocan el 41,05% del material recolectado en todo el estudio. Luego se ve el efecto del fenómeno del Niño con la reducción de la línea de energía, lo cual provoca una reducción en las tasas de erosión desde la fecha del 29 de julio al 19 de octubre, viendo que el 18 de setiembre se da un pico de erosión, esto debido a que las energías dadas anteriores a esta fecha desprendieron material que fue arrastrado por acción del viento o una precipitación leve. A partir de finales de octubre se da un repunte en las precipitaciones acompañado por un pequeño repunte en la tasa de erosión.

La producción total de esta parcela es de 188,86 ton/ha, por lo cual considerando toda el área afectada en este punto se alcanza un total de 11,64 ton.

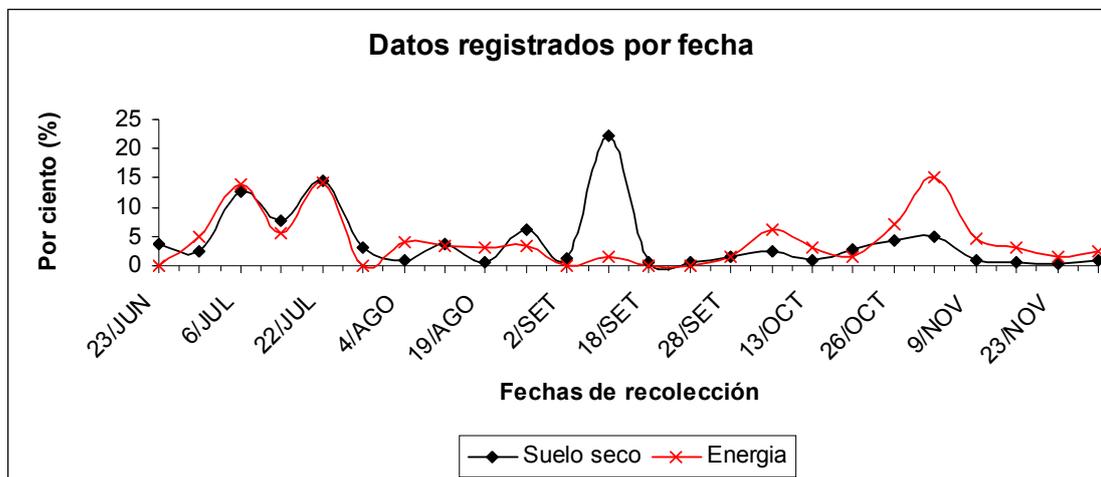


Figura A.31 Comportamiento semanal de energía y suelo recolectado de la parcela D02.

Fuente. El autor.

Deslizamiento D03, tiene un área total de 22,55m². Se recolectó en total 203,70kg con un contenido de humedad promedio de 26,50% y una desviación estándar de 7,85. La cantidad neta de suelo perdido es de 141,62kg. Textura: Limo-arcilloso.

La Figura A.32 muestra el comportamiento dado en la parcela D03, el cual a diferencia de la parcela D01 y D02, la frecuencia semanal de recolección de material disminuye debido a la menor área de estudio, pero aún así manteniéndose la tendencia. Se puede ver que del 30 de junio al 29 de julio, como respuesta a las precipitaciones dadas, se recolecta el 47,52% del material en el periodo de prueba. Luego se da la disminución de las precipitaciones debido al efecto del Niño desde el 29 de julio hasta finales de octubre, dándose el 11 de setiembre un repunte en el material erosionada debido a que las energías anteriores a esa fecha desprendieron material que no fue trasladado si no hasta esa fecha.

La producción total en este punto es de 62,80 ton/ha, dando un total de 0,14ton para todo el periodo de estudio.

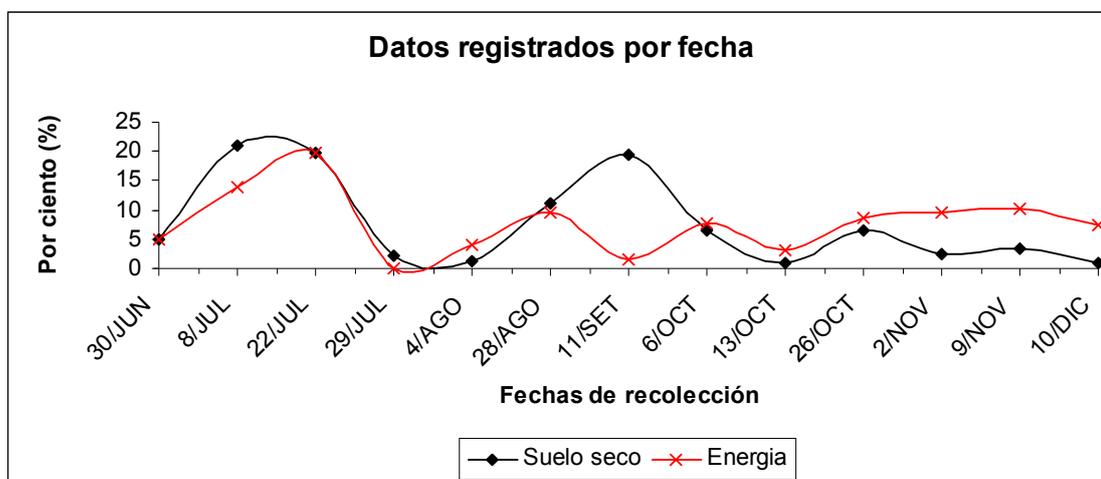


Figura A.32 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela D03. Fuente. El autor.

Deslizamiento D04, es el más pequeño en área de todas las parcelas ubicadas en la Ruta N° 926 El Silencio-Tilarán, con una extensión de 9,09m² los cuales son una pequeña porción del total del área afectada en ese punto, la cual es de 154,89m². Se recolectó en total 50,99kg con un contenido de humedad promedio de 29,17% y una desviación estándar de 6,61. Esta variabilidad alta se explica por la reducción dada en las precipitaciones debido al fenómeno del Niño, la acción del viento y la lluvia como agente erosivo y el área de la parcela la cual influyó en disminuir la frecuencia de recolección de material. El suelo seco perdido es de 36,63kg. Textura: Limo-arcilloso.

La Figura A.33 muestra el comportamiento del suelo sedimentado de la parcela D04, el cual si es distinto al mostrado por las parcelas D01, D02 y D03. Como se ve, la energía sigue teniendo el mismo comportamiento, pero su efecto sobre el terreno se comporta distinto, pues en el primer pico de energía, del 30 de junio al 29 de julio, apenas se recolecta un 28,80% del material en todo el periodo de prueba. En esta parcela se muestra un desfase entre la energía y el suelo sedimentado, pues como se observa, el 11 de agosto se da un pico de sedimento en época donde la precipitación es poca debido al fenómeno del Niño, lo cual indica que la energía antes de esa fecha se enfocó en desprender material y no así a

transportarlo. A finales de octubre se da un repunte en las precipitaciones pero no afectan drásticamente en las tasas de erosión.

La producción total en la parcela D04 es de 40,29 ton/ha, dando un total de 0,62ton, para el área total de deslizamiento de 154,89m².

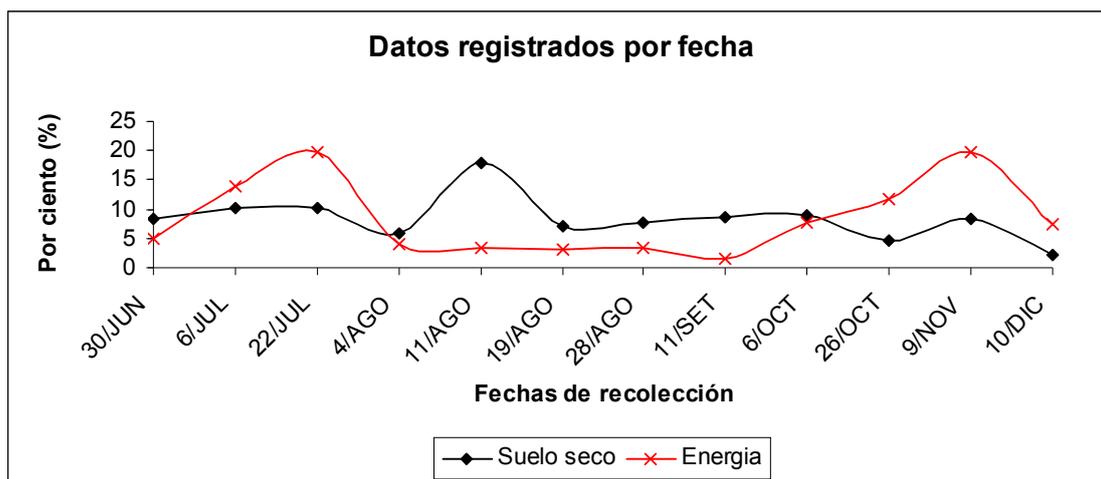


Figura A.33 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela D04. Fuente. El autor.

Deslizamiento D05, con 23,53m² presenta una condición distinta a las demás parcelas. Mientras que las otras presentaban condiciones de cobertura nula, la parcela D05 tenía un pequeño “buffer” al pie del geotextil. Esto produjo que de todas las parcelas, la D05 recolectara apenas 8,86kg con una muy baja frecuencia de recolección de sedimentos, a pesar de estar bajo la misma influencia de precipitación y lluvias. El contenido de humedad es de 16,64% con una desviación estándar de 3,88. El suelo seco perdido total es de 7,36kg. Textura: Areno-arcilloso.

La Figura A.34 muestra el comportamiento de la parcela D05 donde se puede ver que desde inicio hasta el 29 de julio se recolecta el 46,47% del material sedimentado en todo el periodo de prueba influenciado por las precipitaciones dadas en esas fechas. A partir del 29 de julio se da la disminución de las lluvias debido al fenómeno del Niño lo cual produjo que la cantidad recolectada fuera mínima, con el plus del “buffer” que tiene la parcela.

La producción total de la parcela es de 3,13 ton/ha, por lo cual para toda el área del talud se tiene un total de 0,01ton.

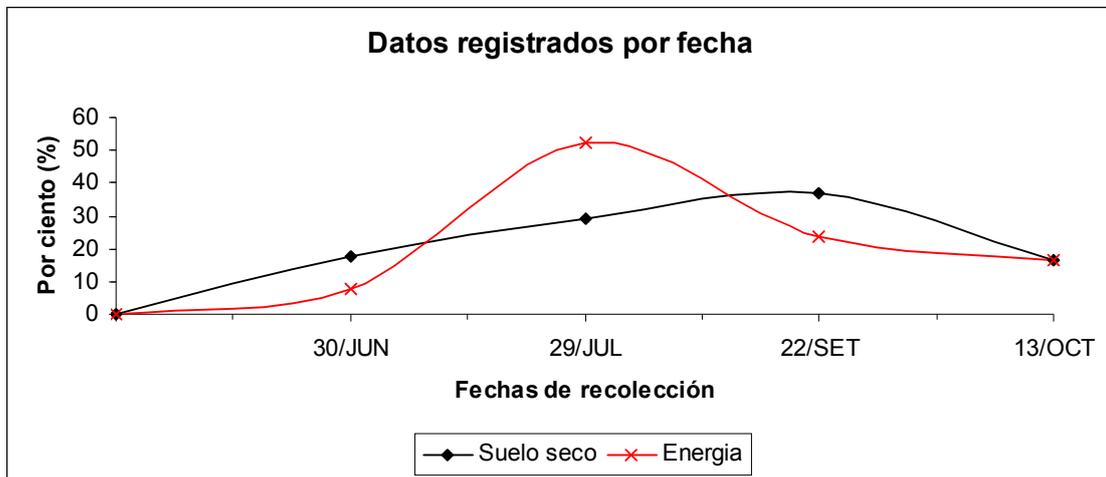


Figura A.34 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela D05. Fuente. El autor.

En resumen, los taludes en la Ruta N° 926 producen un total de 28,45ton en un área total de 1 747,52m², pero por parcela y condición particular de área y producción de sedimentos se producen 467,46 ton/ha. La Figura A.35 muestra los datos finales de los taludes.

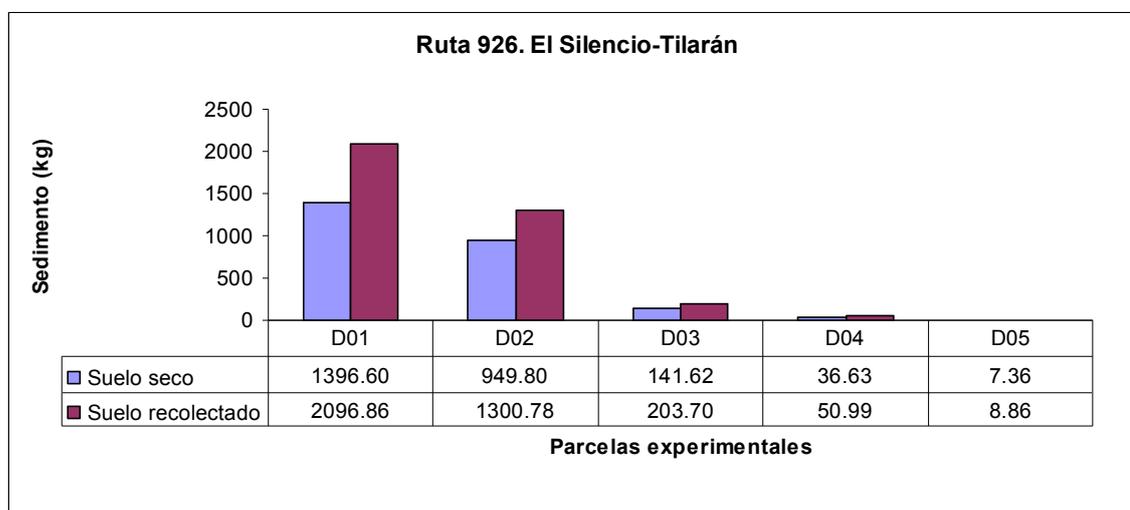


Figura A.35 Resultados de las parcelas de la Ruta N° 926 El Silencio-Tilarán. Fuente. El autor.

F.2 - Ruta N° 142: Cañas-Tilarán-La Fortuna

F.2.1 Cañas-Tilarán

Deslizamiento C-T 01, cuenta con un área de estudio de 89,79m² el cual es una pequeña porción del talud total en ese punto el cual cubre un área de 534,73m². Durante todo el periodo de prueba se recolectó un total de 658,15kg, los cuales presentaban, según las condiciones de precipitación dadas durante la semana de recolección, contenidos de humedad muy variables. En periodos secos durante el estudio debido al efecto del fenómeno del Niño, las cantidades recolectadas estaban en función de las partículas desprendidas sobre el terreno y la acción del viento. Estas muestras contenían pequeñas cantidades de humedad, entre 6% a 12%, mientras que las muestras obtenidas cuando se daban los eventos de precipitación comunes en la época de invierno, los contenidos de humedad aumentaban hasta un 34% o 36%. Ante esto, el contenido de humedad promedio es de 22,83% y una desviación estándar de 10,48. El suelo seco perdido es de 459,71kg. Textura: Arcillo-arenoso.

La Figura A.36 muestra el comportamiento que tuvo el talud con respecto a la energía de la lluvia y el material sedimentado en la geomembrana. El fenómeno del Niño afectó con pocas precipitaciones desde el mes de julio a inicios del mes de octubre, como se mues-

tra en la gráfica desde el 11 de agosto al 10 de setiembre, donde las cantidades recolectadas de sedimento son apenas el 15,61% del materia recolectado en la parcela. En octubre hubo un repunte en las precipitaciones, por lo cual se dio un aumento en las tasas de erosión y se recolectó solo en ese mes un 36,80% del total sedimentado. Para noviembre y diciembre se disminuyen las precipitaciones características de la zona por la entrada de la estación seca, pero estas son suficientes para desprender en noviembre el 36,54% del material.

La producción total para esta parcela es de 51,20 ton/ha, por lo tanto considerando el área total del talud, se tiene que este punto produce 2,73ton.

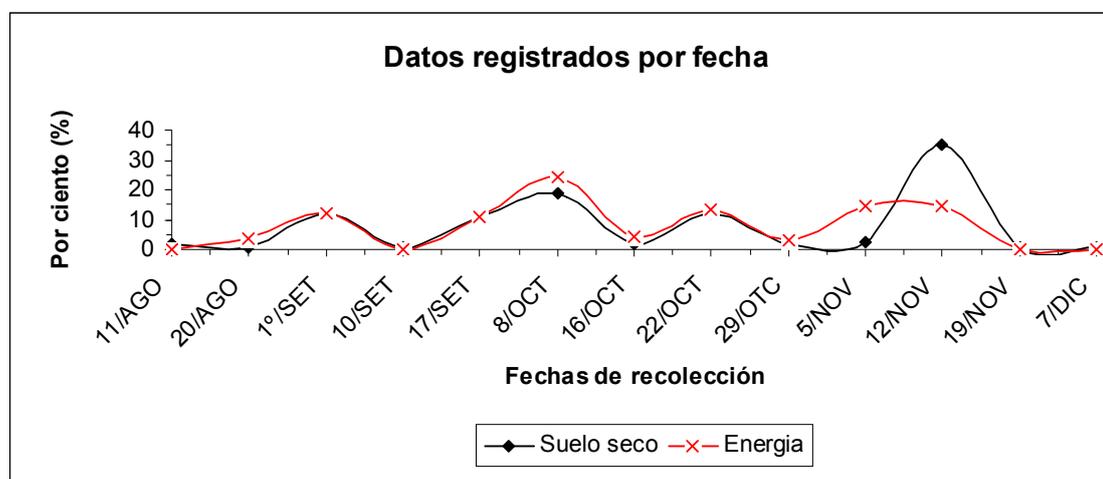


Figura A.36 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela C-T 01. Fuente. El autor.

Deslizamiento C-T, 03 tiene un área total de deslizamiento de 51,48m². Similar a lo explicado para la parcela C-T 01, el contenido de humedad por muestra varía según las precipitaciones dadas por semana de recolección, en este caso el promedio es de 24,94% con una desviación estándar de 6,63. La cantidad total de suelo recolectado es de 996,70kg y la cantidad neta de suelo es 728,38kg. Textura: Arcillo-arenoso.

La Figura A.37 muestra el comportamiento del talud C-T 03 durante el periodo de prueba. A pesar que se encuentra cerca y que fue instalado en la misma fecha que el C-T 01 los resultados fueron muy distintos. Esta parcela se vio más afectada por el fenómeno del

Niño (manifestando un periodo seco de finales de julio a inicios de octubre), pues la primera vez que fue necesario recolectarla fue el 1° de setiembre. En el mes de setiembre se recolectó el 20,35% del total sedimentado en la parcela. En octubre se da un repunte en las lluvias y se recolecta el 38,89% del material. Estas precipitaciones a la vez dejaron susceptible el suelo, y ante un evento de precipitación dado en noviembre, se produjo el restante 40% del sedimento. Después de noviembre no se volvió a recolectar material debido a la reducción de las precipitaciones.

La producción total de esta parcela es de 141,50 ton/ha, lo cual son 0,72ton.

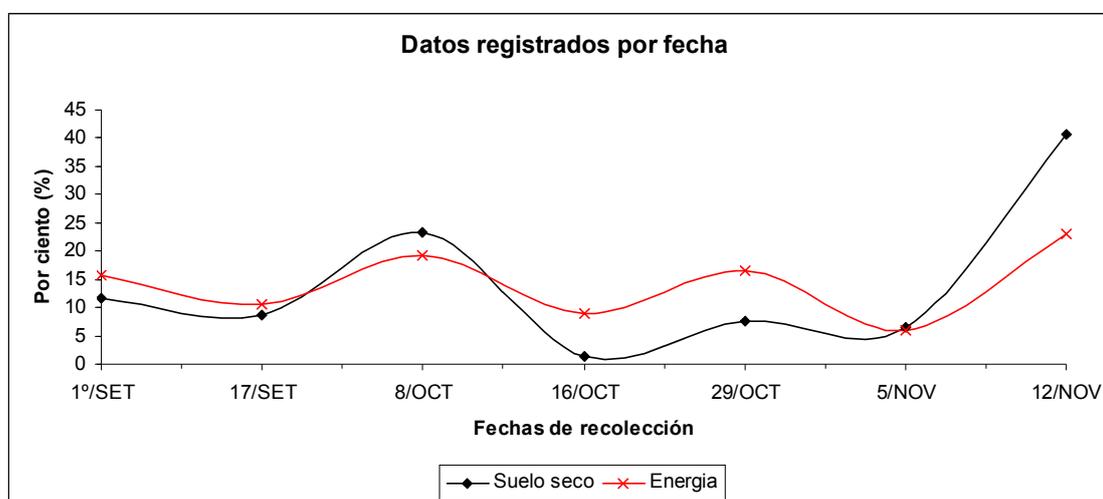


Figura A.37. Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela C-T 03. Fuente. El autor.

Deslizamiento C-T 06, es el más pequeño en área de todas las parcelas ubicadas en la Ruta N° 142 del tramo Cañas-Tilarán, con una extensión de 36,53m² los cuales son una porción del total del área afectada en ese punto, la cual es de 53,53m². Se recolectó en total 325,40kg con un contenido de humedad promedio de 27,27% y una desviación estándar de 7,65. El suelo seco total perdido es 223,68kg.

La Figura A.38 muestra el comportamiento del suelo sedimentado de la parcela C-T 06. Esta parcela recibe las lluvias de julio antes del fenómeno del Niño (de finales de julio a inicios de octubre) las cuales producen poca erosión ya que se enfocaron en desprender ma-

terial del talud. Durante el periodo seco, las pocas precipitaciones dadas trasladaban material al geotextil y hacían más susceptible el suelo. Cuando se da el repunte de precipitaciones en octubre, se desprende el 60,88% del material recolectado, por dos motivos, el primero que las energías dadas anterior a esta fecha desprendieron el suelo, y segundo, las mismas precipitaciones de octubre desprendían y trasladaban material hacia el geotextil. Con el descenso en las precipitaciones a partir de noviembre, se da la reducción de material.

La producción total en la parcela C-T 06 es de 61,23 ton/ha, dando un total de 0,32ton, para el área total de deslizamiento de 53,54m².

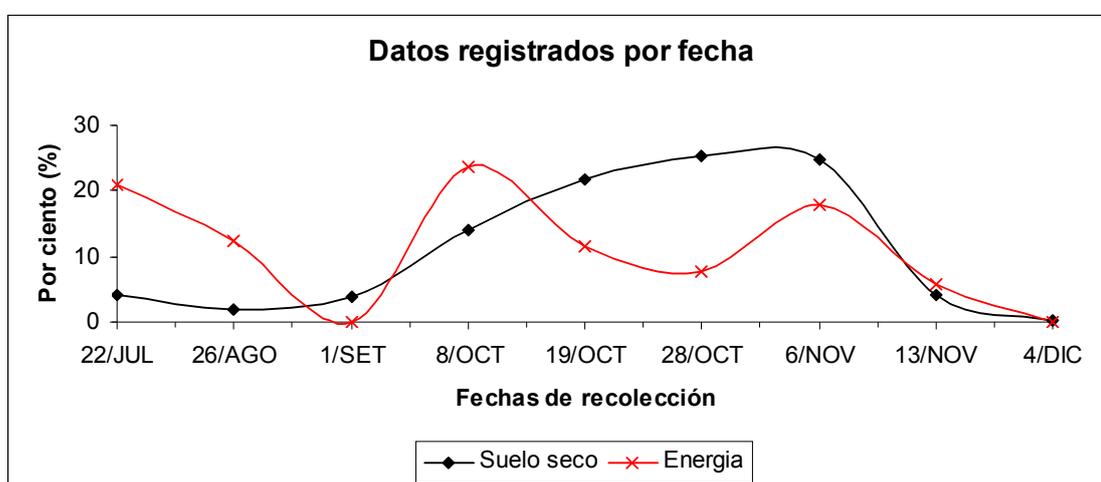


Figura A.38 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela C-T 06. Fuente. El autor.

F.2.2 Tilarán-La Fortuna

Deslizamiento T-T 03, se ubica en el tramo de la carretera entre Tilarán y Tronadora y es un punto de aporte directo al río Santa Rosa. Cubre un área de 18,10m² de un total de deslizamiento de 476,75m². En total se recolectó 181,15kg con un contenido de humedad de 25,18% y una desviación estándar de 9,74. El suelo seco total perdido es 121,96kg. Textura: Limo-arcilloso.

Como se muestra en la Figura A.39 las precipitaciones dadas en junio y finales de julio produjeron una recolección del 25,79% del material total sedimentado. Luego, se ve como la disminución de las lluvias debido al fenómeno del Niño, producen una disminución de las tasas de erosión. En octubre, cuando se da un repunte en las precipitaciones, las energías de estas se enfocan en desprender material del suelo, y no así trasladar material a la geomembrana. Ya con las precipitaciones en noviembre y el suelo susceptible, se recolecta el 66,93% del material erosionado en todo el periodo de prueba.

La producción total de la parcela es de 67,40 ton/ha, por lo cual para toda el área del talud se tiene un total de 3,21ton.

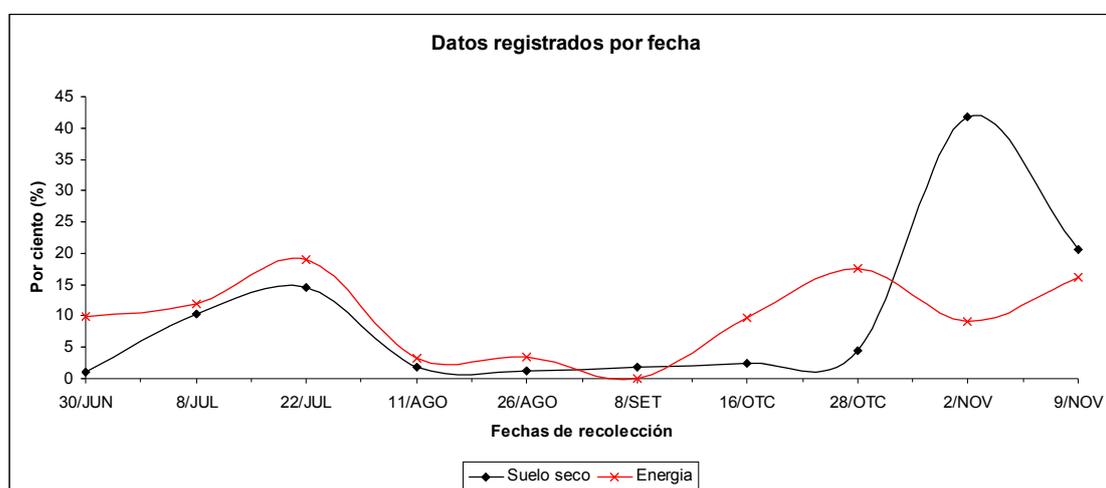


Figura A.39 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela T-T 03. Fuente. El autor.

En resumen, los taludes en la Ruta N° 142 producen un total de 7,01ton en un área total de 1 116,50m², pero por parcela y condición particular de área y producción de sedimentos se obtienen 321,33 ton/ha. La Figura A.40 muestra los datos finales de los taludes.

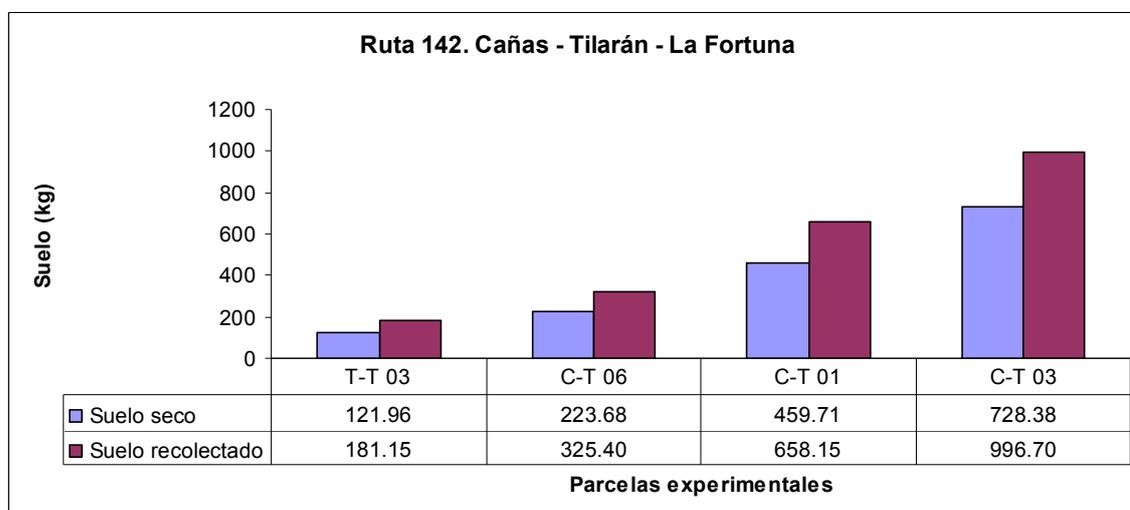


Figura A.40 Resultados de las parcelas de la Ruta N° 142 Cañas-Tilarán-La Fortuna. Fuente. El autor.

F.3 - Ruta N° 145: Quebrada Grande-Tilarán

Deslizamiento D07, cubre un área de 14,70m², es una pequeña porción del área total de talud que tiene 209,26m². En total se recolectó 204,88kg con un contenido de humedad promedio de 21,20% y una desviación estándar de 9,13. El suelo seco perdido es 154,96kg. Textura: Arcillo-limoso.

Esta parcela se caracterizó por mostrar una relación muy estrecha entre la energía y el material sedimentado. Por precipitación dada, la energía que esta tenía, desprendía y trasladaba material al geotextil (Figura A.41), donde se ve que por pico de energía se da un pico de erosión. Se nota claramente el efecto del fenómeno del Niño desde finales de julio hasta inicios de octubre, en donde las pocas precipitaciones dadas reducen la tasa de erosión y sedimentación en la geomembrana. El repunte que se da en octubre hace que se de una alza en la tasa de erosión desde octubre hasta finalizar la prueba.

La recolección total en la parcela D07 es de 105,39 ton/ha, y para toda el área del talud se tiene una producción de 2,20ton.

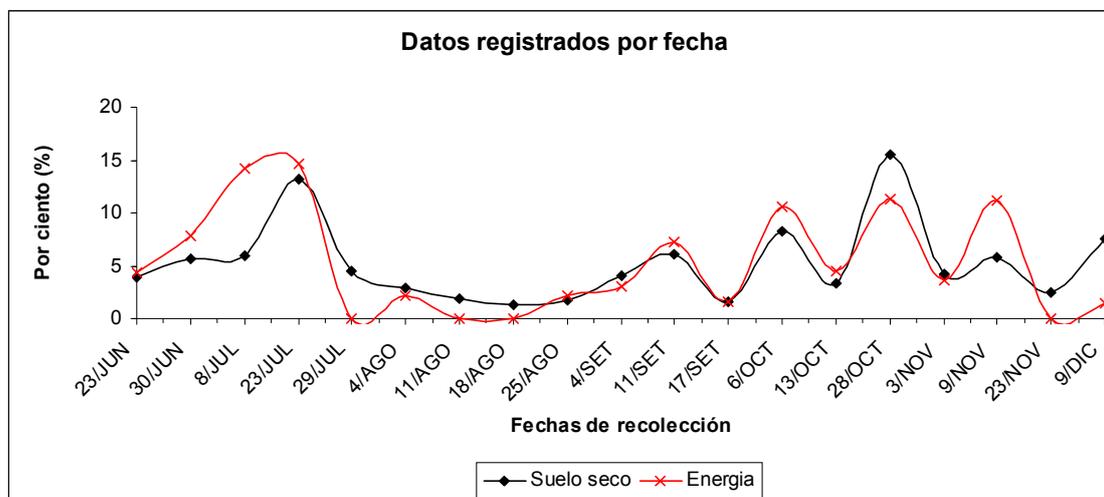


Figura A.41 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela D 07. Fuente. El autor.

F.4 - Ruta N° 925: Líbano-Tilarán

En esta ruta solo se instaló una parcela, llamada T-L 01 y es de aporte directo a Quebrada Grande. Este deslizamiento cuenta con un área de estudio y total de $79,15\text{m}^2$. Durante todo el periodo de prueba se recolectó un total de $134,00\text{kg}$, con un contenido de humedad promedio de $23,12\%$. El suelo seco perdido es $104,00\text{kg}$. Textura: Limo-arenoso.

La Figura A.42 muestra el comportamiento que tuvo el talud con respecto a la energía de la lluvia y el material sedimentado en la geomembrana. Esta parcela fue la última en instalarse, e inició a tomar datos en la época que más afectó el fenómeno del Niño, de finales de Julio a inicios de octubre, donde las precipitaciones se restablecen a las condiciones típicas de octubre (un repunte) noviembre y diciembre (descenso de las lluvias por la entrada a la estación seca)

A pesar de las pocas precipitaciones dadas, estas ocasionan que se de una estrecha relación entre la energía de la lluvia y el material sedimentado en las fechas de recolección del 11 de agosto y el 20 de agosto, 29% de energía de la lluvia y material sedimentado y 25% de energía de la lluvia con el 29% del material sedimentado, para cada fecha respectivamente, como observa en la Figura A.42. Luego la energía se mantiene en 26% (para la

fecha del 1° de setiembre), pero se pierde la relación con el material desprendido, llegando a un mínimo de material recolectado de 1,67%, en la fecha del 10 de setiembre donde se presenta una energía del 14%. El estudio termina con un ascenso en el suelo recolectado del 25,38% a pesar que para la misma fecha la energía es la mínima, un 2,79%. Esta cantidad de material desprendido ante poca energía de la lluvia se debe a que esta energía fue necesaria para trasladar el material que había sido desprendido en fechas anteriores.

Las producción total de esta parcela es de 13,14 ton/ha, por lo tanto considerando toda el área del talud, se tiene que este punto produce 0,10ton.

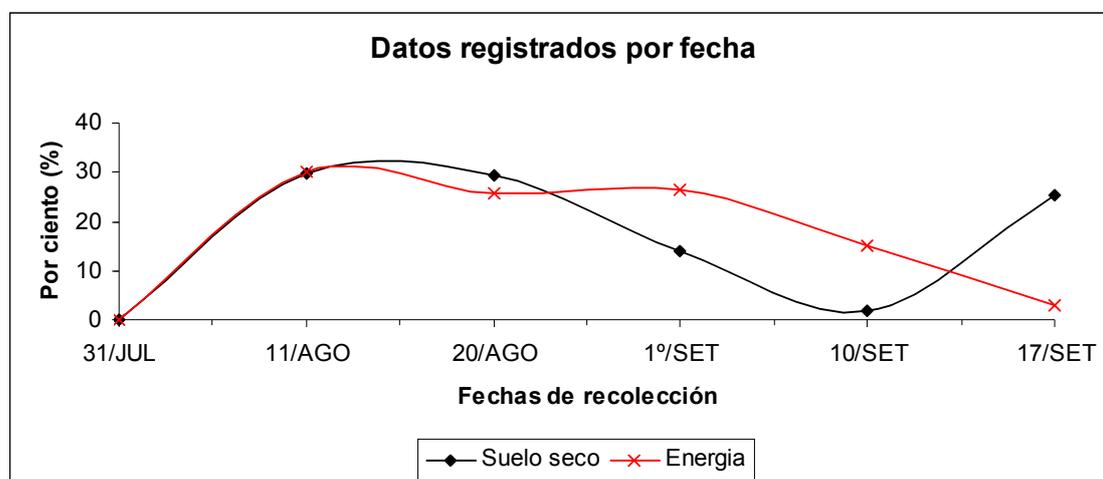


Figura A.42 Comportamiento durante el periodo de prueba de la energía y el suelo recolectado de la parcela T-L 01. Fuente. El autor.

En resumen, el talud D07 en la Rutas N° 145 produce un total de 2,21 ton en un área total de 209,26m², pero por parcela y condición particular de área y producción de sedimentos se obtienen 105,41 ton/ha. Para la parcela T-L 01, ubicada en la ruta N° 925, y con un área total de 79,15m² se producen 13,14 ton/ha o en toneladas 0,10ton. La Figura A.43 muestra los datos finales de los taludes.

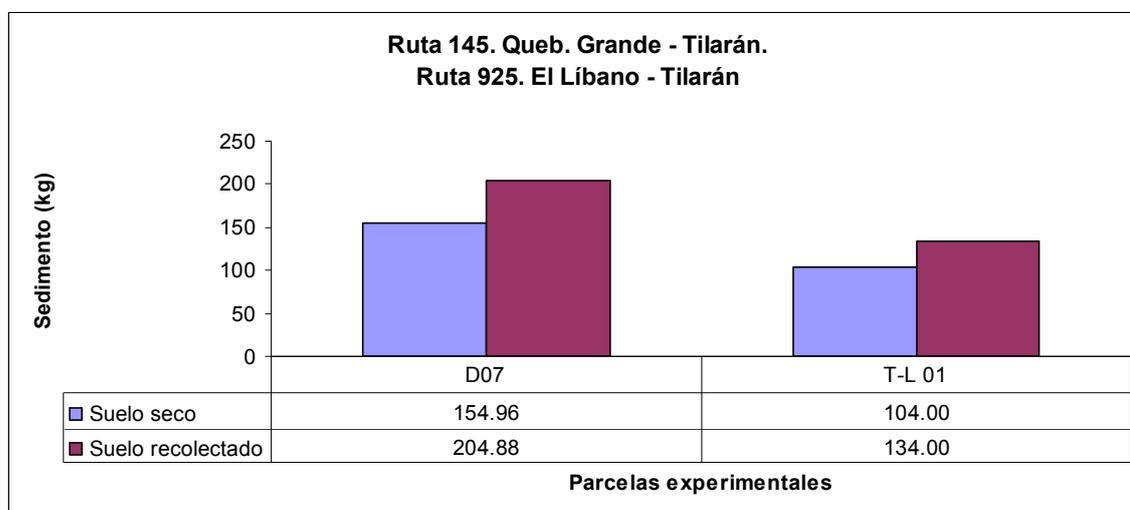


Figura A.43 Resultados de las parcelas de la Ruta N° 142 Cañas-Tilarán-La Fortuna. Fuente. El autor.

ANEXO G. Métodos de bioingeniería: restauración de taludes de caminos

Debido a que los taludes evaluados en caminos mostraron que en la microcuenca del río Santa Rosa son uno de los principales focos productores de sedimentos, además de las riberas de los ríos, se presenta a continuación una serie de técnicas de bioingeniería que se pueden aplicar para mitigar los procesos erosivos en los taludes de caminos.

Porras (2000) en su trabajo “Uso de la vegetación para la estabilización de taludes” presenta en el capítulo 4 Técnicas de mejoramiento de taludes y metodología para su aplicación. A continuación se adjuntan las páginas de dicho capítulo tal como lo presenta Porras (2000)

4 TÉCNICAS DE MEJORAMIENTO DE TALUDES Y METODOLOGÍA PARA SU APLICACIÓN

En el campo de la ingeniería biotécnica se han desarrollado una gran cantidad de técnicas, con el fin de mejorar la estabilidad geotécnica de taludes o reducir su vulnerabilidad a la erosión. Cada técnica que es aplicada dependerá estrictamente de las siguientes condiciones:

- Tipo de suelo, fertilidad, acidez y profundidad del mismo.
- Características geológicas del sitio y tipo de inestabilidad del terreno.
- Topografía.
- Características climáticas de la región.
- Clases de vegetación disponible.
- Equipos constructivos disponibles, tecnología y posibilidades económicas.

Como es lógico, no se puede pensar que existan soluciones definitivas para un problema, o que sólo una técnica sea posible de utilizar para corregir una cierta situación adversa. Siempre habrá que elegir entre el uso de la vegetación sola, o bien que se requiera de un sistema que usa materia inerte, o que los materiales vivos deban ser combinados con estructuras como las últimas para lograr mejores resultados.

Por ello en este capítulo lo que se hará es agrupar las distintas técnicas de mejoramiento de suelos, de acuerdo a su función. Esta misma forma de presentación de las técnicas permitirá clasificarlas de acuerdo a sus posibilidades de aplicación, que depende de las variables citadas anteriormente.

Es importante aclarar bien en que consisten los métodos de mejoramiento que se citarán a continuación. Se conocen dos tipos de técnicas de bioingeniería (fuente 9):

- **Estabilización biotécnica (BT):** Es el uso combinado o integrado de materiales vivos y componentes mecánicos o estructurales inertes. Los componentes inertes incluyen una variada gama de materiales: hormigón, madera, piedra, geotextiles,

geomallas, etc. La vegetación cumple un papel complementario, es decir, no asume todo el rol de estabilización.

- **Bioingeniería del suelo (BS):** es un término más específico que se refiere principalmente a la utilización de plantas completas o fragmentos de tallos, ramas, raíces, etc., con capacidad de enraizar y desarrollar una planta adulta completa; como elementos únicos y principales en la estabilización de taludes. La efectividad de la vegetación se puede incrementar mediante la instalación de geotextiles o geomallas de protección superficial. En este caso la función principal la desempeña la vegetación.

En las tablas #4.3 y #4.7 adjuntas se muestran algunas de las características más importantes de los distintos sistemas o técnicas de tratamiento conocidas, que utilizan vegetación.

4.1 ASPECTOS BÁSICOS DE DISEÑO DE TALUDES

Antes de iniciar este apartado, es importante recordar que muchas de las técnicas que se utilizan en la protección de taludes o laderas pueden ser un verdadero fracaso si estas no cuentan con detalles y aspectos básicos de diseño tales como: altura adecuada, bermas intermedias, pendientes estables, cunetas y contracunetas. Por ello se dan algunas recomendaciones iniciales para estos aspectos, antes de sugerir cualquier técnica.

Pendiente del talud:

Esta es la inclinación del mismo que se suele representar como la relación entre distancia horizontal por cada unidad de desplazamiento vertical, en un talud. Por ejemplo 1,5:1 representa un talud donde al subir o bajar una unidad se avanza 1,5 unidades horizontalmente. La pendiente determina la velocidad que puede alcanzar el agua de escurrimiento sobre un talud, también produce variaciones respecto a la efectividad que pueda tener el impacto de la lluvia sobre el terreno. Por ello a mayores pendientes más velocidad puede alcanzar el agua y la lluvia (si se supone vertical y uniforme) se distribuirá en un área mayor por tanto será menos intensa. La pendiente de un talud también determina que tan vulnerable es a los movimientos o desplazamientos de masa. Esto por cuanto es la fuerza de gravedad la que influye directamente en este tipo de movimientos, tal como se describió al principio de este documento. La fuerza de

gravidad que tiende a movilizar una masa de suelo es mayor conforme más vertical es un talud. Además las fuerzas resistentes son por tanto menores. La pendiente de equilibrio de un talud, es aquella con la cual las fuerzas movilizadoras se igualan a las resistentes. A la relación entre fuerza resistentes contra las movilizadoras se le llama factor de seguridad del talud.

En la referencia 15, se sugieren las siguientes pendientes para taludes de distintos tipos de material:

* Tabla #4.1: Cortes típicos en taludes según la Asociación Japonesa de Carreteras

Pendientes típicas para taludes en corte (según Japan Road Association)		
Suelo	Altura del talud	Pendiente (V:H)
Arena mal graduada	< 5 m	1:1.5
Suelo arenoso denso	< 5 m	1:0.8 a 1:1
Suelo arenoso denso	5 – 10 m	1:1 a 1:1.2
Suelo arenoso poco denso	< 5 m	1:1 a 1:1.2
Suelo arenoso poco denso	5 – 10 m	1:1.2 a 1:1.5
Arena densa con cantos y grava	< 10 m	1:0.8 a 1:1
Arena densa con cantos y grava	10 – 15 m	1:1 a 1:1.2
Arena no densa con cantos y grava	< 10 m	1:1 a 1:1.2
Arena no densa con cantos y grava	10 – 15 m	1:1.2 a 1:1.5
Suelo cohesivo	0 – 10 m	1:0.8 a 1:1.2
Suelo cohesivo con cantos	< 5 m	1:1 a 1:1.2
Suelo cohesivo con cantos	5 – 10 m	1:1.2 a 1:1.5

Tabla #4.2: Pendientes típicas de taludes de relleno o terraplenes. Ref. 8

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	Talud sin agua subterránea	Talud con agua subterránea
Roca madre dura y angular	1.2 : 1	1.5 : 1
GW	1.3 : 1	1.8 : 1
GP, SW	1.5 : 1	2 : 1
GM, GC, SP	1.8 : 1	3 : 1
SM	1.75 : 1	3 : 1
SC	1.5 : 1	3 : 1
ML	2 : 1	4 : 1
CL	1.5 : 1	4 : 1
MH	3 : 1	4 : 1
CH	1.5 : 1	4 : 1

Nótese que estos cortes se sugieren para garantizar la estabilidad geotécnica del talud sin considerar los efectos de la degradación futura, es decir, su estabilidad a largo plazo no se encuentra asegurada.

Bermas intermedias:

Cuando hay taludes que requieran una altura mayor a los 5 metros, es recomendable hacer bermas intermedias, de 1 a 2 metros de ancho cada 5 metros de altura, como mínimo. Estas bermas deben facilitar el drenaje y al final de la misma debe existir una cuneta interceptora. Las bermas también conocidas como gradas, sirven para mejorar la estabilidad del talud, cortar la distancia de recorrido del agua en el talud y para manejar volúmenes de escorrentía más fácilmente. Los bermas tienen canales que transportan el agua. Estas se pueden diseñar para un período de retorno de 10 años y lluvia de 24 horas.

Diques en corona del talud:

Los diques en la corona del talud sirven para evitar que el agua de escorrentía desde niveles superiores llegue al talud. Adicionalmente se pueden colocar cunetas. Si en todos los taludes de carreteras se hace este tipo de medida, entonces, se puede suponer que la erosión calculada por la ecuación de la EUPS (Ref. 9), es muy representativa.

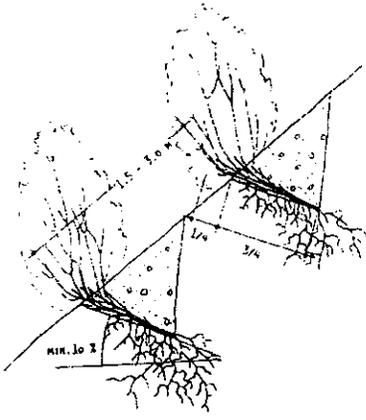
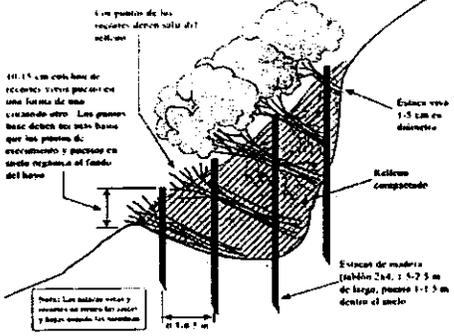
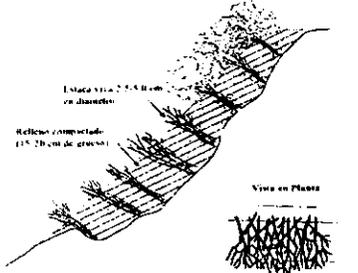
4.2 TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA DE SUELOS

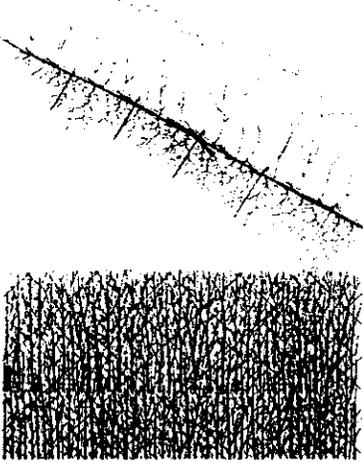
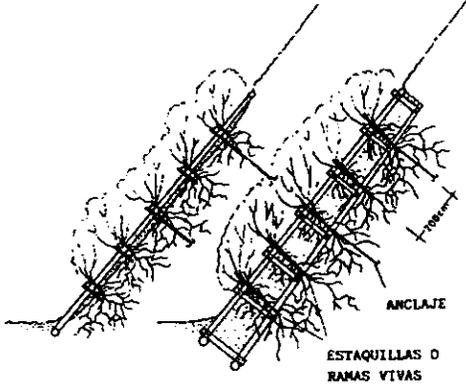
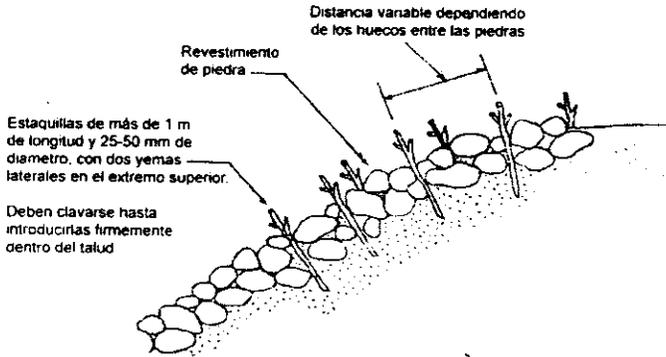
La siguiente tabla, muestra esquemáticamente las principales técnicas conocidas dentro de la bioingeniería de suelos.

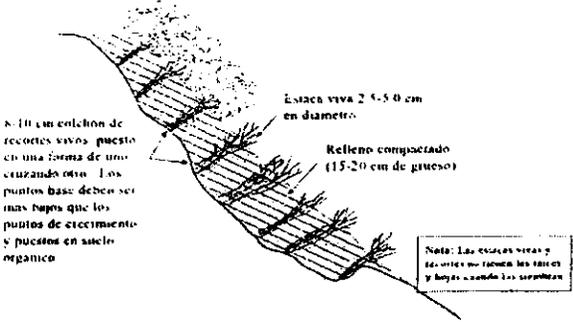
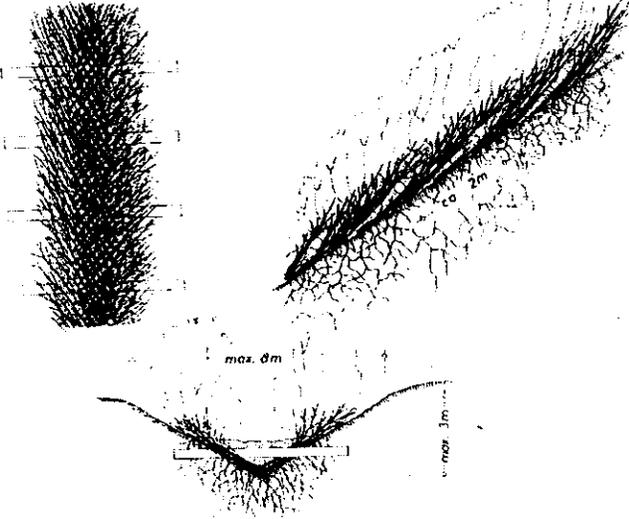
Tabla #4.3: Resumen de las técnicas de bioingeniería de suelos.

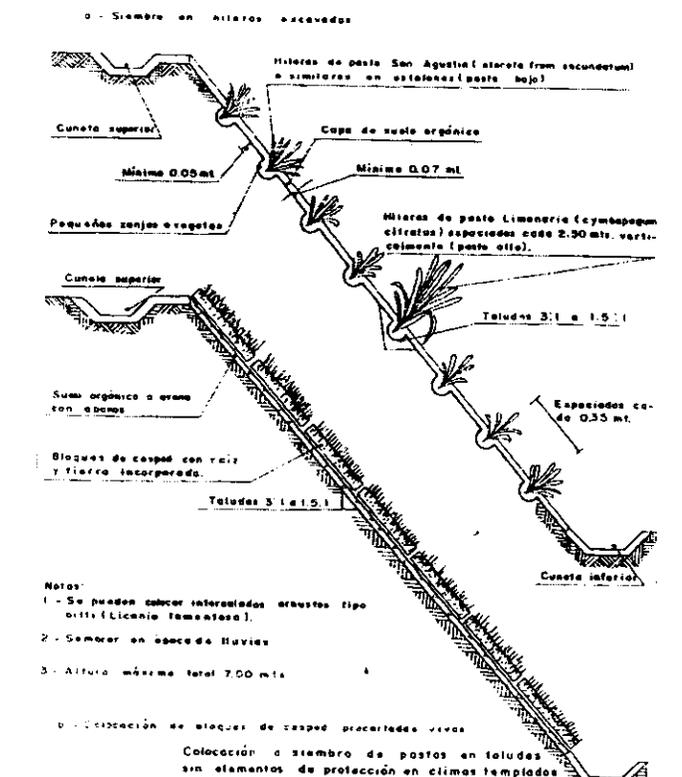
Técnica	Esquema	Observaciones
<p>BS-1</p> <p>Barreras semi-permeables</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: Control de erosión, filtro, sedimentador, estabilidad superficial. ✓ Pendientes admisibles: 10% - 30% ✓ Materiales: Caña, bambú o fibras vegetales tejidas, ramas, mallas metálicas o plásticas. <p style="text-align: right;">REFERENCIA 15</p>
<p>BS-2</p> <p>Enramados</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: Retención de sedimentos, control de erosión. ✓ Pendientes admisibles: 100% máximo ✓ Materiales: Estacas, ramas o juncos, capaces de enraizar. <p style="text-align: right;">REFERENCIA 15</p>

<p>BS-3</p> <p>Talud en escalera</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: Control de erosión, mejora retención de humedad e infiltración de agua, control de sedimentos, impide formación de surcos. ✓ Pendientes admisibles: 33% - 100% ✓ Materiales: Especies vegetales y estacas <p>REFERENCIA 15</p>
<p>BS-4</p> <p>Estacas vivas</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: Refuerzo del suelo, propiciar establecimiento de vegetación, control de erosión. ✓ Pendientes admisibles: No hay límite. Más eficiente en terrenos no problemáticos. ✓ Materiales: Recortes vivos leñosos o semi-leñosos. <p>REFERENCIA 8</p>
<p>BS-5</p> <p>Fajinas</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: Retención de sedimentos, permite el establecimiento de vegetación, estabilización superficial, control de erosión en taludes y canales. ✓ Pendientes admisibles: 20% - 100%, en longitudes de 18 a 5 m. Respectivamente. ✓ Materiales: Ramas cortas de arbustos, hilos de amarre, estacas vivas y muertas, suelo orgánico, geomallas. <p>REFERENCIA 8 y 9</p>

<p>BS-6</p> <p>Capas de ramas</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: Control de erosión, refuerzo del suelo y estabilidad superficial. Trampa de sedimentos, retención de agua en el suelo o drenan los muy húmedos, facilitan el desarrollo de otra vegetación y la regeneración natural, drenes horizontales. ✓ Pendientes admisibles: 25% - 50%, longitud de 6 a 4.5 m respectivamente ✓ Materiales: Especies leñosas vivas capaces de enraizar. <p style="text-align: center;">REFERENCIA 13</p>
<p>BS-7</p> <p>Paquetes de matorral</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: Reparar pequeños asentamientos localizados y áreas desgastadas, pequeños deslizamientos, filtro, control de erosión y socavación. Refuerzo y unificación del suelo. ✓ Pendientes admisibles: No se detallan. ✓ Materiales: Estacas muertas y vivas, ramas vivas. Suelos húmedos <p style="text-align: center;">REFERENCIA 8</p>
<p>BS-8</p> <p>Reparación de cárcavas de erosión</p>	<p style="text-align: center;">METODO A</p> 	<p style="text-align: center;">METODO B</p>  <ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: Reparar <u>pequeñas cárcavas</u> o canales, refuerzo del suelo, control de erosión, filtro, trampa de sedimentos. ✓ Pendientes admisibles: No hay límite de pendientes, máximo tamaño de cárcava: 30 cm prof. Y 4.5m largo. ✓ Materiales: Recortes vivos de ramas, material de relleno, estacas muertas y vivas. <p style="text-align: center;">REFERENCIA 8 y 13</p>

<p>BS-9</p> <p>Esteras de matorral</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: Protección de márgenes de ríos, arroyos o canales de drenaje contra erosión, retención de sedimentos ✓ Pendientes admisibles: Varían entre 25% y 33%. ✓ Materiales: Ramas capaces de resistir encharcamiento, estacas vivas y muertas, clavos, alambre de doble torsión. <p style="text-align: center;">REFERENCIA 13</p>
<p>BS-10</p> <p>Enrejados vivos</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: Sujeción de suelo, facilita establecimiento de vegetación con capacidad de estabilizar el talud ✓ Pendiente admisible: Permite corrección de taludes de gran pendiente sin remodelación de terreno previa (más de 100%) ✓ Materiales: Madera en tabla y rolliza sin tratar, material de relleno, piedras medianas, clavos, ramas vivas. <p style="text-align: center;">REFERENCIA 9 y 13</p>
<p>BS-11</p> <p>Estaquillado de revestimiento poroso de piedra</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: Drenaje, aumento densidad del suelo, aumento resistencia superficial, evita pérdida de finos entre piedras. ✓ Pendiente admisible: No se indica ✓ Materiales: Estacas vivas, piedras de recubrimiento <p style="text-align: center;">REFERENCIA 13</p>

<p>BS-12</p> <p>Lechos de ramas</p>	 <p>8-10 cm colchon de recortes vivos puesto en una forma de uno cruzando otro. Los puntos base deben ser mas bajos que los puntos de crecimiento y pucatos en suelo organico</p> <p>Estaca viva 2.5-5.0 cm en diametro</p> <p>Relleno compactado (15-20 cm de grueso)</p> <p><small>Nota: Las estacas vivas y las ortas no tocan las raíces y hojas cuando las seplantan</small></p>	<p>✓ Usos:</p> <p>Protección contra la erosión, acelera desarrollo de otra vegetación. Óptimo en suelos secos y permeables.</p> <p>✓ Pendiente admisible:</p> <p>No se indica</p> <p>✓ Materiales:</p> <p>Ramas vivas, largas, fajinas, estacas muertas, piedra, alambre, suelo de relleno, tela metálica (opcional).</p> <p>REFERENCIA 13</p>
<p>BS-13</p> <p>Alfombra de semilla</p>		<p>✓ Usos:</p> <p>Control de erosión, estabilidad somera.</p> <p>✓ Pendiente admisible:</p> <p>Aplica a todo tipo de pendientes. Bajas pendientes (no requiere refuerzo). Óptimo en terrenos bien drenados y bien igualados. Requiere laderas húmedas.</p> <p>✓ Materiales:</p> <p>Semillas, tela de refuerzo, anclas de acero. Mulche o fijador de semillas.</p> <p>REFERENCIA 8</p>
<p>BS-14</p> <p>Lechos de ramas vivas en cárcavas</p>	 <p>max. 8m</p> <p>max. 3m</p>	<p>✓ Usos:</p> <p>Regeneración de cárcavas, protección contra erosión, trampa de sedimentos</p> <p>✓ Pendiente admisible:</p> <p>No se especifica</p> <p>✓ Materiales:</p> <p>Ramas vivas largas, suelo de relleno, vigas de madera o postes vivos</p> <p>REFERENCIA 13</p>

<p>BS-15</p> <p>Bombeo de agua por medio de plantas</p>		<p>✓ Usos:</p> <p>Drenaje de suelos húmedos</p> <p>✓ Materiales:</p> <p>Plantas freatofitas (alto consumo de agua) y enraizamiento profundo</p> <p>REFERENCIA 13</p>
<p>BS-16</p> <p>Pasto en taludes</p>	 <p>0 - Siembra en hileras excavadas</p> <p>Hileras de pasto San Agustín (stareta from secundatum) e sembradas en estalotes (paso bajo)</p> <p>Cuneta superior</p> <p>Mínimo 0.05 mt</p> <p>Pequeñas zanjas excavadas</p> <p>Capa de suelo orgánico</p> <p>Mínimo 0.07 mt</p> <p>Hileras de pasto Limnaria (Lymnabegon citratus) espaciadas cada 2.50 mts. verticalmente (paso alto)</p> <p>Taludes 3:1 a 1.5:1</p> <p>Espejados cada 0.35 mt.</p> <p>Cuneta inferior</p> <p>Suelo orgánico o arena con bombas</p> <p>Bloques de cascadas con raíz y tierra incorporada</p> <p>Taludes 3:1 a 1.5:1</p> <p>Notas:</p> <p>1 - Se pueden colocar intercalados arbustos tipo orfito (Lichnia tomentosa).</p> <p>2 - Sembrar en época de lluvias</p> <p>3 - Altura máxima total 7.00 mts</p> <p>0 - Colocación de bloques de cascadas vivas</p> <p>Colocación o siembra de pastos en taludes sin elementos de protección en climas templados en taludes estables y suelos poco erosionables</p>	<p>✓ Usos:</p> <p>Protección contra erosión</p> <p>✓ Pendiente admisible:</p> <p>Depende del tipo de suelo y elementos adicionales</p> <p>✓ Materiales:</p> <p>Césped, arbustos, anclajes, etc.</p> <p>REFERENCIA 15</p>
<p>BS-17</p> <p>Curso de agua empradizado</p>		<p>✓ Usos:</p> <p>Drenaje superficial, protección contra erosión aumento densidad del suelo, aumento resistencia superficial, evita pérdida de finos entre piedras.</p> <p>✓ Pendiente:</p> <p>Pendiente natural del curso de agua</p> <p>✓ Materiales:</p> <p>Estacas vivas, alfombras de semilla, estacas muertas, fajas, mallas de refuerzo, clavijas, césped.</p> <p>REFERENCIA 13</p>

Uso de arbustos de raíz profunda y métodos de siembra y colocación:

La aplicabilidad de un determinado tipo de solución se ve afectado por la pendiente del talud, el cual es normalmente el punto de referencia que se utiliza para evaluar la efectividad de algunos métodos constructivos. En la siguiente tabla se dan algunas recomendaciones.

Tabla #4.4: Distintos tipos de cobertura vegetal y restricciones de aplicación. Ref. 15

Método	Vegetación	Máxima pendiente (H:V)
Barreras vivas	Arbustos	1.5 : 1
Siembra de pastos en suelos poco erosionables, templados y taludes estables	Pastos	1.5 : 1
Control vegetal (pendiente baja)	Pastos	1.5 : 1
Control vegetal (pendiente alta)	Pasto + mallas de alambre + anclaje	¼ : 1
Control vegetal con semillas de pasto	Semillas de pasto + estacas + sacos	½ : 1

Especificaciones especiales para fajinas:

La tabla siguiente muestra distintas separaciones posibles para distintos grados de inclinación del talud de las fajinas.

Tabla #4.5: Distancias recomendadas entre fajinas (Ref. 9)

Pendiente (%)	Distancia entre fajinas (m)	Longitud máxima de la pendiente (m)
100 - 65	0.80 - 1.25	5
65 - 47	1.25 - 1.50	6
47 - 36	1.50 - 2.00	9
36 - 32	2.00 - 2.50	12
32 - 25	2.50 - 2.75	15
25 - 19	2.75 - 3.00	18

Las fajinas pueden ser utilizados adecuadamente, para drenar taludes y reducir el volumen de agua que tiende a infiltrarse en taludes cuya inestabilidad esta asociada fundamentalmente a exceso de humedad. A continuación se muestran algunas figuras que muestran algunas disposiciones y detalles típicos de las fajinas para este fin.

Fajinas en espina de pescado (fig. #9):

Cada fajina se construye usando el procedimiento general, pero se hacen las siguientes recomendaciones:

- Zanja central:
 - sección trapezoidal,
 - ✓ 40 – 50cm de profundidad,
 - ✓ 30 – 40 cm de fondo,
 - ✓ 40 – 50 de abertura superior.
 - ✓ Usar tres fajinas clavadas con estacas de madera cada metro.

- Zanja lateral:
 - ✓ Ángulo de inclinación hacia la zanja central entre 20 y 45°,
 - ✓ Separación entre zanjas laterales 1–2.5 m.

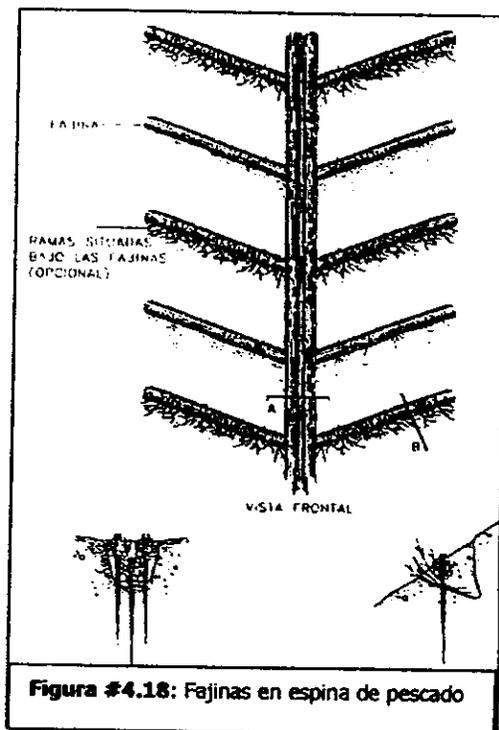


Figura #4.18: Fajinas en espina de pescado

Fajinas asociadas a drenes de intercepción del drenaje subsuperficial:

Se muestran los detalles en la figura #4.19. Las fajinas se construyen bordeando el contorno del talud pero se construye también un drenaje subsuperficial, orientado pendiente abajo y perpendicular a ellas, en una zanja axial excavada por debajo de las fajinas, para interceptar la escorrentía subsuperficial y conducirla a la base del talud. Los detalles del subdrenaje son los convencionales.

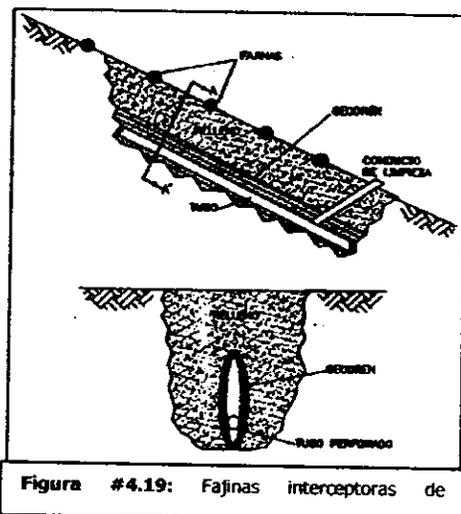


Figura #4.19: Fajinas interceptoras de

Especificaciones para capas de ramas:

Tabla #4.6: Distancias recomendadas para capas de ramas. Ref. 9

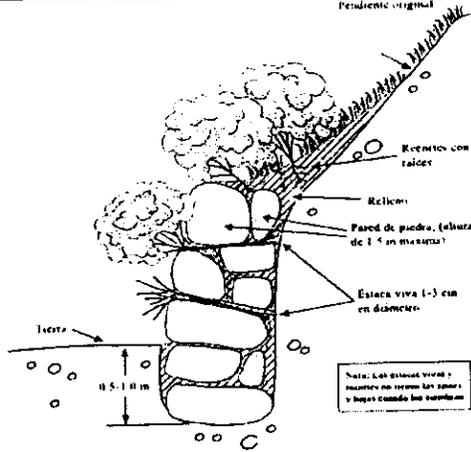
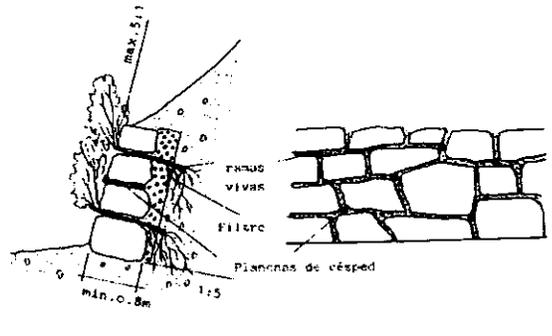
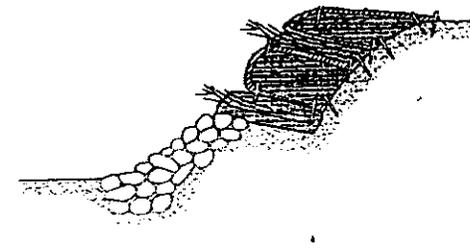
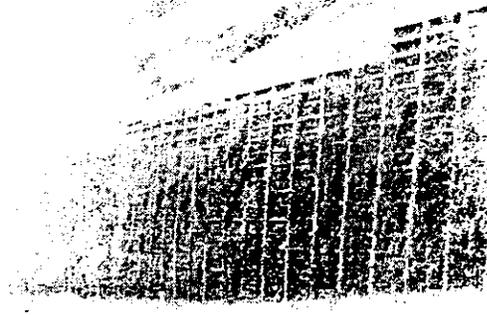
Pendiente (H:V)	Distancia entre zanjas (m)		Longitud máxima de pendiente (m)
	Taludes húmedos	Taludes secos	
2:1 – 2.5:1	1 – 1.25	1.5 – 1.75	4.5
2.5:1 – 3:1	1.25 – 1.5	1.75 – 2.5	4.5
3:1 – 4:1	1.5 – 1.75	2 – 3	6

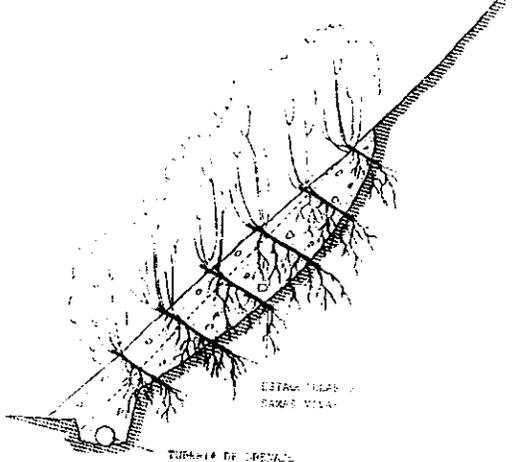
4.3 SISTEMAS BIOTÉCNICOS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS

A continuación se presenta una tabla resumen, que muestra los principales sistemas biotécnicos de mejoramiento de suelos. Como se mencionó anteriormente estos sistemas son realmente los tradicionales, los cuales incluyen elementos vegetativos, que mejoran su eficiencia, durabilidad y funcionalidad.

Tabla #4.7: Sistemas biotécnicos de mejoramiento de suelos.

Técnica	Esquema	Observaciones
<p>BT-1</p> <p>Muro cribado vivo</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: Estabilización de taludes de corte de poca altura, sin tensiones laterales. ✓ Altura admisible: 1,8 m incluida excavación de cimentación. ✓ Materiales: Madera regla o rolliza sin tratamiento o viguetas de concreto, ramas vivas, material de relleno, clavos grandes o varilla de hierro
<p>BT-2</p> <p>Gaviones con vegetación</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: Estabilizar pie de talud y reducir la inclinación. No usar técnica si existen tensiones laterales. ✓ Altura admisible: 1.5 m (incluyendo cimentación) ✓ Materiales: Alambre de triple torsión acero galvanizado, piedra gruesa para relleno. Recortes vivos de ramas.

Técnica	Esquema	Observaciones
<p>BT-3</p> <p>Muro de roca con revegetación</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: <ul style="list-style-type: none"> Soporte adicional de otras estructuras principales No aplica en cargas laterales grandes ✓ Altura admisible: <ul style="list-style-type: none"> Máximo 2 metros. ✓ Materiales: <ul style="list-style-type: none"> Rocas, material de relleno y recortes de ramas vivas.
<p>BT-4</p> <p>Vegetación entre piedras</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: <ul style="list-style-type: none"> Drenaje y contención de suelo. Vegetación impide efecto de tubificación del suelo. ✓ Altura admisible: <ul style="list-style-type: none"> No se indica. ✓ Materiales: <ul style="list-style-type: none"> Recortes de ramas vivas, material para zampeado, material de relleno
<p>BT-5</p> <p>Estructuras de tierra reforzada</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: <ul style="list-style-type: none"> Muro de contención, unificación de masa de suelo, drenaje horizontal, protección contra socavación de taludes en canales y cursos de agua ✓ Altura admisible: <ul style="list-style-type: none"> Sin Límite, usar contrapendientes de 10 a 15°. ✓ Materiales: <ul style="list-style-type: none"> Geotextil o geomalla sintética, material de relleno, estacas muertas, ramas vivas.
<p>BT-6</p> <p>Muro de sostenimiento de hormigón y material vivo</p>		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Usos: <ul style="list-style-type: none"> Estabilización de laderas de carretera (cortes), drenaje de ladera por transpiración. ✓ Altura admisible: <ul style="list-style-type: none"> 4 metros como máximo ✓ Materiales: <ul style="list-style-type: none"> Elementos prefabricados de hormigón, materiales vivos (ramas vivas de fácil enraizamiento).

Técnica	Esquema	Observaciones
<p>BT-7</p> <p>Drenajes de grava</p>		<p>✓ Usos: Drenaje superficial y subsuperficial.</p> <p>✓ Materiales: Estacas vivas, grava, ramas de plantas leñosas y vivas largas.</p>

Los procedimientos constructivos necesarios para cada sistema citado anteriormente se encuentra en el capítulo de anexos. Además se citan los materiales constructivos requeridos para cada caso con mayor detalle.

4.4 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS

En este capítulo se plantearán algunas guías generales para la selección de sistemas de mejoramiento de suelos, ya sean estos de Bioingeniería de Suelos o de Biotécnicas. Las variables principales que puede definir el uso de una u otra técnica son especialmente:

- Tipo de problema presente
- Tipo de suelo
- Topografía

Estas 3 variables se pueden interrelacionar en un diagrama de flujo.

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES BÁSICAS

A. Tipo de Problema:

Los problemas que pueden ser solucionados usando vegetación, como se mencionó anteriormente, son superficiales. Pero en este caso se trata de las técnicas de bioingeniería, las cuales usan tratamientos muy superficiales. Sin embargo existen una gran variedad de técnicas que se adaptan a distintas condiciones de pendiente. Otros problemas de inestabilidad en que las masas de suelo requieran sobre todo contención son factibles de solucionar con biotécnicas. Sin embargo aunque se solucionan problemas mayores existen limitaciones en altura de los muros y además la necesidad de proteger los rellenos de los procesos erosivos.

Como se puede notar de lo anterior, no existe regla fija para la aplicación de una u otra técnica, o bien no conviene utilizarlas en forma separada sino combinarlas y así aumentar la efectividad de todo el sistema. Esto último se recomienda en la mayor parte de la bibliografía consultada. La selección de una técnica estará basada en la dificultad constructiva. Este parámetro es muy importante de usar pues tiene relación directa con el costo económico, lo cual puede servir como guía para dar mejores recomendaciones. El diagrama siguiente muestra los tipos de problemas que se van a analizar con esta metodología:

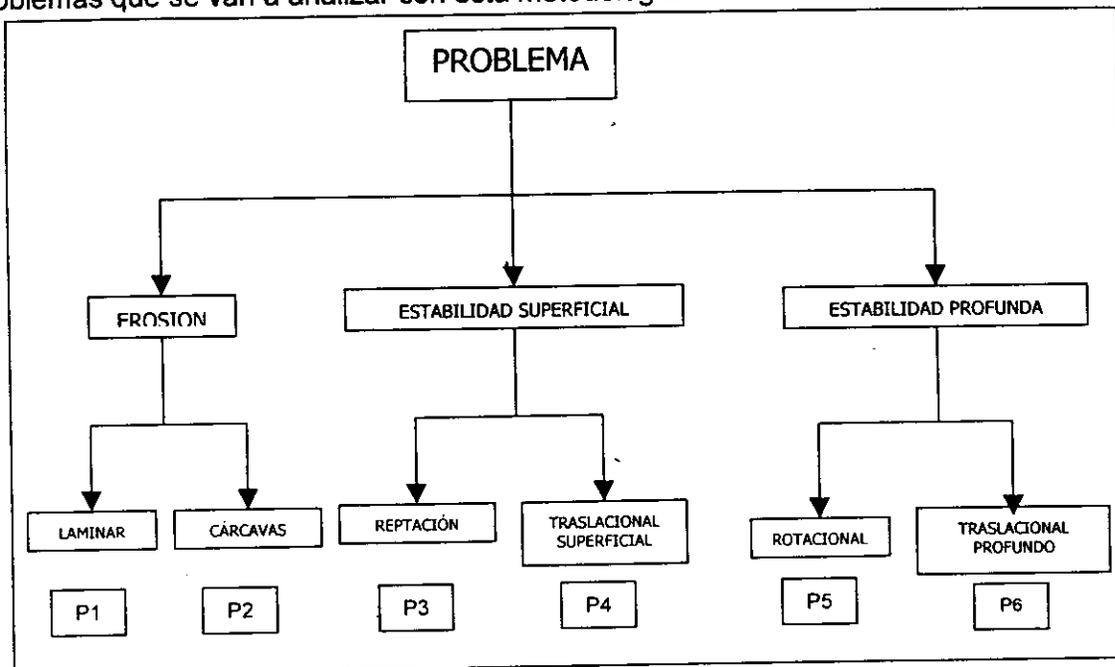


Figura 4.27: Diagrama de tipos de problemas a ser analizados

B. Tipo de Suelo:

Importa definir sobre todo el perfil de suelo, el cual tiene que ver con el origen del mismo. Si se trata de suelo residual de roca ígnea, el perfil típico a profundidad puede presentar fracturas que favorezcan que las raíces se anclen firmemente. Si se trata de perfiles residuales generados a partir de rocas sedimentarias, el tamaño y posición de las fisuras de la roca madre puede ser que las raíces no puedan anclarse eficientemente y tiendan a formar una gran masa superficial del sistema radicular que pueda hacer colapsar el talud, al aumentar el tamaño del árbol y por ende la sobrecarga sobre el talud.

Otro aspecto importante de valorar en suelo, es que este sea adecuado para el desarrollo de las especies vegetales a utilizar. Esto es difícil de presentar en la metodología y lo correcto es investigar las características de suelo que mejor favorezcan su desarrollo. En las tablas presentadas en el capítulo 5, se dan algunas recomendaciones sobre adaptabilidad de algunos pastos, árboles y arbustos. Conviene también ver la referencia #3.

Finalmente, el suelo debe preferiblemente, si se utilizarán arbustos de raíz profunda o árboles, tener un perfil de suelo profundo. Si se trata de un suelo superficial es mejor utilizar técnicas donde la masa de raíces y la parte aérea del sistema vegetativo sean reguladas. Esto se debe a que en suelos poco profundos es muy difícil que los árboles se desarrollen bien y además son muy propensos al volcamiento. Por recomendación del ingeniero forestal Róger Arroyo, un suelo adecuado para utilizar vegetación y esta se establezca bien pueden ser aquellos con una profundidad mayor a 1,5 m.

C. Topografía:

Como se indicó anteriormente, algunos métodos pueden dar mejores resultados si se utilizan en ciertas condiciones de pendiente. Aún más, existen una variedad de sistemas que pueden ser utilizados indiferentemente de la pendiente, en términos de efectividad, pero analizados desde el punto de vista de costo pueden ser menos competitivos. Además la pendiente determina algunos aspectos de diseño muy importantes con lo que una misma técnica puede requerir o no de algunos elementos constitutivos. Para el caso que se presenta en este trabajo es muy importante separar Bioingeniería de Suelos de Biotécnicas de mejoramiento, pues para el caso de sistemas biotécnicos la pendiente no impone ninguna restricción, aunque el costo de construirlo si puede ser mayor. Eso queda representado en la siguiente tabla donde se valora la influencia de la pendiente en los distintos procedimientos constructivos de las técnicas que se van a analizar.

Tabla #4.8: Calificación de los métodos constructivos de acuerdo a su Dificultad constructiva

Técnica a utilizar	GD	MC1	MC2	TEC1	TEC2	TEC3	< 60%	60-100	> 100%
BS.1 Barreras semipermeables	2	2	5	1	1.2	1.5	4 A	-	-
BS.2 Enramados	2	8	11	1	1.2	1.5	16 A	19 A	-
BS.3 Talud en escalera	4	8	8	1	1.2	1.5	32 B	38 B	-
BS.4 Estacas vivas	1	6	6	1	1.2	1.5	6 A	7 A	9 A
BS.5 Fajinas	3	8	11	1	1.2	1.5	24 B	29 B	-
BS.6 Capas de ramas	3	6	6	1	1.2	1.5	18 A	-	-
BS.7 Paquetes de matorral	3	6	6	1	1.2	1.5	18 A	22 B	27 B
BS.8 Reparación de cárcavas de erosión	4	6	8	1	1.2	1.5	24 B	38 B	48 B
BS.9 Esteras de matorral	2	8	11	1	1.2	1.5	16 A	-	-
BS.10 Enrejados vivos	4	14	14	1	1.2	1.5	56 C	67 C	84 C
BS.11 Estaquillado de revestimiento poroso de piedra	2	8	8	1	1.2	1.5	16 A	19 A	-
BS.12 Lechos de ramas	3	6	8	1	1.2	1.5	18 A	29 B	36 B
BS.13 Alfombra de semilla	3	11	11	1	1.2	1.5	33 B	40 B	50 B
BS.14 Lechos de ramas vivas en cárcavas	3	8	8	1	1.2	1.5	24 B	29 B	36 B
BS.15 Bombeo de agua por medio de plantas	1	6	6	1	1.2	1.5	6 A	7 A	9 A
BS.16 Pasto en taludes	2	6	11	1	1.2	1.5	12 A	26 B	33 B
BS.17 Curso de agua empradizado	2	8	11	1	1.2	1.5	16 A	26 B	33 B
BT.1 Muro cribado vivo	6	16	16	1	1.1	1.2	96 B	106 B	115 B
BT.2 Gaviones con vegetación	7	19	19	1	1.1	1.2	133 C	146 C	160 C
BT.3 Muro de roca con revegetación	6	14	14	1	1.1	1.2	84 B	92 B	101 B
BT.4 Vegetación entre piedras	6	14	14	1	1.1	1.2	84 B	92 B	101 B
BT.5 Estructuras de tierra reforzada	7	19	19	1	1.1	1.2	133 C	146 C	160 C
BT.6 Muro de sostenimiento hormigón y material vivo	5	14	14	1	1.1	1.2	70 B	77 B	84 B
BT.7 Drenajes de grava	3	8	8	1	1.1	1.2	24 A	26 A	29 A

En la tabla anterior:

GD = GRADO DE DIFICULTAD

Se obtiene sumando, de acuerdo a cada técnica uno o varios de los siguientes valores:

BIOINGENIERÍA DE SUELOS:

- 1: Instalación de material vivo en campo
- 2: Requiere colocar material vivo o muerto, armar piezas o sistemas

Sumar:

- 1: Si requiere un leve movimiento de tierras
- 2: Si el movimiento de tierras es importante

INGENIERÍA BIOTÉCNICA:

- 3: Sistemas prefabricados
- 4: Sistemas a construir en campo

Adicionar :

- 1: Si requiere movimiento de tierras
- 2: Si requiere elementos adicionales como drenajes, construcción detallada.

MC = Materiales constructivos

Significa los materiales constructivos requeridos si se trata de condiciones óptimas de aplicación o si se construye en condiciones difíciles lo cual ocasiona que se requiera refuerzos adicionales. Para darle valores se utilizó la valoración siguiente:

Materiales constructivos (MC)	VALOR
Materiales naturales especiales	6
Mallas de geotextil o alambre	3
Material inerte (concreto, piedra, madera, acero)	8
Materiales inertes menor importancia	2

TEC = Limitación topográfica a la construcción

Significa cuanto afecta a la construcción la topografía más abrupta:

TEC1 = < 60%

TEC2 = 60 – 100%

TEC3 = > 100%

Los valores son diferentes de acuerdo a si son construcción en taludes o si se lo que se hace es contenerlos:

SISTEMA	TEC1	TEC2	TEC3
BS	1	1.2	1.5
BT	1	1.1	1.2

Ecuación utilizada:

$$DC = GD \cdot (MC) \cdot (TEC) \quad (1)$$

De las tablas anterior #N.1 se tiene:

Tabla #4.9: Agrupación de Sistemas constructivos de acuerdo a Dificultad constructiva

<i>Técnica</i>	<i>Límite inferior</i>	<i>Límite superior</i>	<i>TIPO</i>
BS	0	20	BS-A
	21	50	BS-B
	51	90	BS-C
BT	0	60	BT-A
	61	130	BT-B
	131	200	BT-C

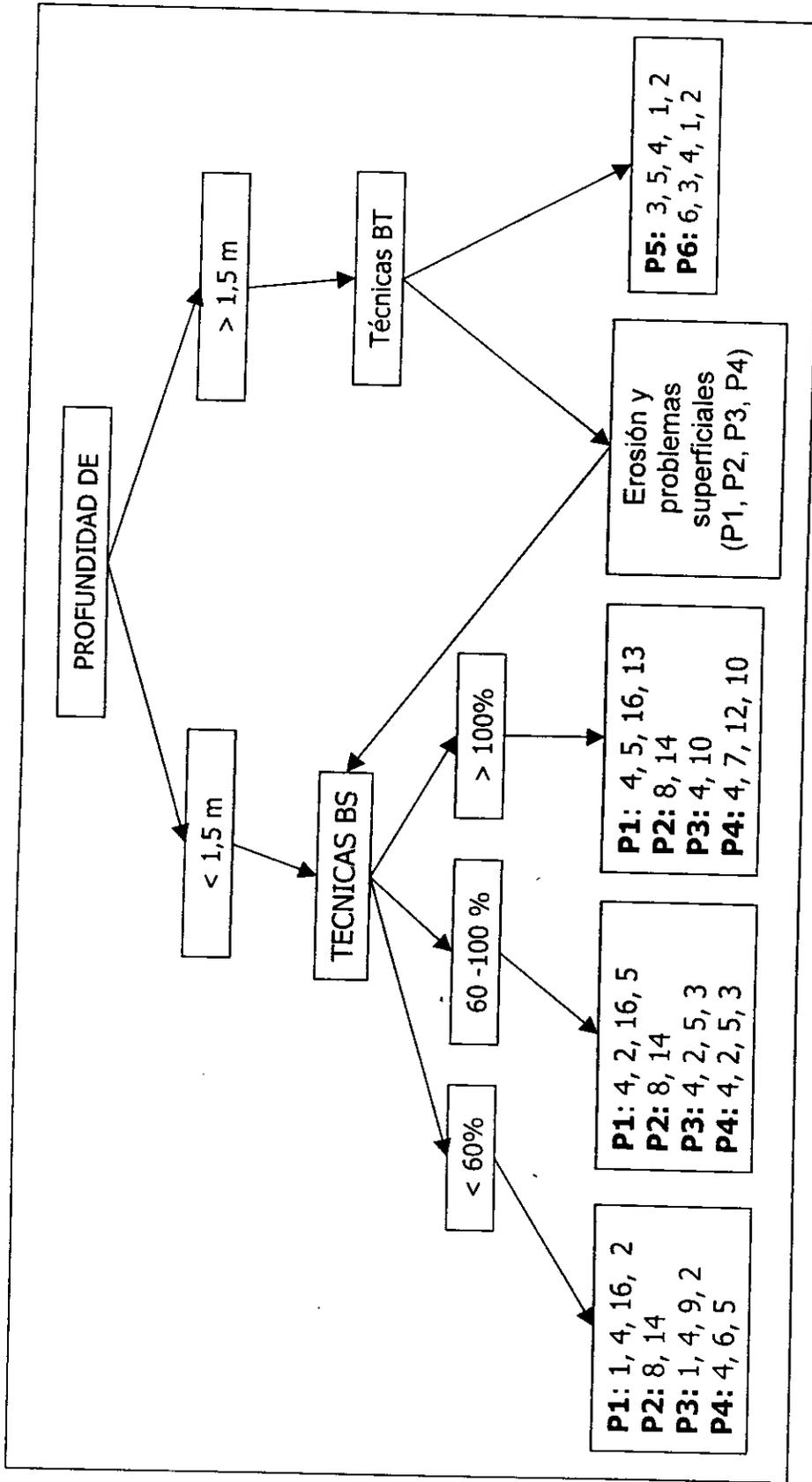


Figura #4.28: Metodología propuesta para la selección de sistemas de mejoramiento de suelos