

**Determinación y cuantificación de la tasa de erosión laminar en cafetales
ubicados en la cuenca del río Jesús María**

Emanuel Molina Campos

Informe de Proyecto de Graduación para optar el grado de
Licenciatura en Ingeniería Agronómica con Énfasis en Fitotecnia

Escuela de Agronomía
Facultad de Ciencias Agroalimentarias
Universidad de Costa Rica
Sede Rodrigo Facio 2015

Determinación y cuantificación de la tasa de erosión laminar en cafetales ubicados en la cuenca del río Jesús María

Emanuel Molina Campos

Informe de Proyecto de Graduación para optar el grado de
Licenciatura en Ingeniería Agronómica con Énfasis en Fitotecnia

M.Sc. Rafael Mata Chinchilla

Director de Proyecto de Graduación

Msc. Gilberto Cabalceta Aguilar

Miembro Asesor del Tribunal

Msc. Mario Villatoro Sánchez

Miembro Asesor del Tribunal

Msc. Renato Jiménez Zúñiga

Miembro Asesor del Tribunal

Msc. Eric Guevara Berguer

Director de Escuela

Bach. Emanuel Molina Campos

Sustentante

DEDICATORIA

A Dios por darme coraje, salud y lucidez.

A mi familia por nunca haberme fallado.

A todos los agricultores de nuestro país que llevan el sustento a nuestras mesas. Hacen de nuestra profesión un orgullo.

A la Selección de Nacional de Fútbol de Costa Rica, gracias por hacer del 2014 un año especial.

AGRADECIMIENTOS

Al M.Sc. Rafael Mata Chinchilla, por su guía, compromiso y confianza para culminar con este proyecto y por ser un docente ejemplar y un profesional de excelencia.

A los señores José Joaquín Jiménez Alfaro y Omar Pérez Rodríguez, productores de café comprometidos con continuidad y la mejora del sector agropecuario, y a sus respectivas familias porque sin ellos este proyecto no se hubiese realizado.

Al Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), al Centro Agrícola Cantonal de San Mateo y al Ing. Agrónomo Carlos Barboza Gómez por su apoyo para la realización del estudio.

Al Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), al laboratorio de suelos por su gran colaboración en los análisis de fertilidad. Especialmente al Ingeniero Agrónomo Renato Jiménez Zúñiga por su apoyo para completar este estudio.

Al Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica por la colaboración brindada en los análisis físicos de suelo.

Al Laboratorio de Suelos y Foliar del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica por la colaboración brindada en los análisis químicos de suelo. Especialmente a la Ingeniera Agrónoma Floria Bertsch Hernández por facilitar esta operación y por sus recomendaciones.

Al M.Sc. Mario Villatoro Sánchez por su colaboración para la realización del proyecto, sus valiosas referencias bibliográficas y sus revisiones en la metodología de surcos y cárcavas.

Al Ingeniero Agrónomo Marlon Castillo Cordero por su colaboración en la instalación adecuada del geotextil "Silt Fence" y sus valiosos consejos para la realización de este trabajo.

Al Ingeniero Agrónomo Gustavo Molina Campos por su colaboración en la toma de datos y medición de las cárcavas presentadas.

Al Ingeniero Agrónomo Arturo Valenciano Sequeira por su confianza para emprender el proyecto.

A los compañeros del curso de Génesis y Clasificación de Suelos de la Universidad de Costa Rica del II semestre del año 2013 por su valiosa colaboración en la descripción y clasificación de los suelos estudiados en este proyecto.

Al Centro de Investigaciones en Protección de Cultivos (CIPROC) de la Universidad de Costa Rica por asistir al proyecto con una estación meteorológica y por la colaboración en la toma de datos meteorológicos.

Al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), a la Dirección del Centro de Servicios de Estudios Básicos de Ingeniería por la valiosa información meteorológica brindada para validar este estudio.

Instituto Meteorológico Nacional (IMN), al Sistema de Estaciones Meteorológicas Automáticas por la valiosa información meteorológica que otorgaron a este proyecto.

A tío Carlos, Nando, Sebas y Esteban por toda la ayuda brindada y apoyarme siempre.

A todos los que de alguna forma hicieron esto posible.

ÍNDICE

RESUMEN.....	xii
--------------	-----

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
Figura 1. Fotografía de la desembocadura del río Jesús María y plantaciones de melón donde se deposita gran cantidad del sedimento desprendido de la parte alta de la cuenca.	2
2. OBJETIVOS.....	2
2.1 Objetivo General	2
2.2 Objetivos Específicos	3
3. MARCO TEÓRICO	3
Cuadro 1. Tasas de erosión máxima dependiendo de la profundidad del suelo y el tipo de sustrato.	4
Figura 2. Mapa de modelo de elevación digital y ubicación del área de estudio dentro de la cuenca del río Jesús María.....	6
3.1 El proceso erosivo	6
3.1.1 Agentes Erosivos	7
3.1.2 Factores Erosivos	7
3.1.3 Erosividad y Erodabilidad.....	7
3.1.4 Conductividad hidráulica y erodabilidad	8
3.1.5 Tipos de erosión.....	8
3.2 Tipos de erosión hídrica.....	8
3.3 Medición de la erosión hídrica	10
3.3.1 Modelos de predicción	10
3.3.2 Indicadores	12
3.3.3 Métodos empíricos	14
3.3.4 Otros métodos de medición	16
3.4 Ley 7779, Taxonomía de Suelos y Capacidad de Uso de Tierras	16
3.5 Mitigación de la pérdida de suelo	17
3.5.1 Efecto de la precipitación y suelos desnudos	17
Cuadro 2. Importancia relativa de los efectos erosivos de episodios extremos de lluvia frente a los episodios de moderada a baja intensidad y elevada frecuencia.	18
Figura 3. Comportamiento de la precipitación pluvial mensual (a), la vegetación mensual (b) y la erosión mensual (c) e intensidad a través de un año.....	19
3.5.2 Prácticas de conservación y el cultivo de café con sombra	19
3.6 Antecedentes de erosión hídrica laminar y por cárcavas.....	22
3.6.1 Internacionales	22
3.6.2 Costa Rica.....	27

Cuadro 3. Propiedades hidráulicas del geotextil modelo Propex 1198.	35
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
4.1 Selección de fincas	36
4.1.1 Ubicación geográfica de las fincas seleccionadas	37
Figura 4. Imagen de satélite de la ubicación geográfica de las tres fincas utilizadas en el estudio de tasas de erosión en el distrito de San Rafael del cantón de San Ramón de Alajuela.	37
Figura 5. Fragmento de hoja cartográfica de Naranjo donde se muestra en un círculo de color rojo la finca Parte Alta y en un círculo color anaranjado la finca Parte Media.	38
Figura 6. Imagen de satélite donde se muestra la finca Parte Alta en color rojo y la finca Parte Media en color anaranjado.	39
Figura 7. Fragmento de hoja cartográfica de Río Grande donde se muestra en un círculo de color verde la Finca Parte Baja.	39
Figura 8. Imagen de satélite donde se muestra en color verde la finca Parte Baja.	40
4.2 Determinación de las áreas de muestreo	40
Cuadro 4. Códigos de las áreas de muestreo a evaluar.	41
4.2.1 Ubicación geográfica de las áreas de muestreo	41
Figura 9. Imágenes satelitales donde aparece en color rojo, anaranjado y verde, las fincas Parte Alta, Parte Media y Parte Baja, respectivamente y sus respectivas áreas de muestreo.	42
4.3 Establecimiento de las barreras con geotextil “Silt Fence” T2100 para la retención de sedimentos.....	42
4.3.1 Selección del geotextil “Silt Fence”	42
Cuadro 5. Propiedades hidráulicas y normas conformes del ASTM (American Section of the International Association for Testing Materials) de varios modelos de geotextiles tejidos “Silt Fence”.	43
4.3.2 Dimensiones y delimitación de las microparcels de erosión	43
Figura 10. Diagrama en de una microparcels de erosión. Los rombos representan estacas a las cuales está sujetado el geotextil por medio de grapas. La distancia entre estacas en el geotextil de recolección es de 80 cm, mientras que en el geotextil de protección están separadas por 1 m de distancia.	44
Figura 11. Fotografías del geotextil de recolección (GR) y geotextil de protección (GP) en una microparcels de erosión utilizada para la cuantificación de pérdida de suelo en un área de 21 m ² correspondiente al área de muestreo CSS-30+AG.	45
4.3.3 Materiales	45
Cuadro 6. Lista de materiales utilizados para la construcción de 15 microparcels de erosión para la recolección de sedimentos y cuantificación de la tasa de erosión en cafetales en la cuenca del río Jesús María.	46
4.3.4 Corte del geotextil	46
4.3.5 Excavación de la fosa de instalación para el geotextil de recolección	47
Figura 12. Fotografía de la fosa de excavación para la colocación del geotextil de recolección correspondiente a una microparcels de erosión de 21 m ² en un área de muestreo de CSS-60+AG. .	47
4.3.6 Colocación del geotextil de recolección	47
Figura 13. Dibujo de la fosa de excavación con el suelo reincorporado sobre el geotextil de recolección.	48

Figura 14. Fotografía que indica cómo acomodar el geotextil de recolección en la fosa de excavación correspondiente a una microparcela de erosión de 21 m ² en un área de muestreo de CLS-60+A.....	49
4.3.7 Ensamblaje del geotextil de recolección con las estacas.....	49
Figura 15. Dibujo del acomodo de las estacas con respecto geotextil de recolección antes de ser engrapadas a estas.	50
Figura 16. Fotografía que indica cómo ajustar el geotextil de recolección a las estacas de 1,20 m correspondiente a una microparcela de erosión de 21 m ² en un área de muestreo de CLS-60+A.....	51
4.3.8 Confección del pliegue del geotextil de recolección	51
4.3.9 Colocación del geotextil de protección	51
Figura 17. Fotografía del geotextil de protección correspondiente a una microparcela de erosión de 21 m ² en un área de muestreo de CSS-30+AG.	52
4.3.10 Correcciones finales.....	52
Figura 18. Fotografía del geotextil de recolección con clavos de arandela ancha correspondiente a una microparcela de erosión de 21 m ² en un área de muestreo de CSS-60+AG.	53
Figura 19. Diagrama resumen de la metodología para la adecuada instalación del geotextil de recolección.	54
4.4 Toma de datos y variables a evaluar	55
4.4.1 Tasa de erosión y período experimental	55
Figura 20. Fotografía de los materiales utilizados para la recolección semanal de sedimentos. Maletín con planillas para la toma de datos, balanza gravimétrica, pala de recolección de sedimentos, latas para las muestras de humedad gravimétrica y una hielera para su almacenaje, bolsas plásticas para las submuestras de fertilidad y textura y un balde multiuso.	55
Figura 21. Fotografía del procedimiento de pesado (A) y secado (B) del Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.....	56
Figura 22. Imagen de satélite de la finca Parte Media donde se ilustra la ubicación de tres cárcavas utilizadas para estimar la de erosión total de la finca (t/ha). C.N.: Cárcava Costado Norte, C.O.: Cárcava Costado Oeste, C.S.: Cárcava Costado Sur.	57
4.4.2 Pérdida de nutrimentos y materia orgánica del sedimento recolectado	57
Figura 23. Fotografías de la agrupación de submuestras (1) y el proceso de mezcla, homogeneización y cuarteado (2) para obtener una muestra compuesta de cada microparcela de erosión y realizarle un análisis de fertilidad y de porcentajes de materia orgánica en las primeras 11 semanas del proyecto.	58
4.4.3 Medición de precipitación	59
Figura 24. Imagen de satélite donde se ubica el sitio de estudio del proyecto y la estación meteorológica Nagaatac (10,0515411 N, 84,5443349 W), las altitudes de las mismas, y la distancia entre estos dos puntos.....	60
4.5 Caracterización de las áreas de muestreo.....	60
4.5.1 Clasificación Taxonómica de Suelos.....	60
4.5.2 Clasificación por Capacidad de Uso de Tierras	62
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	62
5.1 Clasificación Taxonómica de las fincas a nivel de Subgrupo.....	62
Figura 25. Fotografías de los pedones modales de la fincas Parte Alta, Parte Media y Parte Baja.....	63
5.1.1 Descripción de finca Parte Alta.....	63
Cuadro 7. Descripción general del pedón modal de la finca Parte Alta.....	64

Cuadro 8. Descripción morfológica del pedón modal de la finca Parte Alta.	65
5.1.2 Descripción de finca Parte Media	66
Cuadro 9. Descripción general del pedón modal de la finca Parte Media.	66
Cuadro 10. Descripción morfológica del pedón modal de la finca Parte Media.	67
5.1.3 Descripción de finca Parte Baja	68
Cuadro 11. Descripción general del pedón modal de la finca Parte Baja	69
Cuadro 12. Descripción morfológica del pedón modal de la finca Parte Baja	70
5.1.4 Descripción física y química de los pedones modales de los suelos estudiados	70
Cuadro 13. Porcentaje de arena, limo y arcilla determinado en el laboratorio por el método de Bouyoucos (Henríquez y Cabalceta 1999) de los horizontes en cada pedón modal analizado.	71
Cuadro 14. Clasificación cuantitativa de la conductividad hidráulica del suelo.	72
Cuadro 15. Características físicas de los horizontes del pedón modal de las fincas evaluadas.	73
Cuadro 16. Análisis químico completo de fertilidad de los horizontes del pedón modal de las fincas evaluadas.	74
Cuadro 17. Características químicas para clasificación de los horizontes del pedón modal de las fincas evaluadas.	75
Cuadro 18. Análisis de porcentaje de carbono y nitrógeno, relación carbono/nitrógeno y porcentaje de materia orgánica de los dos primeros horizontes del pedón modal de las fincas evaluadas.	76
Cuadro 19. Clasificación taxonómica a nivel de subgrupo de las tres fincas donde se realizaron las mediciones de pérdida de suelo.	77
5.2 Clasificación por Capacidad de Uso de Tierras	77
Cuadro 20. Clasificación de la capacidad de uso de tierras de las diferentes áreas de muestreo evaluadas.	78
5.3 Cuantificación y determinación de la tasa de erosión	78
5.3.1 Cuantificación de erosión laminar por medio del geotextil "Silt Fence" T2100	78
Figura 27. Pérdida de suelo total en un periodo de 11 semanas comprendido desde el 19 de julio hasta el 27 de setiembre del 2013, en cinco áreas de muestreo en plantaciones de café ubicadas en la cuenca del Río Jesús María, en el distrito de San Rafael de San Ramón de Alajuela.	80
Figura 28. Fotografía de una acequia de ladera y una gaveta de recolección en el área de muestreo CSS-30+AG (finca Parte Media) con aproximadamente 1,5 m de profundidad, tomada en setiembre del 2013.	80
Figura 29. Pérdida de suelo total en un periodo de 11 semanas comprendido desde el 27 de setiembre hasta el 13 de diciembre del 2013, en cinco áreas de muestreo en plantaciones de café ubicadas en la cuenca del Río Jesús María, en el distrito de San Rafael de San Ramón de Alajuela. .	81
Figura 30. Pérdida de suelo total en un periodo de 22 semanas comprendido desde el 19 de julio hasta el 13 de diciembre del 2013, en cinco áreas de muestreo en plantaciones de café ubicadas en la cuenca del Río Jesús María, en el distrito de San Rafael de San Ramón de Alajuela.	82
Figura 31. Fotografía del geotextil de recolección en el área de muestreo CMS-60+A, tomada en setiembre del 2013.	82
Figura 32. Fotografía de la acequia de ladera colapsada en el área de muestreo CMS-60+A, tomada en setiembre del 2013.	83
5.3.2 Estimación de la erosión por la medición de surcos y cárcavas en la finca Parte Media	85

Figura 33. Fotografías de microdeslizamientos en distintas partes del área en estudio. A: Dentro de los caminos de la finca Parte Media, B: Dentro de la finca Parte Alta, C y D: Al borde de la carretera de la finca Parte Alta.	86
Cuadro 21. Pérdida de suelo registrada en tres cárcavas en la finca Parte Media estimada por medio de la metodología de la medición de surcos y cárcavas.	87
Figura 34. Dibujo donde se explica el ordenamiento del suelo y el subsuelo y el movimiento del agua subterránea. La zona vadosa se encuentra por encima de la tabla de agua superior.	88
Figura 35. Fotografías de la cárcava Costado Sur ubicada en la finca Parte Media. A: Vista en contra de la pendiente, B: Vista del costado de la pendiente, C: Vista a favor de la pendiente.	89
Figura 36. Fotografía de la carreta que colinda con finca Parte Media, donde se observan obras viales deficientes que pueden estar afectando el proceso erosivo en la zona.	90
Figura 37. Fotografías de la cárcava Costado Norte (A) y Costado Oeste (B) ubicadas en la finca Parte Media.	91
Figura 38. Fotografía de los taludes de la acequia de ladera en la cárcava Costado Sur, ubicada en la finca Parte Media, cubiertos por plástico y geotextil T2100 y sembrados con caña india (<i>Dracaena spp.</i>).....	92
Figura 39. Fotografía del relleno de la cárcava Costado Sur, ubicada en la finca Parte Media luego de ser remediada con prácticas de conservación.	92
Figura 40. Fotografía de barreras vivas de vetiver (<i>Vetiveria zizanioides</i>) sembradas en el talud superior de las acequias de ladera en la finca Parte Media.	93
Figura 41. Fotografía de los drenajes en Rincón de Mora realizados en la carretera que conecta San Ramón Centro con Llano Brenes.	94

5.4 Pérdida total de nutrientes y materia orgánica..... 94

Cuadro 22. Comparación del tamaño de partícula del sedimento depositado en las microparcels de erosión en diferentes áreas de muestreo, en dos períodos de evaluación. Período I: del 19 de julio al 27 de setiembre, período II: del 27 de setiembre al 13 de diciembre.	95
Cuadro 23. Análisis químico completo del sedimento recolectado en el primer período de evaluación (del 19 de julio al 27 de setiembre del 2013) en todas las áreas de muestreo evaluadas.	96
Cuadro 24. Análisis químico completo del sedimento recolectado en el segundo período de evaluación (del 27 de setiembre al 19 de diciembre del 2013) en todas las áreas de muestreo evaluadas.	97
Cuadro 25. Promedio de densidad aparente del suelo recolectado en cada microparcelsa medido en la copa de 2,5 ml.	97
Figura 42. Pérdida del elemento calcio en distintas áreas de muestreo en dos períodos de evaluación y total. Período I: del 19 de julio al 27 de setiembre del 2013, período II: del 27 de setiembre al 19 de diciembre del 2013.....	99
Figura 43. Diagramas donde se explica la tolerancia de suelos a mantener su productividad después de eventos erosivos. (a): Suelo profundo con moderada a rápida permeabilidad, el cual después de pasar por eventos erosivos puede ser productivo con enmiendas químicas, (c): Suelo poco profundo con lenta permeabilidad, el cual después de pasar por eventos erosivos no recupera su productividad, aún con enmiendas químicas. (b): Intermedio entre la situación a y c.	100
Figura 44. Pérdida del elemento magnesio en distintas áreas de muestreo en dos períodos de evaluación y total. Período I: del 19 de julio al 27 de setiembre del 2013, período II: del 27 de setiembre al 19 de diciembre del 2013.....	101

Figura 45. Pérdida del elemento potasio en distintas áreas de muestreo en dos períodos de evaluación y total. Período I: del 19 de julio al 27 de setiembre del 2013, período II: del 27 de setiembre al 19 de diciembre del 2013.	101
Figura 46. Pérdida del elemento fósforo en distintas áreas de muestreo en dos períodos de evaluación y total. Período I: del 19 de julio al 27 de setiembre del 2013, período II: del 27 de setiembre al 19 de diciembre del 2013.	102
Figura 47. Pérdida de materia orgánica en distintas áreas de muestreo en dos períodos de evaluación y total. Período I: del 19 de julio al 27 de setiembre del 2013, período II: del 27 de setiembre al 19 de diciembre del 2013.	103
6. CONCLUSIONES.....	103
7. RECOMENDACIONES.....	104
8. BIBLIOGRAFÍA.....	107
9. ANEXOS.....	113
ANEXO 1. Características del geotextil “Silt Fence” T2100.....	113
ANEXO 2. Cálculos para la estimación de la erosión de suelo en la finca Parte Media por el método de mediciones de surcos y cárcavas.	114
ANEXO 3. Ejemplo de cálculos para la obtención de la pérdida de nutrimentos en kg/ha en el suelo recolectado de las microparcels de erosión.....	116
ANEXO 4. Resultados del régimen de precipitación diaria (mm) de la estación meteorológica Nagaatac del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) ubicada a 10,0515411 latitud Norte y 84,5443349 longitud Oeste.	119
ANEXO 5. Determinación de las categorías de los parámetros utilizados para la adecuada clasificación de tierras según su capacidad de uso.....	120
ANEXO 6. Tasas de erosión (t/ha) y régimen de precipitación semanal (mm) reportada en la estación Nagaatac.	121
ANEXO 7. Análisis físicos y químicos de los sedimentos recolectados en todas las microparcels de erosión.....	123

RESUMEN

DETERMINACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN LAMINAR EN CAFETALES UBICADOS EN LA CUENCA DEL RÍO JESÚS MARÍA

Autor: Emanuel Molina Campos

Director: Rafael Mata Chinchilla

Palabras Clave: *Erosión laminar, geotextil, conservación de suelos, tasa de erosión, pérdida de nutrimentos.*

Con el objetivo de determinar la tasa de erosión laminar de suelo, se seleccionaron tres fincas cafetaleras (Parte Alta, Parte Media y Parte Baja) ubicadas en la cuenca del río Jesús María (San Ramón, Alajuela), cuyos suelos se clasificaron taxonómicamente como Typic Ustorthents, Lythic Ustorthents y Vitrandic Ustorthents, respectivamente. Dentro de ellas se delimitaron cinco áreas de muestreo con condiciones de erodabilidad particulares: cafetal ligeramente sombreado con 30% de pendiente y acequias de ladera y gavetas de recolección (CLS-30+AG), cafetal sin sombra con 30% de pendiente y acequias de ladera y gavetas de recolección (CSS-30+AG), cafetal sin sombra con 60% de pendiente y acequias de ladera y gavetas de recolección (CSS-50+AG), cafetal ligeramente sombreado con 60% de pendiente y solamente acequias de ladera (CLS-60+A), cafetal moderadamente sombreado con 60% de pendiente y solamente acequias de ladera (CMS-60+A); estas se catalogaron todas como tierras de Clase VII. En las áreas de muestreo se establecieron microparcels de erosión de 21 m² mediante el uso de geotextil "Silt Fence" T2100, en las cuales se evaluó semanalmente el peso seco del suelo desprendido dentro de la microparcels y la precipitación semanal acumulada tomada por la estación meteorológica más cercana durante un período de 22 semanas comprendido desde el 19 de julio hasta el 13 de diciembre del 2013. Con el peso seco recolectado se calculó la pérdida laminar semanal de suelo, la pérdida laminar total de suelo, y la pérdida de nutrimentos y materia orgánica en dos períodos de evaluación de 11 semanas cada uno.

Como metodología adicional, se incluyó la estimación de pérdida de suelo por medio de la medición de surcos y cárcavas en la finca Parte Media. Se estimó la pérdida de suelo en tres cárcavas ubicadas a la periferia de esta finca (Norte, Oeste y Sur) y se estimó la pérdida en t/ha.

Se identificaron tres tipos de erosión hídrica en las áreas de muestreo: erosión hídrica laminar, erosión hídrica por surcos y erosión hídrica por remoción en masa. Las variables que más se relacionaron con el aumento de la pérdida laminar de suelo fueron: la precipitación, la alta magnitud de pendiente y el diseño de obras de conservación insuficientes. Los episodios de más

alta erosión laminar coincidieron con los períodos de mayor precipitación, así mismo, las áreas de muestreo ubicadas en las fincas a mayor altitud presentaron menor tasa de erosión laminar, las cuales se clasificaron todas como tolerable-moderada. Las mayores tasas de erosión laminar se encontraron en las áreas de muestreo CMS-60+A y CLS-60+A con pérdidas totales de 6,7 y 2,8 t/ha, respectivamente. Las áreas de muestreo CSS-30+AG, CLS-30+AG y CSS-60+AG presentaron una pérdida laminar de suelo total de 0,5 t/ha, 1 t/ha y 1,5 t/ha, respectivamente. En general, el sedimento recolectado en el primer periodo de evaluación presentó mayor porcentaje de limos y arenas, mientras que el segundo periodo presentó un mayor porcentaje de arcillas. Los elementos o componentes del suelo que registraron mayores pérdidas fueron: materia orgánica (12-78 kg/ha), calcio (1,5-25 kg/ha), magnesio (0,3-5 kg/ha), potasio (0,3-2 kg/ha) y fósforo (0,014-0,040 kg/ha). La metodología de microparcels a base de geotextil "Silt Fence" T2100 comprobó ser un metodología eficiente para determinar la erosión dada por el agua de escorrentía, sin embargo, no lo es así para la erosión dada por surcos. La estimación de erosión por la metodología de surcos y cárcavas en la finca Parte Media fue de 23 t/ha y se clasificó como moderada-severa. Al contrastarse los datos de pérdida de suelo encontrados dentro de la finca Parte Media con ambas metodologías, se encontró que con la metodología de medición de surcos y cárcavas, la pérdida de suelo fue de 20 t/ha más que en la metodología del geotextil (3 t/ha). Esto evidencia la versatilidad del proceso erosivo el cual puede ocurrir gradual o abruptamente.

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Jesús María cuenta con valiosos recursos naturales para fortalecer las economías locales agropecuarias de esta región. Sin embargo, en gran parte de esta cuenca, se encuentran terrenos con pendientes pronunciadas y alto riesgo de erosión, situación que se ha venido agravando en los últimos años. En el proceso erosivo de laderas, el horizonte fértil del suelo es removido gradualmente, perdiéndose nutrimentos del suelo y materia orgánica, además de que disminuye la profundidad efectiva para el crecimiento de las raíces (Barboza 2013). Para los agricultores de café, esto se traduce en rendimientos más bajos y en aumento de costos por compra de fertilizantes. Evidencia de esto han sido la formación de cárcavas en estos terrenos y la erosión en surcos de los cafetales, además de la acumulación de sedimentos en la parte baja de la cuenca (Figura 1). La erosión también tiene otras repercusiones aparte de la agrícola, según el La Sociedad Portuaria y Granelera de Caldera (Herrera 2013), en dos años se han acumulado en el muelle 550.000 m³ de sedimentos, lo que corresponden a una inversión de \$ 25 000 para la contratación de una draga para la extracción de los mismos.

Las prácticas y obras de conservación de suelo integradas con manejos de la plantación, son formas de mitigar este proceso erosivo. Sin embargo, la problemática que ha enfrentado la utilización de estas estrategias es la visión cortoplacista en cuanto a la obtención de resultados.



Figura 1. Fotografía de la desembocadura del río Jesús María y plantaciones de melón donde se deposita gran cantidad del sedimento desprendido de la parte alta de la cuenca.

Debido a esta problemática, este proyecto pretende cuantificar las tasas erosión laminar y determinar cómo se comportan en distintas pendientes y bajo prácticas de conservación y manejos alternativos en el cultivo del café sembrado en ladera durante un período de 22 semanas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Cuantificar la tasa de erosión laminar en cinco áreas cafetaleras con distintas pendientes, manejos y prácticas de conservación de suelo ubicadas en la cuenca del río Jesús María por el método de microparcels de erosión con el geotextil "Silt Fence" T2100 en un período de evaluación de 22 semanas.

2.2 Objetivos Específicos

- Cuantificar la tasa de erosión laminar, la pérdida de nutrientes y materia orgánica en cinco áreas cafetaleras con distinta pendiente, manejo y prácticas de conservación de suelo, utilizando microparcels de erosión que retengan sedimentos (geotextil “Silt Fence”).
- Clasificar taxonómicamente a nivel de Subgrupo las fincas donde se delimiten las áreas de muestreo a evaluar.
- Clasificar las cinco áreas de muestreo a evaluar con base en la metodología oficial en Costa Rica de clasificación de capacidad de uso de tierras.
- Validar la metodología del geotextil “Silt Fence” como una herramienta o metodología rápida, precisa y sencilla para determinar pérdidas laminares de suelo de manera preliminar.

3. MARCO TEÓRICO

La erosión es un proceso que está afectando muchas regiones del mundo, amenazando con la supervivencia de muchos pueblos. En Costa Rica, este tema es de gran consideración ya que la topografía general del país y el clima variable provoca un alto riesgo de erosión en zonas como Cartago, La Zona de los Santos y la vertiente Central del Pacífico. Según De Alba et al. (2011), que en general, la erosión máxima tolerable no debe sobrepasar los 11,2 t/ha/año para un suelo profundo (Cuadro 1), donde en Costa Rica se ha encontrado que la tasa de erosión reportada es de 13,2 t/ha/año (Hartshorn et al. 1982). Así mismo, se encontró que un 24% del territorio de nacional presenta de ligera a moderada erosión, un 14% presenta erosión severa y un 3% se encuentra en condición no apta para la agricultura por esta misma razón (CADETI 2004).

Cuadro 1. Tasas de erosión máxima tolerable (t/ha/año) dependiendo de la profundidad del suelo y el tipo de sustrato.

Profundidad efectiva (cm)	Sustrato favorable	Sustrato desfavorable	Valle del Guadalquivir
0-25	2,2	2,2	0,2
25-50	4,5	2,2	1,1-1,8
50-100	6,7	4,5	1,7-2,5
100-150	9,0	6,7	5,0-7,0
más de 150	11,2	11,2	5,3-7,1

Fuente: De Alba et al. 2011.

Brady y Weil (2008) mencionan un valor T que se refiere al valor máximo de erosión anual que puede permitir un suelo sin que este pierda productividad, según estos autores este valor en los Estados Unidos es de 5-11 t/ha/año, el cual depende en gran medida de la profundidad del suelo, contenido de materia orgánica y uso de prácticas de control de escorrentía.

Estos valores T citados por De Alba et al. (2011) y Brady y Weil (2008) son muy similares a los encontrados por Jeffery et al. (1994) citado por Núñez (2001). Este último establece categorías de tasas de erosión para zonas tropicales, donde el valor de pérdida de suelo tolerable (Clase 1) es por debajo de 10 t/ha/año:

- **Tolerable (Clase 1):** Los índices de erosión abarcan valores de 0-10 t/ha/año.
- **Moderada (Clase 2):** Los valores erosivos se sitúan entre 10 y 50 t/ha/año.
- **Severa (Clase 3):** Los índices erosivos se encuentran en un ámbito de 51 y 200 t/ha/año.
- **Muy severa (Clase 4):** Los valores erosivos exceden 200 t/ha/año.

La topografía irregular y las altas intensidades de lluvia que provocan más erosión en Costa Rica podrían hacer que estos valores de tolerancia (T) lleguen a disminuir, ya que en estas circunstancias es más propenso el suelo a perder productividad.

La cuenca del río Jesús María tiene un área de 375,5 km² y se encuentra políticamente situada en las provincias de Alajuela y Puntarenas, abarcando los cantones de San Ramón, Esparza, Palmares, Atenas, San Mateo, Orotina y Garabito (Figura 2). Esta

es una zona dedicada casi exclusivamente a la agricultura y la ganadería, con productos como melón, caña de azúcar, mango, caña india y café, dándose en esta cuenca una producción de aproximadamente 2350 toneladas métricas/año de este último cultivo (SEPSA 2012). La mayoría de la cuenca posee un declive relativamente plano, pero la zona noreste, donde están ubicados los cafetales en estudio, posee terrenos de ladera, a aproximadamente 1200 m.s.n.m. (Rojas 2011). En esta, existe una preocupación por parte de las autoridades extensionistas de la región del progresivo desgaste del suelo que se ha venido dando en estos cafetales. Condición que, entre muchos otros factores, es originada por el uso indebido de suelo, el clima y el manejo que se le ha dado a los cafetales sin utilización de sombra y con una nula o casi nula cobertura vegetal (Barboza 2013). Según CADETI (2004) el 30% de la vertiente del pacífico se encuentra de ligeramente a moderadamente erosionada y otro 30% extremadamente erosionada, así mismo Vásquez (1985), en un mapa publicado sobre la erosión en Costa Rica, muestra que esta cuenca posee zonas variables en donde se pierden de 10-200 t/ha/año. Por otro lado, parte de las cuencas del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) tienen una escasa cobertura boscosa (10-60%), lo que provoca un aumento en la pérdida de suelo y una acumulación de sedimentos en el embalse hidroeléctrico de estas (GFA Consulting Group S.A. 2009). Esto ha abierto la discusión sobre la evaluación de técnicas para disminuir la pérdida de suelo originada por la agricultura intensiva.

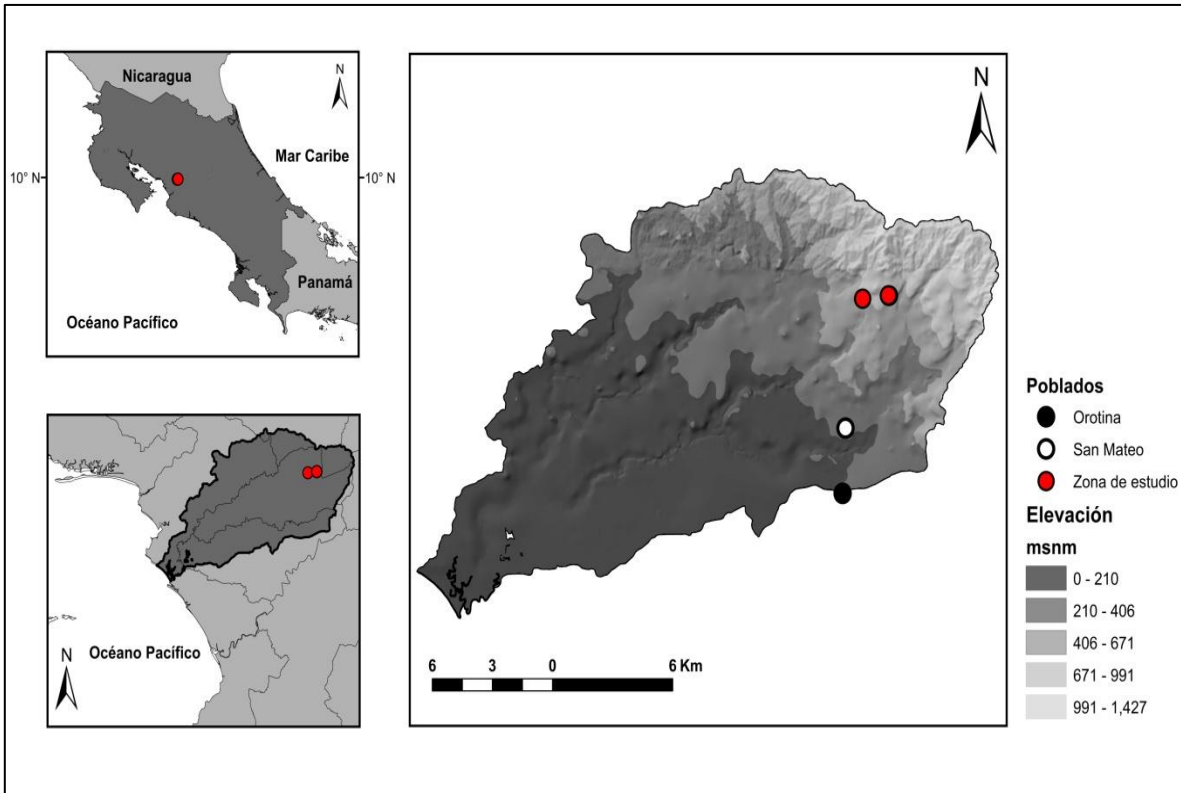


Figura 2. Modelo de elevación digital y ubicación del área de estudio dentro de la cuenca del río Jesús María.

Fuente: Laboratorio de Recursos Naturales, Centro de Investigaciones Agronómicas, UCR 2014.

3.1 El proceso erosivo

La erosión es un proceso natural el cual consiste en el desprendimiento de una parte del suelo y esta es transportada a otros sitios por medio de agentes erosivos (Morgan 1997). De esta forma, se considera que este se da en tres fases que son: el desprendimiento, el transporte y la sedimentación, por lo que naturalmente, el suelo no se pierde, solo se traslada (MAG/FAO 1996). La pérdida de suelo por otro lado, es un concepto que toma en cuenta únicamente la cantidad de suelo desprendida y no la cantidad depositada.

Como ya se mencionó, la pérdida de suelo es un proceso natural, de modo que siempre estará presente con menor o mayor intensidad según las condiciones del sitio, sin

embargo la actividad humana ha hecho que este proceso ocurra a una velocidad más acelerada.

Para comprender mejor cómo ocurre este proceso se deben entender primero algunos conceptos de esta disciplina como lo son los agentes y factores erosivos, la erosividad y erodabilidad.

3.1.1 Agentes Erosivos

Los agentes erosivos son los sistemas de transporte involucrados en el movimiento del suelo como lo son el viento y el agua de escorrentía (Morgan 1997).

3.1.2 Factores Erosivos

Núñez (2001) añade que los factores erosivos son los determinantes de la magnitud de los agentes erosivos. Se pueden agrupar en varios grupos: factores climáticos como la precipitación, la evapotranspiración y la velocidad del viento, otros propios del suelo, como la topografía (relacionados con las características de la pendiente), sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas, y los tipos y velocidades de flujo de escorrentía (factores hidrológicos). La gravedad es otro factor que influye en la magnitud de los agentes pero no corresponde a ninguna de las agrupaciones mencionadas.

3.1.3 Erosividad y Erodabilidad

La erosividad se refiere a la capacidad de un agente de erosionar el suelo, mientras que la erodabilidad se refiere a la susceptibilidad que tiene un suelo o un escenario espacial de erosionarse (Morgan 1997). Este último concepto se encuentra más relacionado con el comportamiento físico del suelo (Le Bissonnais 1996).

3.1.4 Conductividad hidráulica y erodabilidad

La erodabilidad del suelo depende en gran medida de la topografía en que este se desarrolla, ya que modifica la magnitud de la pendiente. Sin embargo, el suelo tiene características propias que también afectan su susceptibilidad a la erosión, como los son las propiedades físicas. Según Henríquez y Cabalceta (1999) son varias las propiedades físicas del suelo que están relacionadas con el movimiento de agua dentro de este, como la densidad aparente, densidad de partículas, espacio aéreo, porosidad total, infiltración y conductividad hidráulica y todas estas están relacionadas con la textura del suelo, que depende del origen de las arcillas que forman el suelo, el grado de meteorización de estas y otros agentes formadores.

Forsythe (1980) menciona que la conductividad hidráulica dentro de los perfiles sirve para evaluar la permeabilidad de los horizontes, la cual está dada por el valor de conductividad del horizonte menos permeable del perfil de modo que también sirve para estimar la erodabilidad de un suelo.

3.1.5 Tipos de erosión

Existen básicamente dos tipos de erosión basada en sus agentes, la eólica, transportada por el viento y la hídrica, donde actúan sinérgicamente los agentes como el agua y la gravedad. En Costa Rica, la erosión hídrica suele ser la más frecuente dado que las altas pendientes y la precipitación propician condiciones ideales para que esta ocurra (CADETI 2004). Esta se da principalmente por flujos de agua, ya sean superficiales o flujos subterráneos.

3.2 Tipos de erosión hídrica

La literatura (Ramírez 2009, Brady y Weil 2008, Chaplot 2013) menciona 6 tipos de erosión relacionada con la precipitación y movimiento del agua:

- Erosión laminar: Esta ocurre superficialmente, la cual normalmente ocurre de manera uniforme por toda la superficie del suelo y arrastra normalmente las capas más superficiales. Este es el tipo de erosión hídrica es la más frecuente de las seis mencionadas.
- Erosión por surcos: Se da cuando el agua transcurre de forma repetitiva por cierta área del suelo, movilizándolo, creando pequeños canales o surcos. El suelo perdido por este tipo de erosión es difícilmente recuperable.
- Erosión laminar entre surcos: Es un tipo de erosión laminar que ocurre en el espacio comprendido entre dos surcos.
- Erosión por cárcavas o quebradas: Sucede similar a la erosión por surcos pero a mayor magnitud, creando grandes quebradas en donde ya no es posible sembrar o recuperar el suelo. Esta es muy devastadora, y la mayor responsable del proceso erosivo.
- Erosión por salpique: Corresponde a la pérdida de suelo que se da cuando las gotas de lluvia impactan el suelo con suficiente energía para desprender sus partículas.
- Erosión por remoción en masa: Ocurre cuando en los suelos con altas pendientes se da un exceso de infiltración (Ramírez 2009) y por acción de la gravedad se producen remociones de suelo como derrumbes y deslizamientos.

Así mismo, existe otro tipo de erosión más, la cual, si bien es cierto, no es causada totalmente por el efecto del movimiento del agua, es muy común en Costa Rica, esta es la erosión por labranza, y se da por un mal manejo en la preparación del terreno en zonas con altas pendientes, donde el suelo es arado a favor de la pendiente y se transporta a las zonas bajas del terreno. Mehuys et al. (2009) encontraron en suelos volcánicos de Cartago, que mediante la utilización del arado de disco, este tipo de erosión tiene un potencial muy alto, ya que estos valores de erosión fueron el doble de los reportados en Europa y Norte América, en especial si se realiza a favor de la pendiente.

Otros autores como Chaplot et al. (2005) encontraron en ensayos realizados en subcuencas en Laos que en el trópico la forma de erosión más frecuente es del tipo dada por

surcos y cárcavas. Otros tipos de erosión como la laminar o la erosión por labranza de suelo pueden crear movimientos de suelo pero redistribuyéndolos en la misma finca o terreno, por otro lado la erosión linear o por cárcavas hace que el suelo se deposite en los afluentes y se pierda por completo.

3.3 Medición de la erosión hídrica

3.3.1 Modelos de predicción

Existen formas de estimar y medir la pérdida de suelo en una finca. Se diferencian en que las primeras son relativamente más sencillas de realizar en campo y se requieren pocos materiales para su realización, conocidos como indicadores de erosión. También puede ser estimada por medio de modelos, los cuales basados en información general del sitio de estudio, calculan la cantidad de suelo perdido, utilizando una ecuación o fórmula con valores e índices que describen matemáticamente la remoción, transporte y deposición de las partículas del suelo, tal es el caso de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (EUPS o USLE por sus siglas en inglés).

Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo

Dentro de los modelos por factores, uno de los más importantes y más utilizados es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Este modelo, creado por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos está basado en una ecuación construida por más de 40 años de experimentación bajo condiciones naturales controladas con simuladores de lluvia y parcelas de esorrentía (Wischmeier y Smith 1978). De esta forma, se obtiene una estimación a largo plazo de la erosión causada por lluvia, en función de factores establecidos para condiciones variables. Esta depende de las características de la lluvia (R), tipo de suelo (K), pendiente (LS), manejo del cultivo (C) y prácticas de conservación (P). Está definida por:

$$A = 2,24 * R * K * LS * C * P$$

Donde:

A = pérdida de suelo estimada (t/ha/año)

R = factor de erosividad por lluvia (MJ.mm/ha.h.año)

K = factor de erodabilidad del suelo (t.ha.h/MJ.mm.ha)

LS = factor de pendiente (largo e inclinación)

C = factor de manejo del cultivo

P = factor de prácticas de conservación

Al continuar los años y la investigación, nuevas mejoras se le han hecho a esta ecuación como por ejemplo correlaciones con mapas revisados de isoerodentas (líneas que unen puntos en un mapa con igual tasa de erosión), enfoques variables en el tiempo para el factor de erodabilidad del suelo, un nuevo enfoque para reflejar longitud de la pendiente e inclinación, y nuevos valores para las prácticas de conservación (Renard et al. 1991), de esta forma se ha mejorado la calibración de la ecuación y se le nombró Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE por sus siglas en inglés). Así mismo, en Costa Rica, Lianes et al. (2009) realizaron esfuerzos para reevaluar el factor C (cobertura) del modelo RUSLE mediante el análisis de la capacidad de uso del suelo y la caracterización y medición en campo de los tipos de cobertura vegetal en la cuenca del Río Birris, esto con el fin mejorar el manejo de las prácticas de conservación en dicha cuenca.

Este modelo toma mucha importancia dada su relativa sencillez en su forma de aplicación, describe los efectos principales de la erosión, se usa como guía para realizar planes de conservación y analizar tendencias en el tiempo. Sin embargo, esta ecuación no se encuentra calibrada para los trópicos por lo que no es un estimador preciso de pérdida de suelo, ya que suele hacer sobreestimaciones de esta pérdida (Vahrson 1990 y Oyarzun 1993). Además, se ha encontrado que cuenta con limitaciones para caracterizar el suelo

en condiciones tropicales para definir su susceptibilidad en a la erosión (Mora 1987). Para evitar estos problemas, existen otras metodologías que se pueden utilizar para medir erosión, tal es el caso de los indicadores de campos y métodos empíricos.

3.3.2 Indicadores

La medición de tasas de erosión se ha dificultado por ser un fenómeno influenciado por diversas variables climáticas y edáficas que no se pueden controlar con facilidad, haciendo de este un proceso versátil. Los modelos de predicción utilizados en estudios para cuencas de gran tamaño resultan más sencillos y baratos para determinar estas tasas, pero Chaplot et al. (2005), mencionan que estos asumen demasiadas condiciones de campo y pocas veces tienen relación para corregir problemas de erosión en sitios puntuales, ya que dan una noción general de la pérdida de suelo.

Otra forma de estimar la pérdida de suelo es mediante indicadores de campo. Estos parten de un medición realizada en la finca o sitio de estudio y luego se realiza una transformación matemática de los datos para obtener un resultado en la unidad de peso por área como por ejemplo “t/ha”. Cabe mencionar que para utilizar estos indicadores es necesario contar con un dato de densidad aparente, puesto que las mediciones se hacen en volumen y los datos de pérdida de suelo se manejan por peso. De acuerdo a Hudson (1997) y Nuñez (2001):

- Medición de pedestales
- Medición del desnivel en el campo
- Medición de raíces expuestas
- Medición de surcos y cárcavas

Las estimaciones parten del supuesto de que el volumen formado por la cárcava, pedestales o desniveles se perdió sin que se tenga el dato de peso de suelo erosionado. Aunque estas metodologías no sean una medición real de la masa que se pierde en un

área determinada, son más puntuales que un modelo de predicción y pueden revelar más información sobre las causas.

Metodología de medición de surcos y cárcavas

Los surcos y cárcavas probablemente sean los indicadores más sencillos de identificar en el campo. La erosión por surcos y cárcavas no está influenciada completamente por el agua de escorrentía difusa. Los surcos y cárcavas están más influenciados por la escorrentía concentrada (Ramírez 2009). Aunque la escorrentía sea uno de los principales factores del deterioro del suelo, en la erosión por surcos hay un mayor peso de la topografía, de las características físicas del suelo que cambian de acuerdo al paisaje y a la profundidad, y de los movimientos de agua dentro del subsuelo influenciados por los drenajes en las construcción de carreteras (Chaplot et al. 2005). Por esta razón, si el área en estudio presenta este tipo de formaciones es necesario medirlas, ya que esta puede estar enmascarando una pérdidas de suelo que, a diferencia de la erosión laminar, puede no estar influenciada por un alto caudal de escorrentía. De esta forma, se puede llegar a obtener más información real sobre el comportamiento temporal y espacial del proceso erosivo, y así plantear soluciones más específicas para socavar con este problema.

A la hora de medir una cárcava, su forma irregular no puede adaptarse a una figura geométrica estándar, confirmando su naturaleza como una forma de estimación, más que de medición. Somarriba et al. (2005) explican esta metodología mediante variaciones dependiendo de la forma de la cárcava, donde se utiliza una fórmula matemática que cambia si esta tiene forma de “V” o forma de “U”. La fórmula corresponde a las áreas transversales de un segmento, con las cuales se obtiene el volumen de este último. Independientemente de la forma de la cárcava, el objetivo de la medición consiste en determinar el volumen de estos segmentos que finalmente se suman para obtener el volumen total de la cárcava.

3.3.3 Métodos empíricos

Los métodos empíricos permiten tener mayor control de las variables que influyen en la pérdida de suelo, ya que a diferencia de los indicadores y modelos, estos se basan en el montaje de ensayos o monitoreos instalados en el área que se requiere estudiar. Esto permite que los resultados obtenidos estén más correlacionados con las condiciones climáticas y edáficas propias de la finca o región donde se quieran hacer las mediciones. Hudson (1997) y PASOLAC (2005) mencionan algunos de estos métodos:

- Varillas para sedimentación: En este se clavan varillas metálicas en la superficie del suelo y se mide cuanto ha bajado el nivel de este con respecto a las varillas
- Collares pintados: Se utilizan de forma que se colocan estos collares alrededor de una piedra o árbol apenas por encima del nivel del suelo, de modo que el suelo removido se evidenciará en una banda pintada.
- Parcelas de escorrentía: Está influenciada por la velocidad del agua de escorrentía difusa (Ramírez 2009) la cual se distribuye por el lote o área de forma uniforme. Esta consiste en establecer pequeñas parcelas con bordes físicos que limiten los escurrimientos y colocar estructuras de recolección en los puntos de descarga de las parcelas, de esta forma el agua de escorrentía transporta los sedimentos a la estructura recolectora. Luego se pesa en húmedo los sedimentos y se les mide la humedad gravimétrica para determinar la masa real de sedimentos, o bien puede estimarse mediante la utilización de una alícuota. Así mismo, estas también miden flujos de escorrentía y por ello el nombre, sin embargo en este proyecto no se medirá la escorrentía por lo que se les denominará parcelas o microparcels de erosión.

Parcelas de erosión y el geotextil “Silt Fence”

Las parcelas de erosión son una forma precisa de estimar la pérdida de suelo, aunque suelen ser caras y han sido criticadas por su ineficiencia. Hudson (1997), advierte que durante muchos años, estas no han presentado datos confiables porque entre otras razones, han sido mal manejadas desde el punto de vista técnico y los datos y correlaciones climáticas han sido analizadas erróneamente. La utilización de estas parcelas se ha recomendado a situaciones donde se requiera alcanzar un objetivo concreto o donde se quieran hacer comparaciones.

El geotextil “Silt Fence” es una herramienta comúnmente utilizada en la ingeniería civil para evitar la pérdida de suelo en sitios de construcción. Esta consiste en una barrera de polietileno tejido permeable que retrasa la velocidad de escorrentía y al mismo tiempo retiene las partículas de suelo. Robichaud y Brown (2002) mencionan que para medir erosión, es una metodología sencilla de aplicar y de fácil acceso, económica y superior en efectividad comparada con otras prácticas de conservación como barreras muertas. Sin embargo, advierten que no se debe utilizar en áreas donde el flujo de agua se concentre (erosión por surcos). Además mencionan los autores que sus principales limitaciones se dan cuando la instalación se realiza de forma errónea debida a que se complica su reinstalación, y requiere de constante mantenimiento.

La metodología con el geotextil de “Silt Fence”, es una modificación a las parcelas de escorrentía, donde la estructura de recolección es un compartimento hecho a base de este material a diferencia de las parcelas más antiguas que solían tener un estañón o cubetas de plástico para recolectar el sedimento. Además de la estructura de recolección, en el pasado, los bordes de las parcelas se delimitaban con tierra, paredes de ladrillo y láminas de madera o de zinc (Nuñez 2001 y Hudson 1997). Por esta razón Prado y Aguilar (2007) fomentaron la utilización de este material para la construcción de parcelas experimentales, ya que al garantizar una adecuada recolección de sedimento y dar un valor directo de peso de suelo perdido de la microparcela, resulta ser una forma útil, sencilla y económica para determinar ciertos procesos de erosivos. Castillo (2012),

revalidó la utilización de esta metodología en el cultivo de papa en Pacayas de Cartago y encontró que este es método efectivo como una alternativa preliminar para realizar estudio de erosión debido a que el material posee una eficiente retención de sedimentos.

El tamaño de estas parcelas es variado, pero usualmente pueden llegar a medir hasta 100 m de longitud y 25 m de ancho, este proyecto manejará parcelas pequeñas de 7 m de largo por 3 m de ancho (microparcels de 21 m²).

3.3.4 Otros métodos de medición

Existen otros métodos novedosos para la medición y estimación de la erosión de suelo, basados exclusivamente en sus características físico-químicas y en la dinámica que esta presenta con el agua. Le Bissonais (1996) expone una serie de metodologías de laboratorio para estudiar el comportamiento del colapso de los agregados de distintas clases de suelo, relacionándolo con la intensidad de lluvia y contenido de carbono en el suelo, de modo que se pueda modelar para estimar tasas de erosión (Legout et al. 2005). Se ha encontrado que la susceptibilidad de los agregados al colapso se correlaciona con el aumento de la erosión laminar de suelo, ya que en este tipo de erosión el colapso de los agregados es inmediato y además, con bajos contenidos de materia orgánica que le da estabilidad y estructura al suelo (Le Bissonais y Arrouays 1997, Le Bissonais et al. 2007). Por otro lado, este tipo de metodologías no dan suficiente información de los agentes erosivos, esto hace que se vuelvan más relevantes para comparar suelos o para comparar situaciones climáticas en un mismo suelo, pero no para una estimación de tasas de erosión. Aparte de esto, se vuelven una buena herramienta para la estimación de erodabilidad física de suelo.

3.4 Ley 7779, Taxonomía de Suelos y Capacidad de Uso de Tierras

La Ley 7779 sobre Uso, Manejo y Conservación de Suelos fue creada en 1998 y en parte se originó para cubrir los vacíos que dejó la Ley Forestal 7575 en cuestiones de conservación de suelos. Mediante 67 artículos, la ley constituye un marco jurídico y

ambiental donde se delegan a diferentes instituciones gubernamentales el manejo, fiscalización, conservación, uso y explotación de los suelos. En esta se incentiva a las comunidades y productores a la adecuada gestión, planificación e integración del uso suelo con otros recursos naturales, de acuerdo a su capacidad productiva para que sea posible un desarrollo sostenible. Por último, otro de sus objetivos es el impulso de la implementación de prácticas agroecológicas integradas para combatir la erosión, desertificación y la contaminación de los mantos acuíferos (MAG 1998).

Para cumplir con éxito la implementación de un plan de conservación de suelo es imprescindible adecuar este de acuerdo con la capacidad de uso de tierras. La clasificación taxonómica de suelos explica de forma detallada la geomorfología propia del suelo, la cual puede ayudar a explicar muchos fenómenos que ocurren en la naturaleza de los procesos erosivos, de esta forma, contribuye a la realización de recomendaciones acertadas en cuanto al manejo del suelo. Sin embargo, este tipo de clasificación puede volverse muy técnica y en ocasiones impráctica para el análisis del uso de las tierras.

Con la clasificación mediante la capacidad de uso de las tierras se obtiene una perspectiva más práctica para el manejo de tierras agrícolas. Esta consiste en definir el grado de intensidad de uso del mismo con base en las limitantes que esta posee para producir de forma sostenible y sin deterioro de suelo (Cubero 1995). Una vez clasificado el suelo dentro de la capacidad de uso, se pueden tomar las medidas de conservación de suelo recomendadas

Por esta razón es conveniente utilizar la clasificación de capacidad de uso de tierras originado por Bolaños et al. (1991) para determinar la aptitud que tienen las tierras en Costa Rica para diferentes fines, ya sea agricultura, obras civiles, reforestación, etc.

3.5 Mitigación de la pérdida de suelo

3.5.1 Efecto de la precipitación y suelos desnudos

El factor climático que más influye sobre en la erosión hídrica es el de la precipitación, ya que al aumentar la cantidad de agua en el suelo, este cambia su

consistencia y es más susceptible a ser transportado por las aguas de escorrentía. El efecto de esta se ve determinada por la cantidad, distribución, frecuencia, variabilidad, duración e intensidad (De Alba et al. 2011).

La intensidad de lluvia es la cantidad de lluvia que precipita al suelo en un lapso de tiempo, comúnmente dado en “mm/h”. Aunque en este trabajo no se contó con datos de intensidad de lluvia, es importante conocer el efecto que tiene sobre los suelos, ya que se ha sugerido (Cuadro 2) que las eventos de lluvia muy intensos provocan altas pérdidas de suelo.

Cuadro 2. Importancia relativa de los efectos erosivos de episodios extremos de lluvia frente a los episodios de moderada a baja intensidad y elevada frecuencia.

Tipo de episodio	Tasa de erosión (t/ha/año)	Porcentaje (%)	Lámina de suelo perdida (mm)	Densidad aparente (g/cm³)
Baja a moderada intensidad de lluvia	7,3	15	0,5	1,5
Episodios extremos	39,0	84	2,6	1,5
Total	46,3	100	3,1	1,5

Fuente: De Alba et al. 2011.

Otra variable importante dentro la erosión de suelo es la cobertura vegetal. La Figura 3 explica cómo actúa esta junto con la precipitación, donde la mayor erosión mensual se dio en los momentos del año donde se traslapan condiciones de una pobre cobertura vegetal y un aumento en la cantidad de agua precipitada. Sin embargo, la Figura 3 también hace notar que la erosión depende más de la cantidad de cobertura en la zona que la cantidad de lluvia. La cobertura vegetal ayuda a contrarrestar el efecto que tiene el salpique de las gotas de lluvias y mantiene mejores condiciones de la superficie del suelo para captar y almacenar agua (MAG/FAO 1996).

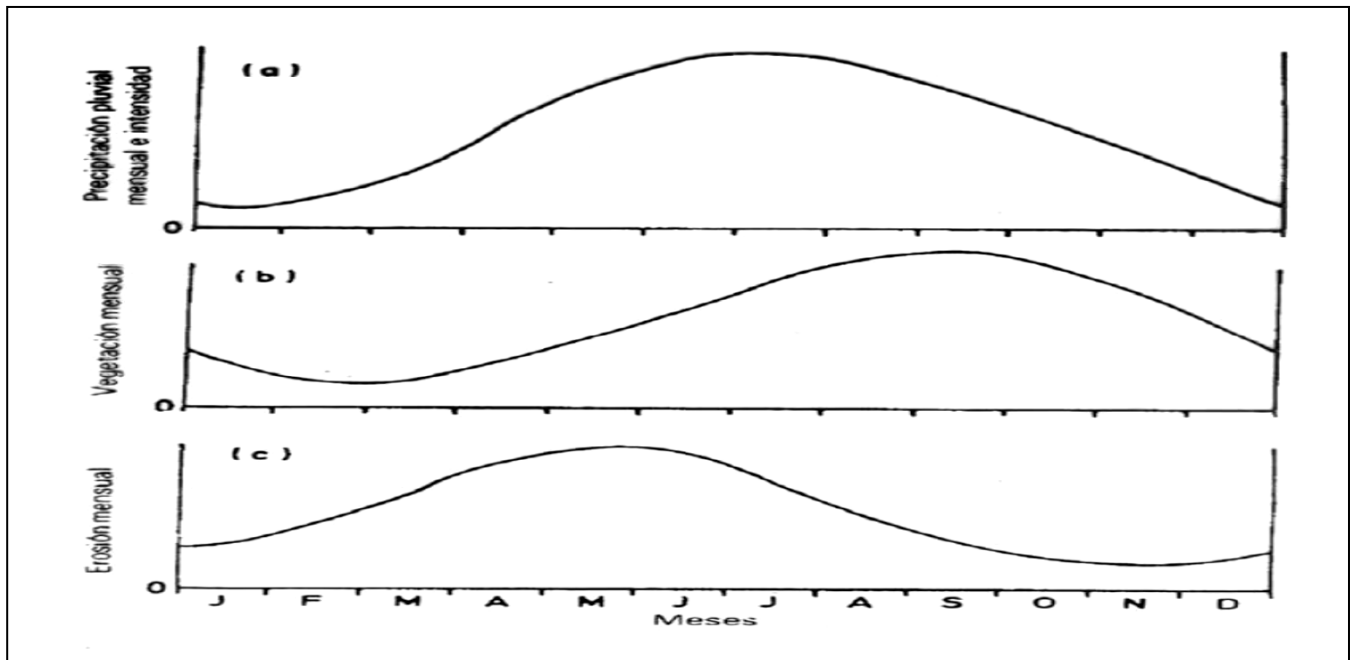


Figura 3. Comportamiento de la precipitación pluvial mensual (a), la vegetación mensual (b) y la erosión mensual (c) e intensidad a través de un año.

Fuente: Morgan 1997.

Muchas arvenses nativas pueden ser utilizadas como coberturas, pero existe todavía una noción generalizada en el campo que alega que cualquier arvense es nociva para la plantación y esta se debe mantener completamente limpia con herbicidas. Ramírez (2009) menciona que las arvenses nativas más adecuadas para utilizarse como cobertura son: el canutillo (*Commelina difusa*), cinquillo (*Drymaria cordata*), ayotillo (*Hydrocotyle bowlesioides*), cansa gente (*Oplismenus burmannii*) y acedera (*Oxalis corniculata*).

3.5.2 Prácticas de conservación y el cultivo de café con sombra

Las prácticas de conservación son las formas más económicas de evitar pérdidas de suelo por escorrentía, ya que estas consisten en hábitos culturales que deberían ir de la mano con cualquier manejo de plantación en laderas, además de que son más fáciles de aplicar que otras técnicas de conservación de suelos. Según Santacruz (2011), en la cuenca del río Cahoacán en México, utilizando modelos de predicción como la EUPS, la utilización de prácticas de conservación como la utilización de siembras en contorno y barreras vivas

pueden potencialmente disminuir en un 60% la pérdida de suelo. Algunas de las prácticas que han funcionado mejor se citan a continuación (De Alba et al. 2005, Andrade y Rodríguez 2002, Tapia et al. 2002):

- Prácticas de contorno
- Alta densidad de siembra
- Cultivos múltiples
- Cobertura muerta del suelo
- Labranza mínima o conservacionista
- Barreras vivas

Según Cubero (1999) existen varias especies que se pueden utilizar como barrera viva y cada una de estas tiene sus virtudes y limitaciones. Menciona como ejemplo, que el gandul (*Cajanus cajan*) fija nitrógeno y provee forraje y leña pero no cierra bien en su base, mientras que el king grass (*Saccharum sinense*) cierra bien en su base pero su carácter invasivo lo hace difícil de manejar. La caña india (*Dracaena fragans*) y el itabo (*Yuca elephantipes*) no cierra bien en su base pero tiene un sistema radical profundo que sostiene los taludes de los canales y los caminos. Otros como el zacate limón (*Andropogon citratus*) y el vetiver (*Vetiveria zizanioides*) cierran bien en la base pero son hospederos de los piojillos de la raíz del café (*Dysmicoccus* spp.) y de algunos roedores, respectivamente. No obstante, se menciona que estas prácticas deben ser aplicadas no solo desde la óptica conservacionista sino que también tengan un sentido práctico para aumentar la productividad de los agricultores.

La utilización de sombra en el cultivo de café no es precisamente una práctica de conservación, pero puede ser considerada como tal debido a que en suelos de baja fertilidad y en condiciones adversas, la constante producción de residuos orgánicos de los árboles mejoran la fertilidad del suelo, mantienen la humedad y brindan una cobertura muerta al suelo evitando que este se pierda (Vargas 2003). Normalmente, la evidencia experimental y la producción comercial de café ha indicado que este es más productivo en

condiciones de sol cuando las condiciones agroecológicas son favorables, sin embargo la productividad suele variar bastante en el largo plazo, se corre el riesgo de que este se agote más rápidamente. La ventaja que la sombra puede proporcionar a las plantaciones de café radica en las condiciones desfavorables de clima y suelo, o por manejos inadecuados de podas que inducen agotamiento rápido y renovaciones más adelantadas, haciendo que funcione como un remediador de suelos desgastados (Ramírez 2009). Bajo condiciones de sombra, el café suele tener menos productividad pero esta es más estable en el tiempo, aumentando su sostenibilidad.

Dentro de las opciones de especies que se utilizan como sombra en los cafetales están los árboles de la familia Fabaceae, ya que estas, además de los beneficios mencionados anteriormente, asocian sus raíces con bacterias fijadoras de nitrógeno mejorando la disponibilidad de este elemento en el suelo, además de que algunas de estas pierden sus hojas y crean un cobertura muerta en el suelo. Algunas de estas son (OIRSA 2001):

- Poró extranjero, poró gigante (*Erythrina poeppigiana*)
- Poró copey (*Erythrina glauca*)
- Cuajiniquil (*Inga edulis*, *Inga vera*)
- Guaba (*Inga mollifoliola*, *Inga paterno*)
- Gandúl o frijol de palo (*Cajanus cajan*)

También se ha recomendado la utilización de especies forestales ya que la gran profundidad que alcanzan las raíces de estos mejoran la aireación de suelo y extraen nutrientes de donde el café no lo hace, evitando la competencia. Además, permiten al caficultor contar con otra fuente de ingresos, como es la madera de estos árboles. Entre ellos se encuentran:

- Cedro (*Cedrela odorata*)
- Laurel (*Cordia alliodora*)

3.6 Antecedentes de erosión hídrica laminar y por cárcavas

3.6.1 Internacionales

La mayoría de estudios sobre tasas de erosión se han realizado mediante la Ecuación Universal de pérdida de suelo debido a su relativa sencillez como modelo de predicción. De esta forma, Santacruz (2011), mediante esta ecuación estima tasas de erosión en la cuenca del río Cahoacán, en Chiapas, México, donde se evaluaron tres escenarios, uno con el uso actual de suelo y dos hipotéticos, en donde en uno se modificó solamente el uso de suelo en la cabecera de la cuenca (factor C) simulando una progresiva deforestación y al otro se le añadieron prácticas de conservación de suelo (factor P). En cuanto a los resultados, se encontró que en el primer escenario de uso de suelo actual, la tasa de erosión (A) es de 13 a 20 t/ha/año. En el segundo caso, donde se sustituyó el bosque en la cabecera de la cuenca por tierras cultivadas, la erosión aumentó hasta 34 t/ha/año. Por último, en el tercer caso, incorporando prácticas de conservación de suelos como la utilización de curvas de nivel, se disminuyeron los valores de "P" de 1 a 0,3 y 0,4 y la tasa de erosión (A) disminuyó en un 60% con valores máximos de 4 a 8 t/ha/año. Como se puede apreciar, este tipo de estimaciones utilizando el modelo de EUPS pueden brindar información comparable en cuanto al uso del suelo, pero siempre parten de un dato dado subjetivo propuesto en el modelo que no siempre se asemeja a la realidad cambiante del campo.

Bienes et al. (1996) utilizó parcelas de esorrentía de 80 m² para medir tasas de erosión laminar y esorrentía en suelos clasificados como Calcic Haploxeralfs con aproximadamente 6% de pendiente, donde se utilizaron estañones de 360 l para almacenar el sedimento desprendido y el agua de esorrentía. Se instalaron cuatro tipos de parcelas en la zona de Alcalá de Henares, Madrid, una con el suelo desnudo, una con barbecho labrado, una con cultivo de cebada en fase de espigado y la última con vegetación espontánea, y las tasas de erosión se midieron en una tormenta de aproximadamente 64 mm/h. Se encontró que las parcelas con mayores tasas de erosión y mayor esorrentía fueron la de suelo desnudo y la de barbecho labrado con tasas de

erosión de 3,0 y 2,8 t/ha y escorrentías de 7,9 l/m² y 8,2 l/m², respectivamente. Las parcelas cultivadas con cebada en fase de espigado proveen al suelo una mejor cobertura que la cobertura espontánea y estas dos presentaron las menores tasas de escorrentía (0,70 y 69 kg/ha, respectivamente). Así mismo, estas últimas presentaron el mayor porcentaje de infiltración (por encima de 90%), lo cual disminuyó la escorrentía total. Así mismo se determinó que la materia orgánica es el componente del suelo que más se lavó junto con las partículas de limo. Este tipo de estudios presentan datos más puntuales y exactos sobre la realidad del campo en cuanto a las variables que afectan la erosión de suelo, y además, sobre el tipo de erosión que está afectando las áreas de estudio, en este caso, erosión laminar. Los modelos de predicción pueden estimar la magnitud de la erosión, pero no determinan cómo se está dando esta, la cual es importante para tomar medidas de contingencia. Los resultados indican que esta tasa de erosión fue considerada como tolerable (3 t/ha, como máximo), contando con el hecho de que fue tomada en una sola tormenta. También se nota que contrario al pensamiento generalizado de que siempre la agricultura en ladera provoca más pérdida de suelo, el cultivo de cebada fue el escenario donde se encontró menor tasa de erosión, lo que indica que dependiendo del tipo de cultivo y pendiente se puede favorecer o no este proceso.

Le Bissonnais et al. (1998) realizó otro estudio, donde cuantificaron y determinaron el encostramiento, la escorrentía y la tasa de erosión en la zona noroeste la cuenca de París (Pays de Caux). Esta zona se caracterizó por poseer suelos poco variables en el orden de los Alfisoles con altos contenidos de limo (60%), pendientes de 1-4% e intensidades de lluvia moderadas de aproximadamente 10 mm/h en el 80% de las precipitaciones. El objetivo de este estudio fue realizar pequeños ensayos de 1, 20 y 500 m² para determinar la erosión y el coeficiente de escorrentía, así como la determinación de la escorrentía en una pequeña parte de la cuenca para una posible extrapolación a toda la cuenca. La escorrentía en las parcelas fue recolectada mediante canoas colocadas en la parte inferior de las parcelas, las cuales iban conectadas a embalses donde se midió la cantidad de agua y con una alícuota de esta, se midieron los sólidos en suspensión. Por otro lado, la escorrentía de la microcuenca se midió mediante un vertedero en la parte baja de esta,

conectada a un sensor de volumen de agua. Los resultados indicaron que los coeficientes de escorrentía fueron muy variables dependiendo de la condición de la superficie del suelo y la variabilidad espacial, sin embargo se encontró que las parcelas experimentales pueden utilizarse para crear los modelos de predicción de escorrentía en toda la cuenca, pero se requieren de más puntos de evaluación. Se aclaró también que, este modelo no tiene validez para ser extrapolado a otras cuencas puesto que sólo representan las características de esa cuenca. En cuanto a los sedimentos y la pérdida de suelo, las parcelas presentaron rangos entre 2-4 t/ha y la mayoría de esta pérdida (90% de las veces) se dieron bajo intensidades de lluvia de cercanas a los 35 mm/h, mientras que la pérdida en la cuenca fue cercana a las 0,3 t/ha. Los autores mencionan que en la salida de la cuenca, las pérdidas suelen ser menores que en la parcelas (mayor altitud) debido a que mientras la velocidad flujo por riachuelos vaya disminuyendo, la deposición del sedimento se va acelerando, disminuyendo la cantidad de esta en el vertedero. Así mismo, las parcelas de escorrentía no tuvieron mucha correlación con las mediciones en la cuenca, atribuido principalmente a que la irregularidad topográfica y la cobertura del suelo pueden acumular sedimento que no terminará en la salida de la cuenca.

También se han realizado estudios de este tipo en zonas tropicales, con la diferencia de utilizar el método de medición de surcos y cárcavas. Mencionan Chaplot *et. al* (2005), un estudio de erosión en la zona norte de Laos (Provincia de Luang Prabang) en la cuenca del río Mekong de aproximadamente 0,62 km² y cultivada en un 80% de su área con arroz, maíz y lágrimas de Job (*Coix lacryma Jobi*), pendientes de aproximadamente 50-60% y suelos del orden de los Inceptisoles (parte alta de la cuenca) y Alfisoles (parte baja de la cuenca). En ella se midieron 52 surcos y cárcavas en 9 sub-cuencas en la época lluviosa entre los años 2001 y 2003, utilizando 3 pines graduados a lo ancho de cada cárcava, cada 5 metros a lo largo de ella, revelando en estos, el desnivel de la cárcava con el pasar del tiempo. El uso de suelo de la cuenca fue de cultivo de granos anuales, barbecho, bosque y hortalizas. Dentro de los resultados, se encontró un promedio de 1,3 t/ha/año, con un rango de variación de 0,1-2,4 t/ha/año comprendida entre los años 2001 y 2003 y un máximo de 18 t/ha/año en las zonas cultivadas de la cuenca. Las variables que más

correlacionaron con la pérdida de suelo fueron, la proporción de área cultivada ($r=0,88$) y el perímetro de la cuenca ($r=0,62$), pero contrario a lo encontrado por la literatura, las variables que menos correlacionaron con la pérdida de suelo fueron la pendiente media de las 9 sub-cuencas ($r=0,05$) y el índice de compactación ($r=0,19$). Se concluyó que la erosión por surcos y cárcavas es el tipo de erosión que más acarrea sedimentos en las cuencas de las regiones tropicales con alta pendiente y su devastador efecto tiene que ver con la disminución del horizonte fértil del suelo. Así mismo, y en comparación con la erosión laminar, la erosión por surcos y cárcavas tiende a transportar los sedimentos por estas mismas grietas hasta conectarse con riachuelos que desembocan en los ríos, mientras que la erosión laminar tiende a reubicar el sedimento desde la parte alta de la cuenca hasta lugares más bajos, sin haber necesariamente una pérdida real de suelo. Así como el uso de parcelas de escorrentía, este método de estimación de tasas de erosión suele dar mayor información sobre cómo ocurre el proceso erosivo, si se comparan con los modelos de predicción ya establecidos. Aunque muchos de estos ensayos tengan la finalidad futura de modelar la erosión, los autores advierten que, la cuantificación matemática puede utilizarse para construirlos, pero se debe de tener mayor cantidad de puntos para así poder desarrollar modelos más robustos desde el punto de vista estadístico.

De la misma forma, Chaplot (2013) en la cuenca del río Thukela (Drakensberg, Sur África) delimitó una zona de $4,4 \text{ km}^2$, donde, entre los años 2007 y 2008, determinó el RBC (Retiro de Banco de Cárcava) mediante el método de medición de surcos y cárcavas (110 en total) con pines georeferenciados (440 en total), cuyos suelos predominantes se encontraron en el orden de los Ultisoles y Alfisoles. Este, (RBC) es un parámetro que expresa la pérdida de suelo en surcos y cárcavas, al cual se le determinó su correlación con los principales factores edáficos que la afectan como el material parental, orden de suelo y atributos topográficos seleccionados (elevación, área de drenaje, magnitud, dirección y longitud de pendiente, el índice de poder de corriente y distancia a la cabeza de la cárcava). Cabe mencionar que, el material parental y los órdenes de suelo fueron determinados en campo mientras que los atributos topográficos fueron estimados

mediante un Modelo de Elevación Digital (DEM) preestablecido. En total, se analizaron 6512 m de cárcavas, que reportaron un promedio de 2,3 t/ha/año, y no se encontró diferencia significativa de pérdida de suelo entre suelos conteniendo areniscas y suelos conteniendo doleritas, así como tampoco se encontró diferencia entre Alfisoles y Ultisoles, mucho debido a su similitud en cuanto a características físicas. Dentro de los atributos topográficos, la mayoría correlacionaron bien entre ellos ($r=0,88$), pero aquel que más se correlacionó con el RBC fue la distancia hacia la cabeza de la cárcava y el ancho de la cárcava, lo que indica que se encontraron mayores valores de RBC en al acercarse más a las cabezas de las cárcavas y en aquellas cárcavas más anchas, lo que llega a concluir que este fenómeno ocurre como “bola de nieve” donde precisamente las cárcavas más desgastadas son las más susceptibles a la erosión. Se concluyó que la tasa de erosión por surcos y cárcavas en esta zona es de 4,9 cm/año y el comportamiento de estas no depende tanto de la velocidad del flujo laminar de agua sino de la erosión inducida por irregularidades topográficas que crean canales y cómo el agua infiltra por ellos. Este tipo de estudio, integra metodologías de toma de datos de campo junto con descripciones topográficas basadas en modelos de elevación digital, lo cual hace que, para regiones de gran área, se simplifique la identificación de los puntos donde las cárcavas están causando un mayor desgaste de suelo y así poder tomar una estrategia puntual de manejo. Un modelo de predicción por sí mismo no da la información suficiente para identificar los puntos específicos donde está ocurriendo la mayor pérdida de suelo, pero si estos se asocian con puntos georeferenciados, datos reales de erosión y las principales variables que lo causan, el modelo puede llegar a tomar más semejanza con la realidad de campo.

Debido a los cuestionamientos que han surgido por la utilización de modelos de predicción de la erosión, el Departamento de Agricultura de Estados Unidos por medio de los trabajos de Robichaud y Brown (2002), diseñaron la metodología de medición de la erosión por medio de geotextiles, metodología utilizada en este proyecto. Los autores advierten que esta metodología es exclusiva para la determinación de erosión hídrica laminar donde la microtopografía del terreno sea relativamente uniforme y sin obstrucciones que alteren el flujo uniforme de agua, y no debe ser utilizada para

mediciones donde la topografía sea muy irregular donde lleguen a formarse cárcavas. Una vez realizado el manual con la metodología respectiva, se procedió a evaluar las tasas de erosión en las trampas de geotextil y al compararlas con lo obtenido en tanques de recolección midiendo los sólidos en suspensión y se encontró que en 14 semanas y con una escorrentía de 43 mm las trampas acumularon un total de 9,7 t/ha, obteniéndose una tasa de erosión de 0,7 t/ha/semana y una eficiencia de 93% al compararse con la metodología de medición de sólidos totales. Así mismo, los autores rescatan que para utilizar esta metodología es indispensable contar con datos de precipitación diaria de forma que se pueda validar la erosión hídrica laminar mediante variables climáticas.

3.6.2 Costa Rica

Así como en los antecedentes internacionales, muchos de los trabajos para medir tasas de erosión en Costa Rica se han realizado mediante el uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), mientras que son pocos los que se han hecho por medio de la utilización de parcelas de escorrentía o erosión. Aún menos, son aquellos en los que se han utilizado geotextiles para la construcción de las parcelas y para la recolección de sedimentos, puesto que en Costa Rica, y para este propósito, siguen siendo una tecnología relativamente nueva (Castillo 2012).

Por ejemplo, Mora (1987) trabajó en la evaluación de pérdida de suelo en la cuenca del río Pejibaye en Turrialba (250 km²) con el objetivo de determinar medidas de acción para evitar esta problemática. Como en este caso, los estudios de erosión más viejos utilizaban la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo para estimar la erosión, ya que para ese entonces resultaba una metodología novedosa, barata y eficiente. Así, para este trabajo, el factor R se determinó por medio de pluviógrafos en todas las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona, las cuales fueron relativamente altas (hasta 39000 MJ.mm/ha.h.año). El factor K fue determinado por medio de análisis físicos, entre ellos análisis de textura, conductividad hidráulica y materia orgánica, y sus valores rondaron entre los 0,0135 y 0,0279 t.ha.h/ha.MJ.mm, considerándose como bajos a moderados. El factor C se determinó por medio de fotografías aéreas de infrarrojo falso, mapas

topográficos e instrumentos ópticos de fotointerpretación y transferencia de información fotográfica aérea a mapas topográficos. Al poseer la cuenca una gran área de bosque primario, se obtuvieron valores bajos ($C=0,0001$). Por último, el factor LS se determinó por medio de mapas topográficos de la cuenca a escala 1:50000 con curvas de nivel cada 20 m, en donde las altas pendientes reflejaron valores altos de LS. Los resultados indicaron que mediante esta metodología un 84% del área de la cuenca la erosión sufrida fue de menos de 10 t/ha/año, catalogándose como tolerable, debido en gran parte por su cobertura boscosa, mientras que el otro 16% del área de la cuenca con un uso agrícola obtuvo valores mayores al 10 t/ha/año por lo que se recomendó la utilización de prácticas de conservación.

Gómez (2002), también utilizó el modelo EUPS para estimar la pérdida de suelo en 3 cuencas hidrográficas en Costa Rica, las cuencas de los ríos Reventazón, Sarapiquí y Pirrís. De esta forma, se buscó valorar también el programa de cómputo CALSITE que utiliza sistemas de información geográfica para poder mapear los sitios donde ocurre la mayor parte de la pérdida de suelo. Para la caracterización de cada cuenca se tomaron en cuenta varios aspectos como la localización, área, perímetro, altitud promedio, red hidrológica, mapas de precipitación, índice de pendiente, modelos de elevación digital y usos de suelo, de esta forma se pudo obtener los valores de R y LS. Para este estudio los valores de C y P fueron unidos en un mismo parámetro basado en la cobertura vegetal y los cultivos más frecuentes de las cuencas, asignándosele un valor a cada cobertura. Así mismo, el valor de K (erodabilidad) se obtuvo mediante la utilización de mapas de órdenes de suelo con un valor asignado a cada orden. Los resultados indican que los factores del modelo EUPS son muy variables para cada cuenca en específico y este es el principal problema que presenta la utilización de este modelo en las zonas tropicales, el valor de R varió mucho debido a que la precipitación fue muy distinta en cada estación meteorológica de cada cuenca, así como las pendientes que resultaron en valores de LS muy variables. Los valores de R fueron altos y variaron desde los 21600 hasta los 40500 MJ.mm/(ha.hr.yr), mientras que los de LS, se menciona, que han sido ampliamente sobreestimados por la EUPS para la situación de Costa Rica, ya que se han calibrado a partir parcelas de corta longitud de

pendiente y se ha generalizado para áreas de mayor longitud. En la cuenca del río Sarapiquí, la tasa de erosión reportada fue tolerable, y se dio tan sólo en un 5% del área de la cuenca, mientras que en la cuenca del río Reventazón, se reportó que un 15% del área sufre de erosión severa con más de 100 t/ha/año, similar a lo encontrado en la cuenca del río Pirrís. Por último, se concluye que a pesar de que existe el paradigma de que la EUPS sobreestima la pérdida de suelo, el estudio reveló una subvaloración de la erosión evaluada con el programa CALSITE.

La interrogante sobre la extrapolación de la EUPS a zonas tropicales ha hecho que muchos autores mencionen la tendencia a sobrestimar las tasas de erosión. Por esta razón, y debido al gran potencial hidroeléctrico de la cuenca, Solano et al. (2010) realizaron un estudio en la cuenca del Río Pirrís, en donde se compararon los valores estimados de pérdida de suelo calculados con la EUPS y los datos tomados mediante parcelas experimentales. Para calcular el valor de R, se utilizaron 8 estaciones meteorológicas situadas dentro de la cuenca, mientras que el factor K se estimó mediante mapas de órdenes de suelos, donde se encontró que un 82% del área de la cuenca está dentro de los órdenes de los Inceptisoles y Entisoles. El factor C, se estimó mediante ortofotos y estudios pasados, encontrándose que un 32% del uso del área fue para café, 27% bosque y 27% pastos. Mediante la utilización de un modelo de elevación digital, se estimaron los valores del factor LS. Por otro lado, las parcelas experimentales se instalaron en pastos, bosque y cultivo de café, cada una con 30% y 60% de pendiente. En los principales resultados se encontró que el modelo EUPS sí tiende a sobrestimar en un rango aceptable la erosión si se comparan con parcelas experimentales. En cada uno de los escenarios se encontró que la utilización de la EUPS duplica la estimación de la tasa de erosión e inclusive, en café con 60% de pendiente triplicó el dato. Se encontró que la mayor tasa de erosión fue en el cultivo de café, luego en bosque y por último el pasto, siendo las parcelas con 60% de pendiente en los tres usos de suelo, donde se encontró mayor tasa de erosión. Para la parcela específica de café, se encontró que en la parcela con 30% de pendiente la tasa de erosión fue de 4 t/ha/año, mientras que en la de 60%, la tasa fue de 10 t/ha/año, ambas catalogadas como erosión tolerable. La baja tasa de

erosión en la parcelas de pasto se justificó por el bajo valor del factor R (erosividad de lluvias), en la zona donde estaban ubicadas estas parcelas. Además, se menciona que el tipo de erosión sufrida se refleja en la baja tasa de erosión en los pastos, ya que estas parcelas tienden a medir la erosión basada en la velocidad de escorrentía difusa, velocidad que disminuye al haber mayor porcentaje de cobertura. Otros resultados importantes fueron los que tienen que ver con erosividad (R), donde utilizando la ecuación EUPS se confirmó que las tasas de erosión moderadas y severas (32% del área de la cuenca) se presentaban cuando la erosividad de las lluvias fue mayor de 9000 MJ mm/ha/año.

La intención de un modelo es imitar al máximo la realidad del campo, por eso se siguen desarrollando con rapidez y muchos autores confirman su utilidad. Probablemente el menos complejo sea el modelo EUPS, sin embargo, la calibración de este toma mucha importancia a la hora de ser aplicados en otra condición y por esta razón se han hecho esfuerzos por calibrar los modelos partir de las condiciones específicas, o utilizar otros modelos diferentes al EUPS. Este es el caso del modelo EUROSEM, diseñado en Europa y calibrado para México, Nicaragua y Costa Rica por Rey et al. (2003). Este modelo es más puntual, simula el efecto en el tiempo de la pérdida de suelo con la productividad del mismo, la escala de toma de datos es de minutos, y contempla las condiciones ambientales como la edáfica, vegetal, fisiográfica y meteorológica de la cuenca, en conjunto con predicciones de lluvia. Está basada en el movimiento y concentración de las partículas de sedimentos suspendidas en el agua de escorrentía y tiene un enfoque más hidráulico y edáfico del suelo, si se compara con el modelo EUPS. La calibración en Costa Rica se realizó en Salitral de Santa Ana mediante parcelas de escurrimiento en diferentes usos de suelo como maíz, café y pastizales mediante la utilización de un simulador de lluvia y la recolección del escurrimiento en botellas plásticas, de esta forma se construyeron hidrogramas y sedigramas. Los resultados mostraron que los valores reportados por el modelo EUROSEM no tuvieron tanta correlación como se esperaba, mucho debido al efecto de encostramiento del suelo que no se toma como factor en este modelo y lo hace ineficiente para simular la pérdida de suelo en el tiempo.

En estudios más recientes sobre tasas de erosión (Gómez 2010), se ha sugerido la necesidad de analizar los procesos que afectan el traslado del movimiento de sedimentos y relacionarlos con los procesos eco-fisiológicos e hidrológicos que afectan el cultivo de café. Para cumplir este objetivo, se montaron parcelas experimentales de escorrentía para determinar si las variables que las afectan y el manejo de estas tienen repercusiones a nivel de cuenca. De esta forma se buscó desarrollar un modelo genérico que integre la mayor cantidad de variables ambientales para analizar el comportamiento de los recursos hídricos, edáficos y ecológicos de cafetales bajo sistemas agroforestales. Los experimentos se realizaron en Andisoles ubicados en la cuenca del río Reventazón (77 km² y 1000-1200 m.s.n.m), en un área experimental de 0,9 km², con pendientes de aproximadamente 20%, y un cultivo agroforestal de café (variedad Caturra), asociado en su mayoría con árboles de poró (*Erythrina poeppigii*) como sombra, sembrado a una densidad de 12,8 árboles/ha, con una cobertura de copa de un 12,3% y altura promedio de 20 m. El período experimental duró 15 meses comenzando desde enero del 2009 hasta marzo del 2013, con una precipitación promedio anual de (3208 mm). De esta forma fueron monitoreados variables ambientales como la precipitación y variables climáticas (R), caudal a la salida de la cuenca (Q), humedad del suelo (θ), evapotranspiración (ET), índice de área foliar del café (LAI), tabla de agua (z), turbiedad del agua (r), escorrentía y pérdida de suelo (SR_{plot}). Las parcelas de 1000 m² donde se midieron estas últimas estuvieron totalmente cerradas y tuvieron dos manejos diferentes, una con café bajo un sistema agroforestal y otra con el cultivo de café sin sombra. La escorrentía y los sedimentos se recolectaron mediante una canoa de PVC colocada al pie de la parcela, adherida a un recolector de agua con un sensor de caudal. El grueso del sedimento se recolectó de la canoa de PVC, y se pesó semanalmente, mientras que las partículas más finas se recolectaron de un filtro de plástico, colocado en la entrada del recolector de agua. Se encontró que la tasa de erosión en la salida de la cuenca fue de 1 t/ha/año, la cual la hace tolerable, además de que 1/3 de esta erosión se dio durante eventos de puntuales de tormenta, mientras que 2/3 se dieron durante recesiones de lluvia. No se encontró que hubiera una diferencia significativa de escorrentía entre la parcela agroforestal y la parcela de café sin sombra, las cuales

reportaron valores totales de escorrentía relativamente bajos (0,25 mm en café agroforestal y 0,44 mm en café sin sombra). Por otro lado, se notaron los beneficios que puede traer el café bajo sistema forestal donde se obtuvo para esta parcela, la mitad de la erosión sufrida por la parcela sin sombra, sin embargo, se le da gran importancia a la irregularidad de los caminos que provocan cambios en la dirección de la escorrentía y pueden provocar erosión que no está dentro de lo contemplado por el modelo.

Las parcelas de escorrentía o de erosión además de dar información sobre la pérdida de suelo, pueden diseñarse de modo que presenten un escenario a evaluar, como el trabajo realizado por Gómez (2005), en donde evaluó mediante este tipo de parcelas, la pérdida de suelo al utilizarse dos diferentes herbicidas como glifosato y paraquat para el control de malezas. Entre los años 2002 y 2003, se establecieron en la provincia de Alajuela, cuatro parcelas de 900 m² (dos para cada tratamiento) en plantaciones de café con aproximadamente 30% de pendiente, dentro de las cuales se instalaron las parcelas de escorrentía de 14 m², las cuales fueron delimitadas por láminas galvanizadas. Las aguas de escorrentía y sedimentos se recogieron en colectores de 200 l adaptados a un embudo y luego se realizó un análisis químico de los sedimentos para determinar la pérdida de nutrientes. Así mismo, el suelo donde se instalaron las parcelas se caracterizó desde el punto de vista físico y químico para mejorar el análisis del proceso erosivo. Dentro de los resultados se encontró que para el año 2002, en las parcelas manejadas con glifosato se dio una pérdida de 3,96 t/ha mientras que en las parcelas con paraquat un 1,94 t/ha/año, clasificándose como erosión tolerable, sin embargo fueron en estas últimas, donde se encontró mayor pérdida de nutrientes, atribuyéndoselo a la alta cantidad de arcillas en los sedimentos que conllevan a una mayor proporción de coloides, y esta última es la fracción donde se encuentran los nutrientes. Por otro lado, en todas las parcelas se encontró una disminución en la tasa de erosión del año 2002 al 2003. Otros datos interesantes indican que el agua de escorrentía no tuvo mucha relación con el sedimento encontrado, ya que en la parcela manejada con paraquat en el año 2002 se recolectaron 700 l de agua y 739 g de sedimento mientras que en el 2003, se recolectaron 1435 l de agua y tan sólo 323 g de sedimento, lo que indicó que la erosión no dependió del volumen

de escorrentía sino de otros factores no contemplados en el estudio como la intensidad de lluvia y la velocidad terminal de la gota de agua. No fue posible detectar cómo afecta la cobertura en el proceso erosivo ya que no existió una parcela “control”, pero se pudo determinar cómo se da este en ciertas condiciones determinadas y con manejos distintos de herbicidas. Otra observación que se puede hacer de este trabajo es que no se cuenta con datos de precipitación e intensidad de lluvia, por lo que en ciertos aspectos, el análisis ambiental de la erosión se torna incompleto. Esto confirma la necesidad primordial de poseer datos meteorológicos actualizados y cercanos al área de estudio para que los muestreos de erosión tengan mayor validez y precisión.

En otras investigaciones de pérdida de suelo en el cultivo de café, Cervantes y Vahrson (1992) instalaron parcelas de escorrentía bajo distintos manejos con el objetivo de determinar la pérdida de suelo y el volumen de escorrentía. El experimento fue realizado en suelos clasificados en el Subgrupo Taxonómico de Udic Haplustalf en Cerbatana de Puriscal, en parcelas de 134 m², las cuales fueron delimitadas por láminas de zinc galvanizadas con pendientes de 55 a 60%, y en donde el agua de escorrentía y sedimentos fueron recolectados en una canoa tipo Gerlach colocada al pie de la parcela, y conectada a un recolector de 64 l. Estas estuvieron bajo 3 manejos distintos: una consistió en café establecido por dos años con sombra de poró (*Erythrina poeppigiana*), árboles maderables y barreras vivas de zacate limón (*Cimbofogon citratus*) posicionadas cada 10 m. La segunda parcela consistió en café caturra con tres años de edad, sin sombra, y con barreras vivas cada 10 m. Por último, la parcela 3 consistió en pasturas ligeramente degradadas. Las mediciones de agua y sedimentos se hicieron diariamente, durante un año, así como los datos de precipitación que se obtuvieron de una estación meteorológica ubicada a 500 m del área en estudio. Así mismo se caracterizó físico, química y morfológicamente el suelo donde se ubicaron las parcelas. Se encontró que las escorrentías y pérdidas de suelo más altas se dieron en: 1-parcela con pastos, 2-café con sombra y 3-café sin sombra, con rangos de 500-2600 L/parcela, 100-1000 L/parcela y 0-500 L/parcela, respectivamente. Las pérdidas de nutrimentos para la parcela de café con sombra estuvieron en niveles de 3,5, 1 y 1 kg/ha para el calcio, magnesio y potasio,

respectivamente, mientras que para la parcela de café sin sombra estuvieron en el rango de 0,5, 1 y 1 kg/ha, para calcio magnesio y potasio, respectivamente. Por otro lado, las pérdidas de nitratos estuvieron en valores de 3,9, 2,5 y 3,4 kg/ha para las parcelas de café sin sombra, con sombra y pasto, respectivamente. Se concluye que las parcelas de café con sombra poseen mayor escorrentía y pérdida de nutrientes, lo que contradice lo encontrado en la literatura que menciona que los ecosistemas con árboles protegen más el suelo de la erosión. Los autores atribuyen estos resultados a las diferencias físicas en el suelo y drenajes internos, y esto confirma la importancia de que al hacer un estudio de erosión donde no se quiera tomar el suelo como una variable, se debe procurar que la instalación de las parcelas sea en suelos uniformes.

Conforme pasaron los años y debido al acelerado desarrollo de obras civiles, la utilización de los geotextiles "Silt Fence" para la construcción de parcelas de erosión en Costa Rica se presentó como una tecnología novedosa. Se inició con los trabajos realizados por Prado y Aguilar (2007) en la microcuenca Plantón-Pacayas en Cartago. Estos autores diseñaron un manual basado en la experiencia del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés), con la finalidad de presentar una guía precisa para la adecuada instalación de este tipo de parcelas, de modo que puedan ser utilizadas para el monitoreo de pérdida de suelo o para la elaboración de obras y prácticas de conservación. Para esto realizaron un ensayo piloto de 20 días en donde se ejemplificó la adecuada colocación de los recolectores de sedimento a base del geotextil, el cual se dio en el vertedero de sedimentos del terreno según un previo estudio topográfico. Se instalaron dos parcelas, una Oeste ubicada en un cultivo de papa con 30-50% de pendiente y 5% de cobertura vegetal y otra parcela Este, la cual se instaló en un cultivo de coliflor y tuvo el mismo rango de pendiente (30-50%), y una cobertura vegetal de menos de 5%. En la parcela Oeste, se encontró una tasa de erosión de 1,9 t/ha/día, mientras que en la Este una tasa de 4,3 t/ha/día registradas en los 4 días finales de evaluación que presentaron los eventos de lluvia máxima (22 mm/día). Esta fue la primera experiencia con geotextiles "Silt Fence" en Costa Rica para la elaboración de parcelas de erosión,

donde se utilizó el geotextil modelo Propex 1198 cuya propiedades hidráulicas se muestran en la Cuadro 3.

Cuadro 3. Propiedades hidráulicas del geotextil modelo Propex 1198.

Propiedad hidráulica	Norma de calidad	Unidad de medida	Valor
Permisividad	ASTM-D-4491	sec ⁻¹	0,5
Flujo de agua	ASTM-D-4491	l/sec/m ²	35
Abertura aparente de poros	ASTM-D-4751	mm	0,425

Fuente: Prado y Aguilar 2007.

Castillo (2012), basado en el manual de Prado y Aguilar (2007) comienza a sustituir las láminas de zinc galvanizadas por geotexiles “Silt Fence” modelo Propex 1198 para la delimitación y recolección de los sedimentos. El estudio se realizó en suelos del orden de los Andisoles en tres fincas de cultivo de papa en Pacayas de Alvarado de Cartago a diferentes alturas y con distintos rangos de pendiente (una a 1729 m.s.n.m con menos de 15%, otra a 2017 m.s.n.m entre 15 y 45% y la última a 2407 m.s.n.m. con más de 45%), en cada finca se instalaron 4 microparcels de erosión de 21 m², dos con un porcentaje de gradiente de surco menor a 5% y otras dos con un porcentaje de gradiente de surco mayor a 5%. El período experimental consistió en evaluaciones de día de por medio durante 18-26 semanas entre los meses de abril del 2011 y febrero del 2012, dependiendo del inicio de la actividad productiva de cada finca. El objetivo consistió en determinar en cada finca, la tasa de erosión en el segundo semestre del año 2011 (época lluviosa), para un ciclo de cultivo de papa. También se realizó una caracterización química, física y morfológica del suelo en estudio, así mismo, la cuantificación de la pérdida de nutrimentos y materia orgánica del sedimentos recolectado. Cada finca contó con un pluviómetro que reportó la cantidad de lluvia precipitada cada 5 minutos, para poder correlacionarla con la pérdida de suelo. Se encontró que la mayor tasa de erosión se dio en la finca con más de 45% de pendiente, reportándose un valor de 14 t/ha/6 meses, clasificándose como moderada. Por otro lado, las tasas encontradas en las fincas con pendiente entre 15 y 30% y menos de 15% fueron de 0,5 y 0,7 t/ha/6 meses,

respectivamente, clasificándose como tolerables. Así mismo, se menciona que las mayores tasas de erosión se encontraron en los períodos de más intensidad de lluvia y cuando el cultivo de papa estuvo recién sembrado, donde la cobertura fue menor. También se encontró que la disminución la pendiente de surco puede disminuir la erosión entre un 33 y 62%. Las mayores pérdidas de nutrimento se encontraron en la finca con más de 45% de pendiente, debido a que tuvo la mayor cantidad de suelo perdido, con pérdidas de 14 kg/ha de calcio y 170 g/ha de fósforo, en segundo lugar estuvo la finca con menos de 15% de pendiente con pérdidas de 11 kg/ha de calcio y 6 g/ha de fósforo. Así mismo, fue la finca con más de 45% la que tuvo mayor pérdida de materia orgánica con valores de 116 kg/ha, seguida de la finca con menos de 15% de pendiente con 7,5 kg/ha y por último la finca con pendientes entre 15 y 30% con pérdidas de 4 kg/ha. Se confirmó que la construcción de microparcels con el geotextil “Silt Fenc” Propex 1198, es una metodología eficiente para realizar muestreos preliminares de tasas de erosión, ya que es un material resistente y posee una gran capacidad de retener sedimentos, además son baratas y relativamente fáciles de construir.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Selección de fincas

A mediados del mes de mayo del año 2013, se realizó una inspección de la parte alta de la cuenca del río Jesús María con los Ingenieros Rafael Mata Chinchilla del Centro del Investigación Agronómica, Carlos Barboza Gómez, Agente de Servicios Agropecuarios del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y Renato Jiménez Zúñiga del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) para seleccionar las fincas de café donde se pudiera realizar el estudio. Los criterios que fueron tomados en cuenta a la hora de la selección de las fincas fueron: accesibilidad a la finca,

colaboración del propietario, magnitud de pendiente, condiciones agronómicas de la finca y prácticas de conservación utilizadas.

4.1.1 Ubicación geográfica de las fincas seleccionadas

Las tres plantaciones de café (*Coffea arabica*) se ubicaron en el caserío de Llano Brenes del distrito de San Rafael en el cantón de San Ramón de Alajuela. Este distrito se encuentra dentro de la cuenca del río Jesús María ubicada en la vertiente del Pacífico Central de Costa Rica (Figura 2). En la Figura 4, se observa una imagen de satélite de Google Earth, donde aparecen las tres fincas seleccionadas. Para efectos de clasificación, las fincas fueron nombradas como finca Parte Alta, finca Parte Media y finca Parte Baja.

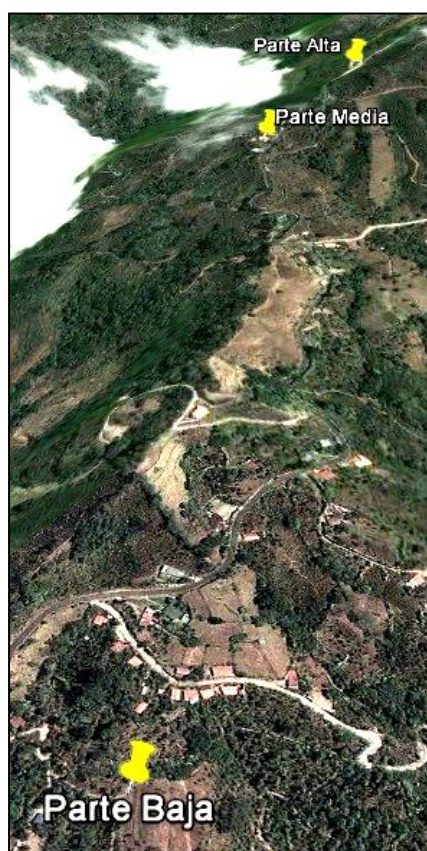


Figura 4. Imagen de satélite de la ubicación geográfica de las tres fincas utilizadas en el estudio de tasas de erosión en el distrito de San Rafael del cantón de San Ramón de Alajuela.

Fuente: Google Earth 2013.

Debido a que las tres fincas se encuentran en hojas cartográficas distintas, se procedió a ubicarlas de forma separada. De esta forma, en las Figuras 5 y 6, se ubican, respectivamente, las fincas Parte Alta y Parte Media dentro de una sección de la hoja cartográfica de Naranjo y una imagen de satélite de Google Earth con la ubicación de estas. Por otro lado, en las Figuras 7 y 8, aparecen respectivamente, una sección de la hoja cartográfica de Río Grande donde se ubica la finca Parte Baja y una imagen de satélite de Google Earth donde también se ubica esta.

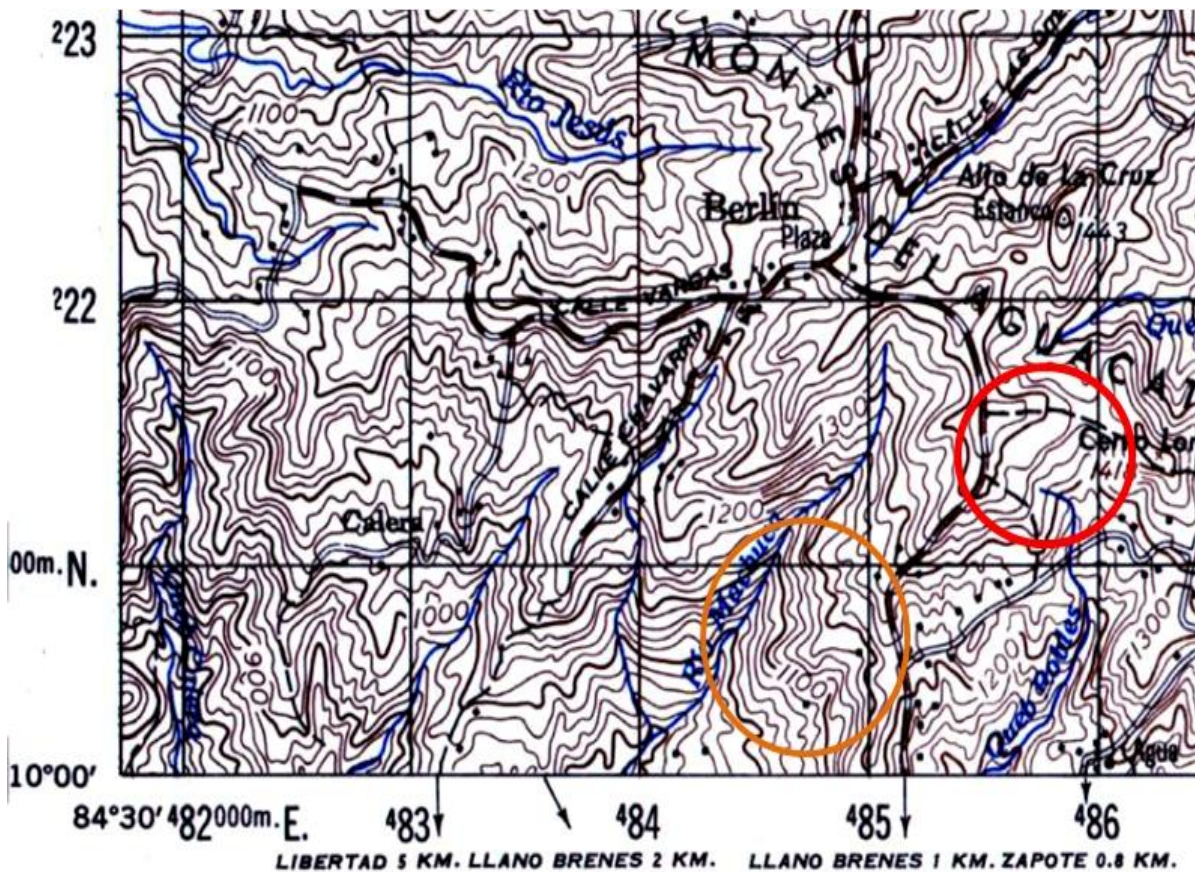


Figura 5. Fragmento de hoja cartográfica de Naranjo donde se muestra en un círculo de color rojo la finca Parte Alta y en un círculo color anaranjado la finca Parte Media.



Figura 6. Imagen de satélite donde se muestra la finca Parte Alta en color rojo y la finca Parte Media en color anaranjado.
Fuente: Google Earth 2013.

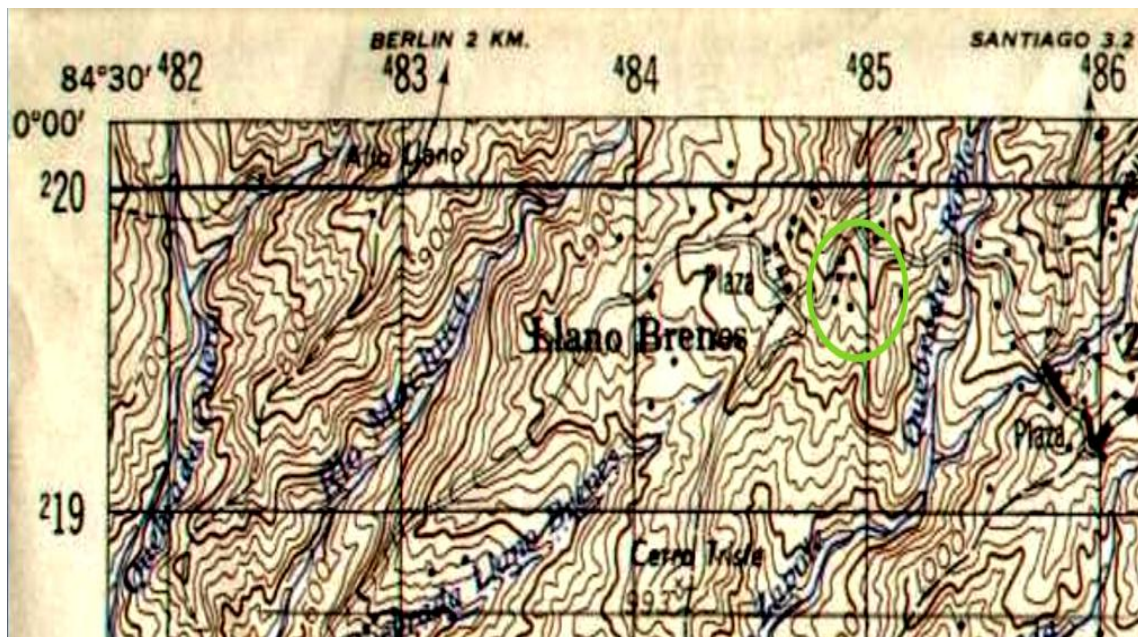


Figura 7. Fragmento de hoja cartográfica de Río Grande donde se muestra en un círculo de color verde la Finca Parte Baja.



Figura 8. Imagen de satélite donde se muestra en color verde la finca Parte Baja.
Fuente: Google Earth 2013

Una vez seleccionadas las tres fincas donde se realizó el estudio se procedió a delimitar dentro de ellas las áreas de muestreo.

4.2 Determinación de las áreas de muestreo

Las tres fincas de café donde se realizaron las mediciones de erosión presentaron características de suelo similares y dos rangos de pendiente, una de 25-30% y otra de 60-70%. Así mismo, presentaron distintas condiciones agronómicas con respecto al manejo de la sombra y prácticas de conservación como se muestra en el Cuadro 4. Cada combinación de estos tres criterios (pendiente, manejo agronómico y prácticas de conservación) representa un área de muestreo con una condición de erodabilidad

específica. Dentro de cada área de muestreo se construyeron tres microparcels de erosión donde se recolectaron los sedimentos para medir la tasa de pérdida de suelo.

Cuadro 4. Códigos de las áreas de muestreo a evaluar.

Código de área de muestreo	CLS-30+AG	CSS-30+AG	CSS-60+AG	CLS-60+A	CMS-60+A
Condición Agronómica	Café ligeramente sombreado	Café sin sombra	Café sin sombra	Café ligeramente sombreado	Café moderadamente sombreado
Pendiente (%)	25-30	25-30	60-70	60-70	60-70
Manejo de erosión	Acequias de ladera y gavetas	Acequia de ladera y gavetas	Acequia de ladera y gavetas	Acequia de ladera	Acequia de ladera
Productividad	30 fanegas/ha	35 fanegas/ha	35 fanegas/ha	30 fanegas/ha	30/fanegas/ha
Coordenadas geográfica	10,006279 N -84,466413 W	10,005165 N -84,468617 W	10,005165 N -84,468617 W	9,993335 N -84,468646 W	9,993335 N -84,468646 W
Altitud (m.s.n.m)	1342	1277	1277	1095	1095
Finca	Parte Alta	Parte Media	Parte Media	Parte Baja	Parte Baja
Propietario	José Joaquín Jiménez	José Joaquín Jiménez	José Joaquín Jiménez	Omar Pérez	Omar Pérez

4.2.1 Ubicación geográfica de las áreas de muestreo

De igual forma en la Figura 9 se muestra la delimitación espacial de cada área de muestreo que como se mencionó anteriormente. Dentro de estas, se instalaron tres microparcels de erosión para darle repetitividad al área de muestreo.

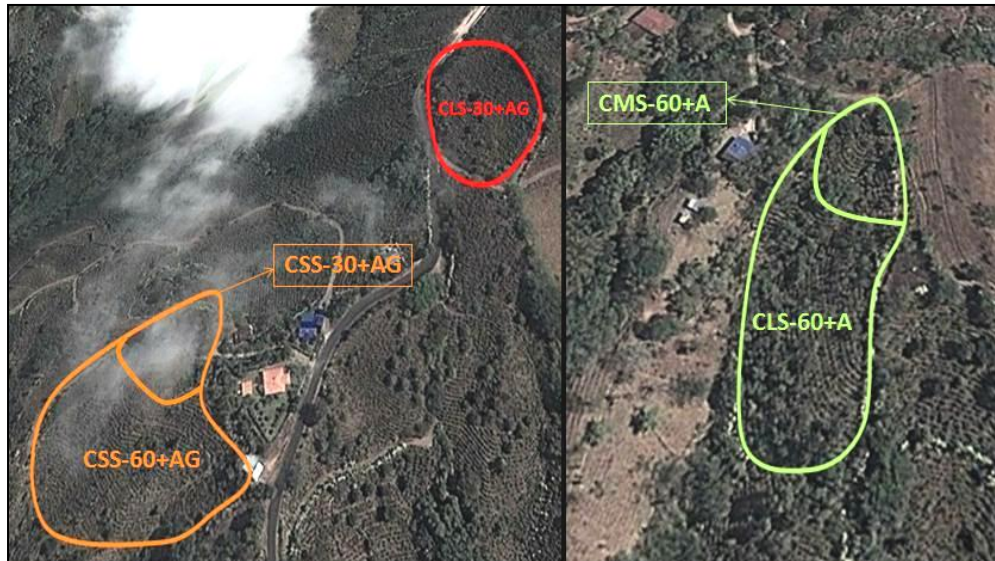


Figura 9. Imágenes satelitales donde aparece en color rojo, anaranjado y verde, las fincas Parte Alta, Parte Media y Parte Baja, respectivamente y sus respectivas áreas de muestreo.
Fuente: Google Earth 2013.

4.3 Establecimiento de las barreras con geotextil “Silt Fence” T2100 para la retención de sedimentos

4.3.1 Selección del geotextil “Silt Fence”

El geotextil “Silt Fence” fue adquirido en la empresa Mexichem, antiguo Amanco y la selección de este fue de suma importancia para garantizar una adecuada eficiencia a la hora de la recolección del sedimento. El geotextil debe poseer propiedades hidráulicas tales que retenga en la medida lo posible las partículas de suelo más pequeñas, pero al mismo tiempo debe ser un material con suficiente permitividad para que la trampa de sedimentos no acumule agua y colapse (Ver Anexo 1). La permitividad (s^{-1}) es un valor que indica que tan rápido se mueve el agua a través del material sin ninguna fuerza aplicada al agua (condición de flujo laminar) y a diferencia de la permeabilidad (cm/s), esta no está afectada por el grosor del geotextil, el cual varía de uno a otro. La apertura aparente de poros es la propiedad que aproxima la partícula de mayor tamaño que pasará por el geotextil y así mismo, está asociada a una cantidad de tamices. El geotextil se compró por metro lineal, a un ancho estándar de 3,85 m; más adelante se explicará cómo se utilizó esta

medida estándar para adecuarla a la dimensión final de la microparcela. El Cuadro 5 muestra algunas de las propiedades del geotextil tejido modelo T2100 que se utilizó para hacer las microparcels de erosión. Se seleccionó este modelo con base en la recomendación y referencia de Prado y Aguilar (2007) y Castillo (2012), ya que poseen propiedades hidráulicas similares al Propex 1198.

Cuadro 5. Propiedades hidráulicas y normas conformes del ASTM (American Section of the International Association for Testing Materials) de varios modelos de geotextiles tejidos “Silt Fence”.

Propiedad hidráulica	Norma de calidad	Unidad	T1050	T1400	T1700	T2100
Tamaño aparente de poros	ASTMD4751	mm (N° tamiz)	0,425 (40)	0,300 (50)	0,300 (50)	0,300 (50)
Permeabilidad	ASTMD4491	cm/s	$1,2 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$	$6,3 \times 10^{-2}$
Permitividad	ASTMD4491	s^{-1}	0,30	0,20	0,17	0,66
Tasa de flujo	ASTMD4491	l/min/m	831	490	458	2100

Fuente: Mexichem (2014).

4.3.2 Dimensiones y delimitación de las microparcels de erosión

El diseño de la microparcela se muestra en la Figura 10, donde se utilizaron dos porciones de geotextil, uno de recolección de 1,50 m de largo y 3,85 m de ancho (este último es el estándar de fábrica) colocado a lo ancho de la microparcela y en contra de la dirección de la pendiente con forma de canasta, para recolectar los sedimentos. La otra porción es el geotextil de protección el cual midió 15 cm de ancho y 3,85 m de largo (estándar), que igualmente se colocó a lo ancho de la parcela, paralelo al geotextil de recolección, pero en forma de barrera para evitar la entrada de sedimento de otras áreas no pertenecientes a los 21 m² de la microparcela, especialmente del proveniente de zonas más elevadas.

El geotextil de recolección tuvo que modificarse en uno de los extremos para darle la forma de “ala” como se observa en la Figura 11GR (geotextil de recolección), esto hizo que el ancho total de la microparcela pasara de 3,85 m a 3 m. Por lo tanto, cada

microparcela tuvo un ancho de 3 m y un largo de 7 m para un área total de 21 m² por microparcela. De esta forma, se utilizaron 4 hileras de café para cumplir con este arreglo. Las microparcels dentro de una misma área de muestreo se mantuvieron separadas entre ellas por 1 m de distancia para evitar que la escorrentía de una microparcela afectara a las demás.

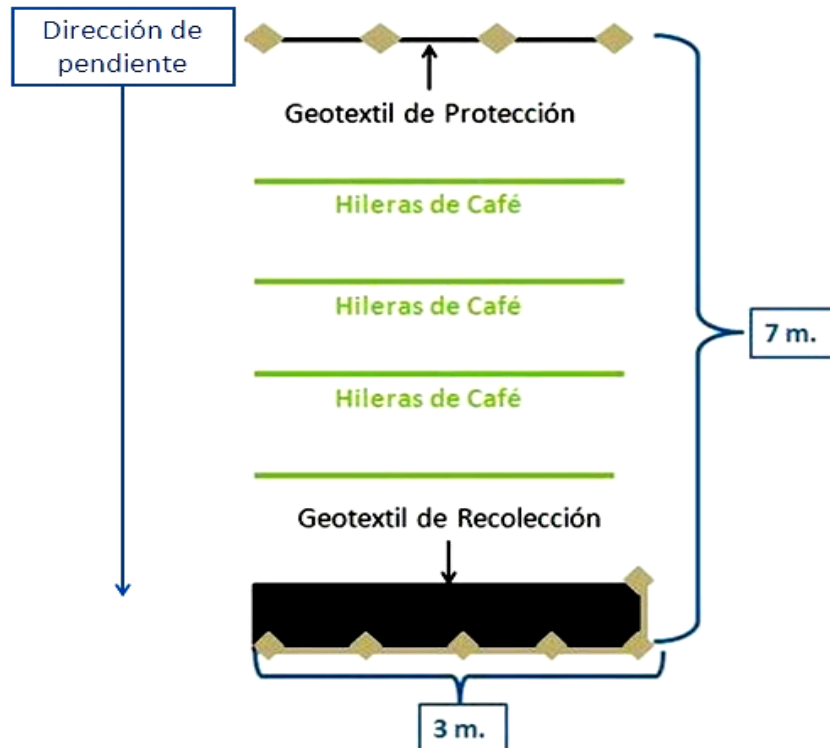


Figura 10. Diagrama en de una microparcela de erosión. Los rombos representan estacas a las cuales está sujetado el geotextil por medio de grapas. La distancia entre estacas en el geotextil de recolección es de 80 cm, mientras que en el geotextil de protección están separadas por 1 m de distancia.



Figura 11. Fotografías del geotextil de recolección (GR) y geotextil de protección (GP) en una microparcela de erosión utilizada para la cuantificación de pérdida de suelo en un área de 21 m² correspondiente al área de muestreo CSS-30+AG.

De esta forma se muestreó la erosión laminar natural de un cafetal por medio de tres microparcels de 21 m², que representan un área de muestreo a evaluar, en donde se recolecta el sedimento perdido por esta y se transforma a t/ha. Así mismo, se acordó con los agricultores que no se hicieran cambios con respecto al manejo original del cafetal en cuanto a planes de fertilización, manejo de arvenses, aplicaciones de fungicida, etc.

Para la construcción de una microparcela de erosión se necesitan de 2 m de geotextil “Silt Fence” modelo T2100 de 3,85 m de ancho estándar, cortado en una sección de 1,50 m (geotextil de recolección) y una de 50 cm (geotextil de protección) y 8 piezas de madera semidura, los demás materiales se mencionan en la siguiente sección.

4.3.3 Materiales

Para el ensamblaje de las microparcels de erosión con el método del geotextil “Silt Fence” se requirieron una gama de materiales, que se describen en el Cuadro 6. Se debe recordar que cada área de muestreo consta de tres microparcels y al ser cinco áreas de muestreo, la lista de materiales del Cuadro 6 corresponde para lo que fue la construcción de 15 microparcels.

Cuadro 6. Lista de materiales utilizados para la construcción de 15 microparcelas de erosión para la recolección de sedimentos y cuantificación de la tasa de erosión en cafetales en la cuenca del río Jesús María.

Cantidad	Material
30	Metros de geotextil “Silt Fence” modelo T2100 de 3,85 m de ancho
1	Clinómetro o GPS (Sistema de Posicionamiento Global) por sus siglas en inglés
1	Pala, palín, machete, pico, mazo, martillo, tijeras, tiza
1	Cinta métrica
150	Piezas de madera semidura de 120 cm de longitud y 2X3 pulgadas
1	Grapadora presión, marca Truper 1/4.51//6.3/8PO9
4	Cajas de grapas marca Truper grapa p/grapadora ET – 21
1	Marcador permanente

4.3.4 Corte del geotextil

Para facilitar la tarea del transporte del geotextil a las microparcelas, se procedió a cortar este previamente con tijeras, amarrarlo con mecate y luego transportarlo a áreas deseadas. Primero se colocó el rollo (3,85 m de ancho) de geotextil en el suelo y se desenrolló lo más que se pudo. Una vez estirado, se colocaron dos marcas con tiza blanca de pizarra en los bordes del geotextil a 1,50 m del extremo del mismo y se trazó entre estas dos marcas una línea recta atravesando el ancho del geotextil. Así mismo, desde esta línea trazada, se midieron 50 cm más, se marcaron ambos bordes y se trazó otra línea entre las marcas. De esta forma, los primeros 1,50 m desde el extremo hasta la primera línea correspondieron al largo necesario para cortar el geotextil de recolección, mientras que los segundos 50 cm desde la primera línea hasta la segunda, correspondieron al largo necesario para cortar el geotextil de protección. Ambos cortes fueron utilizados para una misma microparcela y este procedimiento se repitió 14 veces más para tener los geotextiles de todas las áreas de muestreo.

4.3.5 Excavación de la fosa de instalación para el geotextil de recolección

Para colocar adecuadamente el geotextil “Silt Fence” de recolección, fue necesario excavar una fosa de 10-15 cm de ancho, 15-20 cm de profundidad y 3,85 m de largo que correspondió al ancho estándar del geotextil, como se muestra en la Figura 12. El suelo extraído de la fosa se arrojó hacia la parte más baja de la pendiente, ya que luego fue reincorporado como se verá en los siguientes pasos.



Figura 12. Fotografía de la fosa de excavación para la colocación del geotextil de recolección correspondiente a una microparcela de erosión de 21 m² en un área de muestreo de CSS-60+AG.

4.3.6 Colocación del geotextil de recolección

Una vez excavada la fosa, se recostó el geotextil en la parte superior de la pendiente y se dejó una sección de 50 cm que se colocó en la fosa de forma que cubrió todo el fondo y las paredes de la misma como se muestra en la Figura 13. Una vez colocado el geotextil dentro de la fosa, se reincorpora el suelo que se había sacado de la misma, de forma que

este quede por encima del geotextil, presionándolo contra el fondo y las paredes de la fosa, como se observa en la Figura 13.

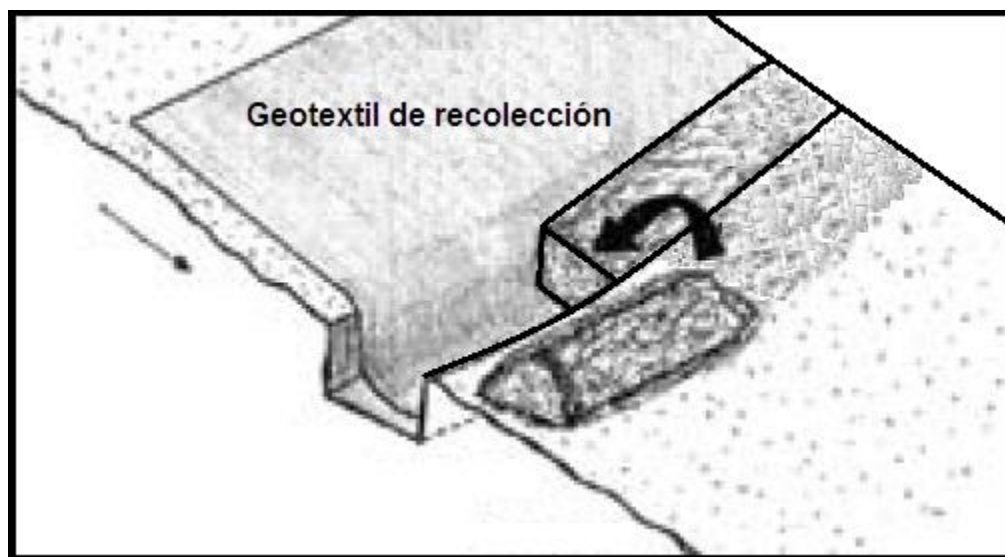


Figura 13. Dibujo de la fosa de excavación con el suelo reincorporado sobre el geotextil de recolección.

Fuente: Modificado de Prado y Aguilar 2007.

Nota: Para facilitar este trabajo puede enrollarse el resto del geotextil de recolección que no está en la fosa.

Una vez enterrado en la fosa de excavación esta sección del geotextil de recolección, se dobló en dirección a la pendiente y se estiró totalmente, luego se volvió a doblar a la mitad en dirección contraria a la pendiente. Una vez doblado, quedó un sobrante de aproximadamente 50 cm el cual se levantó de nuevo para poder aplanar el suelo de la fosa como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Fotografía que indica cómo acomodar el geotextil de recolección en la fosa de excavación correspondiente a una microparcela de erosión de 21 m² en un área de muestreo de CLS-60+A.

4.3.7 Ensamblaje del geotextil de recolección con las estacas

Luego de aplanar el suelo dentro de la fosa de excavación se estiró el geotextil de recolección de nuevo en dirección a la pendiente, en donde al estar doblado a la mitad, quedaron dos capas de geotextil de 50 cm estirado al ras del suelo. En el borde del geotextil, donde se encontró el pliegue, se enterraron 6 estacas separadas por 80 cm y a 40 cm de profundidad como se observa en la Figura 15.

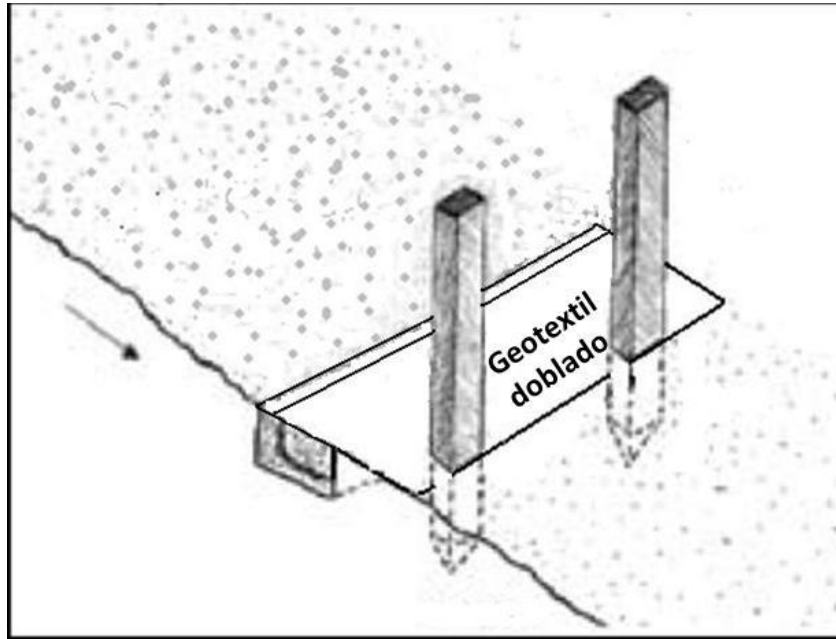


Figura 15. Dibujo del acomodo de las estacas con respecto geotextil de recolección antes de ser engrapadas a estas.

Nota: La distancia de separación entre estacas, puede ser modificada de modo que se adapte a las circunstancias del campo, velando porque el geotextil permanezca bien estirado. Así mismo, la profundidad de las estacas puede variar dependiendo del estado de humedad del suelo y sus características físicas.

Fuente: Modificado de Prado y Aguilar 2007.

Una vez colocadas las estacas, se levantaron 50 cm del geotextil verticalmente en contra de las mismas y se engraparon a estas de forma que el geotextil forme una canasta como se muestra en la Figura 16.



Figura 16. Fotografía que indica cómo ajustar el geotextil de recolección a las estacas de 1,20 m correspondiente a una microparcela de erosión de 21 m² en un área de muestreo de CLS-60+A.

4.3.8 Confección del pliegue del geotextil de recolección

Cada geotextil de recolección llevó un extremo doblado, el cual se hizo con dos objetivos, ajustar el ancho de la microparcela de 3,85 (ancho de fábrica) a 3 m (ancho de la microparcela) y darle una forma de canasta y poder recoger el material más eficientemente (Figuras 15GR y 16).

4.3.9 Colocación del geotextil de protección

Para colocar el geotextil de protección, se escavó una pequeña fosa similar a la fosa de excavación del geotextil de recolección, pero más sencilla y arrojando el suelo de la fosa hacia la parte superior de la pendiente. Esta fosa fue de 10 cm de ancho y 5 cm de profundidad y el mismo largo de 3,85 m. Una vez escavada la fosa, se cortaron a la mitad dos estacas de 1,20 m y se colocaron en el borde inferior de la fosa y a lo largo de esta separadas por aproximadamente 1 m. Por último se engrapó el geotextil a las estacas, de forma que quedaran 10 cm de geotextil por encima de la superficie y 5 cm dentro de la

fosa, los cuales se cubrieron con el suelo previamente removido como se observa en la Figura 17.



Figura 17. Fotografía del geotextil de protección correspondiente a una microparcela de erosión de 21 m² en un área de muestreo de CSS-30+AG.

4.3.10 Correcciones finales

Una vez construidas todas las microparcels con ambos geotextiles, se procedió a insertar en los bordes del geotextil de recolección, clavos con arandela ancha para corregir algunas arrugas que se presentaron en las mismas (Figura 18). Estas arrugas pueden potencialmente provocar “microcárvacas” por debajo del geotextil, haciendo que se pierda sedimento, empeorando la eficiencia de recolección, subestimando los datos. Una vez puestos los clavos, se marcó en alguna de las estacas de cada microparcela el número de “repetición” correspondiente y se limpiaron los sedimentos de todas estas para que comenzaran en un mismo tiempo cero de evaluación, el cual fue un 19 de julio del 2013.



Figura 18. Fotografía del geotextil de recolección con clavos de arandela ancha correspondiente a una microparcela de erosión de 21 m² en un área de muestreo de CSS-60+AG.

La Figura 19 muestra una serie de diagramas que resumen paso a paso la metodología previamente expuesta para la colocación adecuada del geotextil de recolección "Silt Fence".

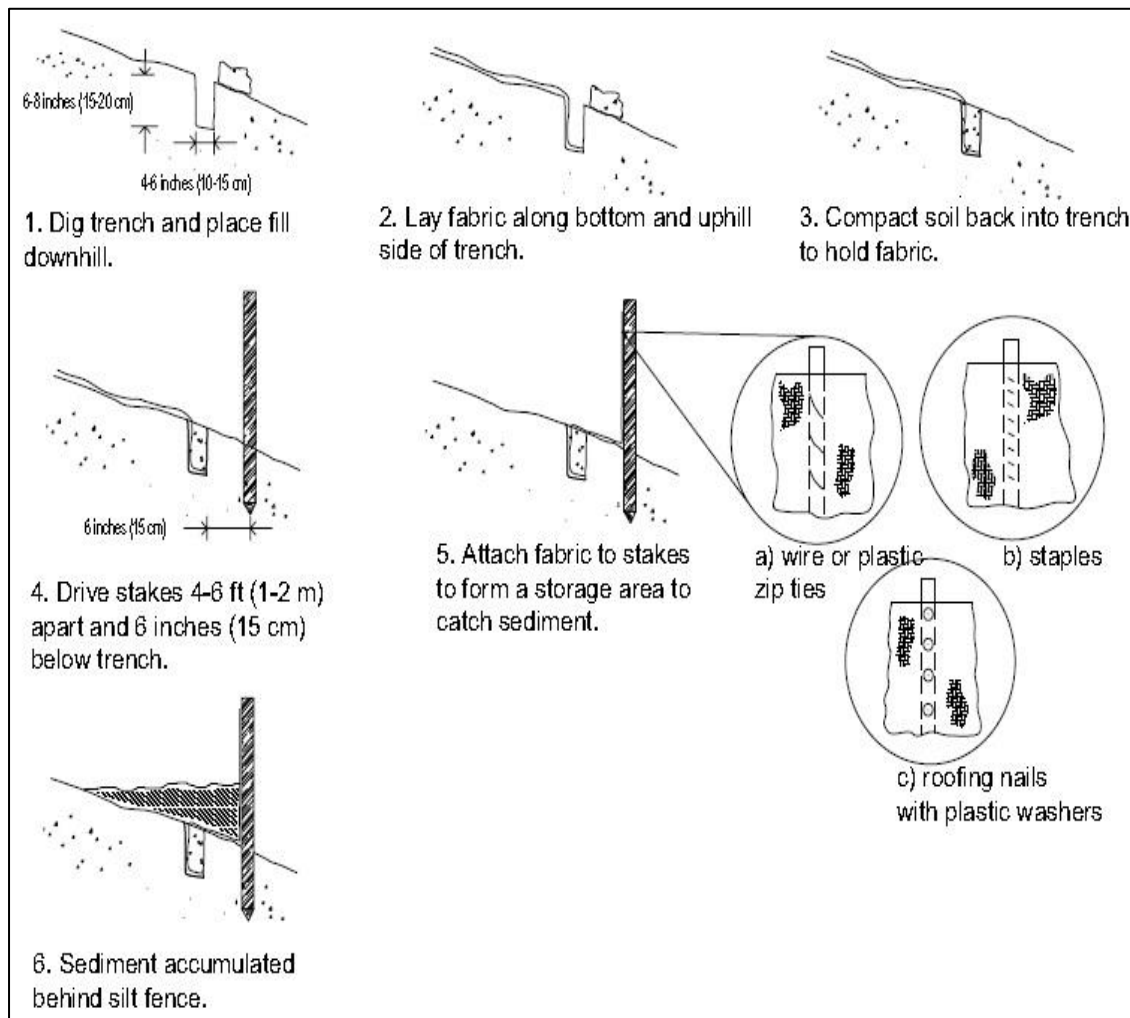


Figura 19. Diagrama resumen de la metodología para la adecuada instalación del geotextil de recolección.

Fuente: Robichaud y Brown 2002.

4.4 Toma de datos y variables a evaluar

4.4.1 Tasa de erosión y período experimental

Esta variable se midió mediante la pérdida de las partículas de suelo de cada microparcela depositada en el geotextil de recolección “Silt Fence” en un periodo de evaluación de una vez por semana (viernes) durante 22 semanas.

Todos los viernes, a partir del 19 de julio del 2013 y hasta el 13 de diciembre del mismo año, se procedió a visitar las 15 microparcels, recoger el sedimento depositado en el geotextil de recolección con una pala y una escoba, pesarlo en un balanza gravimétrica y coleccionar una muestra de humedad gravimétrica en una lata y una submuestra para análisis químico y de textura en una bolsa plástica. La Figura 20 muestra los materiales de una evaluación típica de recolección de sedimentos.



Figura 20. Fotografía de los materiales utilizados para la recolección semanal de sedimentos. Maletín con planillas para la toma de datos, balanza gravimétrica, pala de recolección de sedimentos, latas para las muestras de humedad gravimétrica y una hielera para su almacenaje, bolsas plásticas para las submuestras de fertilidad y textura y un balde multiuso.

Nota: En la fotografía faltan la escoba y una pala de jardinería.

Luego de hacer la recolección semanal de sedimentos, se procedió el mismo día a ingresar las muestras de humedad gravimétrica al Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica para hacerle su análisis respectivo. De esta forma, se determinó el porcentaje de humedad de la muestra mediante una estufa Venticell modelo 03-TE04 a una temperatura de 110 °C por un tiempo mínimo de 24 horas para corregir el peso semanal recolectado en la microparcela y determinar la masa seca de suelo perdido. La Figura 21 muestra parte del procedimiento de pesado y secado de las muestras de humedad gravimétrica.

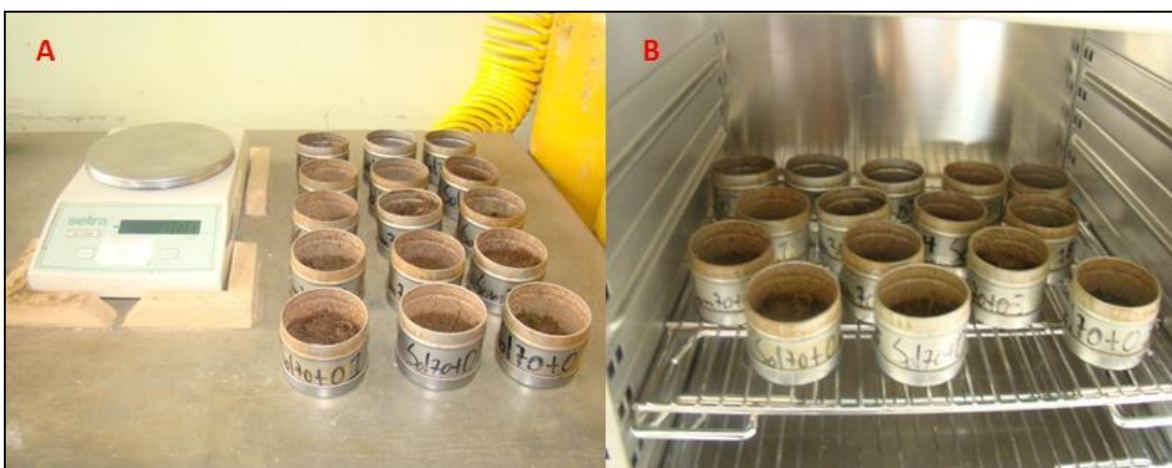


Figura 21. Fotografía del procedimiento de pesado (A) y secado (B) del Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.

Nota: El proceso de secado se dio a en.

Una vez concluido el período experimental, se calculó la tasa de erosión laminar semanal acumulada en las primeras 11 semanas de evaluación y la acumulada en las segundas 11 semanas y la total.

Adicionalmente, se seleccionó una de las fincas para realizar una estimación de pérdida de suelo por medio de la metodología de medición de surcos y cárcavas. Esta metodología (Somarriba et. al 2005) consistió en medir el largo total de cada cárcava y cada 10% de esta longitud total se realizó una medición de profundidad y ancho de la cárcava. Una vez obtenidos estos datos se procedió a utilizar las fórmulas en el Anexo 2. para calcular la erosión total.

En total, se midieron en la finca Parte Media (3,5 Ha.), 3 cárcavas distribuidas en el perímetro de la finca como se observa en la Figura 22. De esta forma se obtuvo información adicional sobre la pérdida de suelo en las cárcavas presentes en la finca.

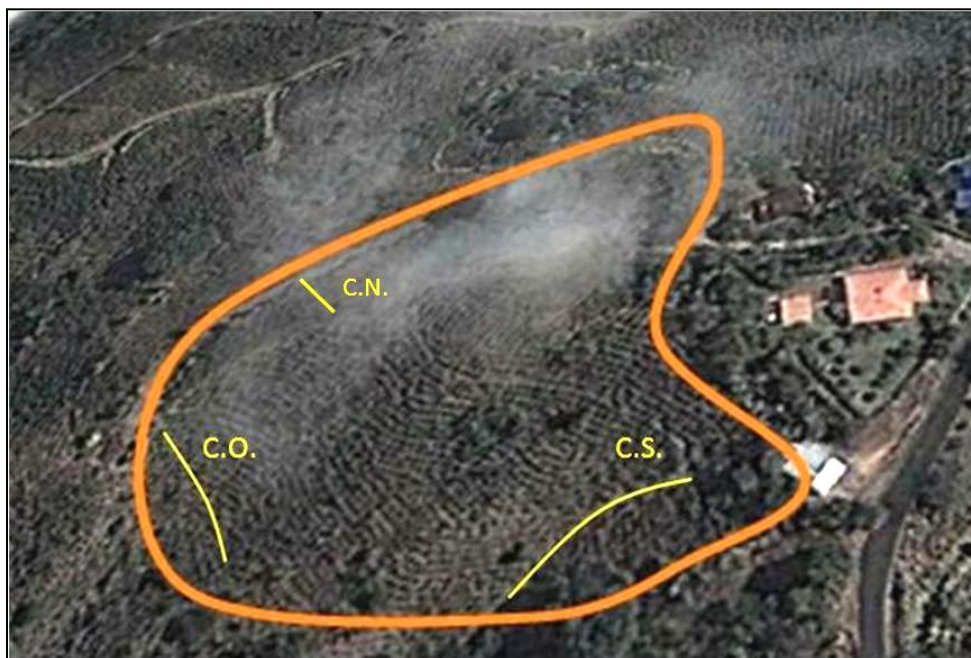


Figura 22. Imagen de satélite de la finca Parte Media donde se ilustra la ubicación de tres cárcavas utilizadas para estimar la de erosión total de la finca (t/ha). C.N.: Cárcava Costado Norte, C.O.: Cárcava Costado Oeste, C.S.: Cárcava Costado Sur.
Fuente: Google Earth 2013.

4.4.2 Pérdida de nutrientes y materia orgánica del sedimento recolectado

Se cuantificó la pérdida de nutrientes y materia orgánica del sedimento retenido a través de análisis de fertilidad de suelo en cada área de muestreo, en dos etapas del proyecto, a las primeras 11 semanas y en las segundas 11. Para ello, se tomó todas las semanas, una submuestra del sedimento depositado en cada microparcela, y luego, cuando se cumplieron las primeras 11 semanas, se mezclaron, homogeneizaron y cuartearon estas para obtener una muestra compuesta de cada microparcela (Figura 23) y realizarles el análisis de textura en el laboratorio. Así mismo, se procedió para la segunda etapa del proyecto.



Figura 23. Fotografías de la agrupación de submuestras (1) y el proceso de mezcla, homogeneización y cuarteado (2) para obtener una muestra compuesta de cada microparcela de erosión y realizarle un análisis de fertilidad y de porcentajes de materia orgánica en las primeras 11 semanas del proyecto.

Los análisis realizados en los sedimentos captados fueron:

- Químico Completo KCL- OLSEN (pH, acidez, Ca, Mg, K, P, Cu, Fe, Zn, Mn)
- Porcentaje de materia orgánica
- Textura

Los análisis de fertilidad de suelos y porcentaje de materia orgánica se realizaron en el Laboratorio de Suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), mientras que los de textura fueron realizados por el Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica.

Para determinar la pérdida nutricional y de materia orgánica, fue necesario convertir los valores del análisis de fertilidad del sedimento recolectado de cada microparcela a kilogramos por hectárea (kg/ha). Solamente se convirtieron los datos de calcio, magnesio, potasio, fósforo y porcentaje de materia orgánica, ya que las bases son elementos absorbidos en gran medida por las plantas, la materia orgánica es fundamental para el desarrollo físico y estructural del suelo y el fósforo es susceptible a la fijarse en la alofana

dado al carácter volcánico que tienen los suelos en estudio. En el Anexo 3 aparece un ejemplo de los cálculos realizados y los factores de conversión para transformar estos datos a kg/ha, así como la densidad de partículas del sedimentos recolectado que sirvió para transformar los datos.

4.4.3 Medición de precipitación

Uno de los factores más importantes relacionados con la erosión es la precipitación, por lo que se decidió buscar la estación meteorológica más cercana al sitio de estudio y revisar la cantidad de lluvia acumulada diaria (mm) comprendida entre el 12 de julio hasta el 13 de diciembre de 2013 (Ver Anexo 4).

La estación meteorológica más cercana al sitio de estudio fue Nagaatac (N° 80005), manejada por el Centro de Servicios de Estudios Básicos de Ingeniería e Hidrología del Instituto Costarricense de Electricidad (Figura 24). Una vez con los datos de precipitación diaria, se calculó el acumulado semanal para que coincidiera con las evaluaciones de pérdida de suelo que también se hicieron semanalmente.



Figura 24. Imagen de satélite donde se ubica el sitio de estudio del proyecto y la estación meteorológica Nagaatac (10,0515411 N, 84,5443349 W), las altitudes de las mismas, y la distancia entre estos dos puntos.

Fuente: Google Earth 2013.

4.5 Caracterización de las áreas de muestreo

4.5.1 Clasificación Taxonómica de Suelos

En cada una de las fincas donde se encontraban las áreas de muestreo se realizó una descripción del pedón modal del suelo por medio del libro de campo para la descripción y muestreo de suelos (Schoeneberger et al. 2002) que incluyó: transecto preliminar, información básica del sitio, descripción de los horizontes (profundidad, color, textura, consistencia, poros, raíces, límites y pruebas especiales), análisis de propiedades físicas y químicas y finalmente clasificación taxonómica a nivel de subgrupo (Soil Survey Staff

2010). Los siguientes fueron los análisis físicos y químicos que se realizaron en cada pedón modal:

- Conductividad hidráulica saturada
- Densidad aparente
- Densidad de partículas
- Textura
- Químico Completo KCL- OLSEN (pH, acidez, Ca, Mg, K, P, Cu, Fe, Zn, Mn)
- Porcentaje de materia orgánica por Blackmore.
- Porcentaje de carbono y nitrógeno y materia orgánica, relación C/N por autoanalizador por combustión seca.
- Ca, Mg, K y Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) en acetato de amonio (Meq/100g) y porcentaje de saturación de bases.
- Porcentaje de aluminio y hierro amorfo en oxalato de amonio.
- Porcentaje de retención de fósforo por Blackmore.

Los análisis físicos se realizaron en el Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica, mientras que los análisis químicos y de porcentaje de materia orgánica se realizaron en el Laboratorio de Suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). En adición, el Laboratorio de Suelos y Foliarés del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica realizó análisis de porcentaje de carbono, nitrógeno y relación C/N por medio del Autoanalizador de Carbono y Nitrógeno por combustión seca a los primeros dos horizontes de cada perfil del pedón modal.

4.5.2 Clasificación por Capacidad de Uso de Tierras

Con la información recopilada de la clasificación taxonómica de suelos, las tres fincas en estudio se clasificaron, también, según su capacidad de uso de tierra mediante el manual de Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras en Costa Rica por Bolaños et al. (1991).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Clasificación Taxonómica de las fincas a nivel de Subgrupo

La Figura 25 muestra las fotografías de los tres pedones modales estudiados en donde se delimitaron las áreas de muestreo. Estos comparten la característica de no poseer un horizonte B, lo cual hace que se clasifiquen en el orden de los Entisoles. La principal característica que se observa en este orden de suelo es el escaso desarrollo pedológico, evidenciado en la carencia de un horizonte B, el cual indica, ya sea en mayor o en menor grado, la formación de estructura. Además en la Figura 25, también se observa en las fincas Parte Media y Parte Alta la formación de horizontes enterrados (A_b) con coloraciones más oscuras que los horizontes A_p , los cuales no son muy usuales dentro del orden de los Entisoles, pero el efecto erosivo en la zona provoca que se deposite sedimentos sobre el horizonte A_p , dejándolos enterrados y provocando la formación de horizontes desordenados. Otra característica que vale la pena resaltar es el horizonte C_1 a menos de 20 cm de profundidad en la finca Parte Media, el cual también va seguido de un horizonte enterrado. Al desordenarse el perfil de esta manera se encuentra evidencia de que el suelo ha pasado por diversos periodos de erosión.

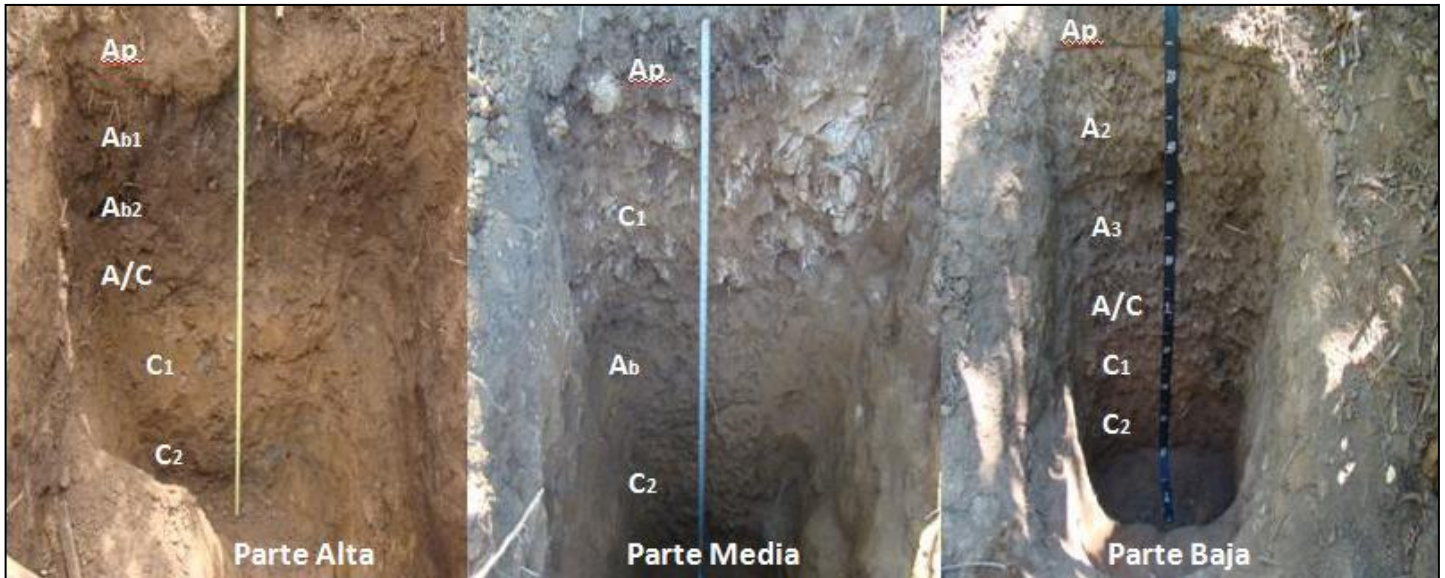


Figura 25. Fotografías de los pedones modales de la fincas Parte Alta, Parte Media y Parte Baja.

Para clasificar a nivel de subgrupo el suelo en cada finca, es necesario analizar primero la descripción general y pedológica de cada pedón modal, así como sus características físicas y químicas.

5.1.1 Descripción de finca Parte Alta

La finca Parte Alta mide 5771 m² y es una plantación que tiene aproximadamente 30 años de existencia, donde se ha sembrado de forma mezclada variedades de café como Villa Sarchí, Caturra y Catuaí a una densidad de siembra de 2x1,5 m, y se han incorporado árboles de aguacate (*Persea americana*), laurel falso (*Litsea glaucescens*), poró (*Erythrina* sp.), guayaba (*Psidium* sp.) (Cuadro 5) que se utilizan como sombra principalmente. La finca posee un rendimiento promedio de 35 fanegas/ha (Jiménez 2013) y en esta se encuentra solo un área de muestreo: Café Ligeramente Sombreado con 30% de Pendiente y con Acequias de Ladera y Gavetas (CLS-40+AG).

Otros datos importantes que se obtienen del Cuadro 7 es que la finca Parte Alta, posee una pendiente de 34%, un material parental conformado de andecitas y cenizas volcánicas y un 10% de pedregosidad superficial. Así mismo, el régimen de humedad de suma importancia para efectos de clasificación, donde para toda esta zona de Llano

Brenes, el régimen de humedad es de tipo ústico ya que el suelo permanece seco por más de 90 días acumulativos al año o más. Este régimen se establece mediante el balance hídrico de la zona, y se da cuando la evapotranspiración media mensual es mayor a la precipitación media mensual en por lo menos tres meses consecutivos. Rojas (2011) menciona que la estación seca de esta cuenca se extiende desde mediados de noviembre hasta abril con una evapotranspiración media mensual de aproximadamente 116 mm, mientras que la precipitación media mensual aproximada de esta zona es de 47 mm.

Cuadro 7. Descripción general del pedón modal de la finca Parte Alta.

Fecha	Miércoles 28 de agosto del 2013	Ped/Roca superficial	10% pedregosidad
Ubicación Geográfica	10,006279 N -84,466413 W	Sales y alcalinidad	Nula
Localización	Llano Brenes, San Rafael de San Ramón de Alajuela	Elevación	1345 m.s.n.m.
Número de punto	1	Dirección de pendiente	220 grados azimud
Nombre del Suelo	Llano Brenes-Parte Alta	Relieve	Fuertemente ondulado
Clasificación	Typic Ustorthents	Erosión	Severa
Fisiografía	Serranía o Montes de Aguacate	Vegetación	Café (Caturra, Catuaí, Villa Sarchí), aguacate, laurel falso, poró y guayaba.
Pendiente	34%	Clima	Ústico
Fertilidad Aparente	Media-baja	Drenaje	Bueno
Material Parental	Andecitas y cenizas	Nivel freático	Más de 2 m

La evidencia de horizontes enterrados en la finca Parte Alta es notoria. El Cuadro 8 muestra como el color del horizonte Ap, a los 25 cm posee un *value* de 3 y conforme aumenta la profundidad del suelo en los siguientes horizontes (47 y 61 cm), disminuye a 2, haciéndolos más oscuros, por lo que fueron determinados como horizontes enterrados (A_{b1} y A_{b2}). Normalmente, en un suelo sin horizontes enterrados el valor de *value* aumenta

conforme aumenta la profundidad, debido a que el contenido de materia orgánica también disminuye.

La prueba NAF también es otro parámetro que contribuye a la adecuada clasificación del suelo. La prueba NAF se utiliza para determinar la presencia de alofanos en los horizontes, lo que indicaría que el suelo posee influencia de ceniza volcánica. En el Cuadro 8 se observa una leve respuesta a la prueba NAF por lo que puede potencialmente descartarse la posibilidad de que este suelo pertenezca al orden de los Andisoles, sin embargo todo esto debe confirmarse con el porcentaje de retención de fósforo y los porcentajes de hierro y aluminio amorfo.

Cuadro 8. Descripción morfológica del pedón modal de la finca Parte Alta.

Horizontes	Profundidad (cm)	Color (húmedo)	Textura	Estructura	Consistencia (húmedo)	Poros	Raíces	Límites	Prueba NAF
Ap	0-25	10 YR 3/3	Franco Arcilloso	Bloques subangulares medios-moderados	Friable, plástico, ligeramente adherente	Medios y finos comunes, Muy finos abundantes	Gruesas y finas comunes, finas y muy finas abundantes	Plano y claro	Leve-moderada
Ab₁	25-47	10 YR 2/1	Franco Arenoso	Bloques subangulares medios-moderados	Friable, ligeramente plástico, adherente	Finos comunes, muy finos abundantes	Medias, finas y muy finas abundantes	Plano gradual	Leve-moderada
Ab₂	47-61	10 YR 2/2	Franco Arcilloso	Bloques subangulares medios-moderados	Muy firme, ligeramente plástico y adherente	Medios comunes, finos abundantes	Gruesas, medias y finas escasas	Plano claro	Ausente
A/C	61-82	10 YR 3/4	Franco Arcilloso	Bloques subangulares medios y gruesos muy débiles	Muy firme, plástico, ligeramente adherente	Finos y muy finos abundantes	Muy gruesas y medias escasas	Plano claro	Ausente
C₁	82-110	10 YR 4/4	Arcilloso	Bloques subangulares medios fuertes	Muy firme, plástico, adherente	Muy finos abundantes	Medias y muy finas escasas	Plano gradual	Ausente
C₂	110-150	10 YR 4/4	Arcilloso	Bloques subangulares medios y gruesos moderados	Firme, plástico, adherente	Muy finos abundantes	Ausentes		Ausente

5.1.2 Descripción de finca Parte Media

A diferencia de la finca Parte Alta, la finca Parte Media no poseen árboles para sombra, y la principal variedad de café utilizada es Catuaí sembrado a una densidad de siembra de 2x1,5 m (Cuadro 9). Esta finca es la más vieja de todas las evaluadas con 50 años de existencia con un área de 3,5 ha, presenta un rendimiento promedio de 30 fanegas/ha. (Jiménez 2013) y en ella se encuentran dos áreas de muestreo: Café Sin Sombra con 30% de pendiente y con Acequias de Ladera y Gavetas (CSS-30+AG) y Café Sin Sombra con 60% de pendiente y con Acequias de Ladera y Gavetas (CSS-60+AG).

Como se mencionó anteriormente, los detalles más importantes en la descripción superficial del pedón modal de la finca Parte Media (Cuadro 9) son el porcentaje de pedregosidad (10%), la magnitud de la pendiente (30%), el régimen de humedad ústico y el material parental de origen volcánico.

Cuadro 9. Descripción general del pedón modal de la finca Parte Media.

Fecha	Martes 11 de febrero del 2014	Ped/Roca superficial	10% de pedregosidad
Ubicación Geográfica	10,005165 N -84,468617 W	Sales y alcalinidad	Nula
Localización	Llano Brenes, San Rafael de San Ramón de Alajuela	Elevación	1281 m.s.n.m
Número de punto	1	Dirección de pendiente	320 grados azimud
Nombre del Suelo	Llano Brenes-Parte Media	Relieve	Escarpado
Clasificación	Lithic Ustorthents	Erosión	Fuerte
Fisiografía	Serranía o Montes del Aguacate	Vegetación	Café Catuaí
Pendiente	30%	Clima	Ústico
Fertilidad Aparente	Media	Drenaje	Bueno
Material Parental	Coluvios de origen volcánico	Nivel freático	Más de 2 m

El pedón modal de la finca Parte Media presentó un perfil poco usual por su naturaleza desordenada e irregular. Esto se evidencia en el horizonte C a tan sólo 16 cm de profundidad y en la ondulación del límite con el horizonte A_b (Cuadro 10), el cual también se observa bien en la Figura 25. Nuevamente este tipo de arreglos irregulares se deben en gran medida al relieve y a la pedogénesis del terreno, donde, probablemente este horizonte C fue formado por coluviones volcánicos, enterrando el horizonte A, y el cual fue posteriormente cubierto por sedimentos, minerales y materia orgánica formando el horizonte Ap mencionado en el Cuadro 10. No obstante, en este suelo tampoco se encontraron indicios de alofana por su leve reacción en la prueba NAF, por lo que su naturaleza de Andisol debe ser confirmada con la el porcentaje de retención de fósforo y aluminios y hierro amorfo.

Cuadro 10. Descripción morfológica del pedón modal de la finca Parte Media.

Horizontes	Profundidad (cm)	Color (húmedo)	Textura	Estructura	Consistencia (húmedo)	Formaciones	Poros	Raíces	Límites	Prueba NAF
Ap	0-16	5 YR 2,5/2	Franco Arcilloso	Bloques subangulares y firmes	Adherente y ligeramente plástico	Pedregosidad de un 5% del perfil	Muy finos, finos y medios abundantes	Muy finos y finos abundantes	Plano y gradual	Modera-da
C1	16-77	7,5YR 4/3	Franco Arcilloso	Bloques subangulares muy firmes	Ligeramente adherentes y ligeramente plástico	Pedregosidad un 80% del perfil	Muy finos, finos y medios abundantes	Muy finos, finos y medios abundantes	Plano y abrupto	Débil
Ab	77-122	7,5YR 4/6	Franco Arcillo Limoso	Bloques subangulares firmes	Ligeramente adherente y plástico	Pedregosidad de un 5% del perfil	Muy finos, finos y medios comunes	Muy finos y finos escasos y medios comunes	Ondulado y gradual	Débil
C2	122-190	2,5YR 4/4	Franco Arcilloso	Bloques subangulares firmes	Ligeramente adherentes y ligeramente plástico	Fraciones de roca muy meteorizada en un 10% y Concreciones de manganeso	Muy finos abundantes y finos y medios comunes	Muy finos escasos y medios comunes	Ausentes	Nula

5.1.3 Descripción de finca Parte Baja

Por último, la finca Parte Baja es la más reciente de las tres evaluadas, con apenas 4 años de existencia, un área de 7000 m² y en donde se siembran diferentes variedades de café como Catuaí, Villa Sarchí pero principalmente Caturra a una densidad de 2x1,5 m, además se utilizan una gran gama de plantas y árboles para sombra como caña india (*Dracaena* sp.), burío (*Heliocarpus appendiculatus*), guayaba (*Psidium* sp.), aguacate (*Persea americana*), itabo (*Yucca guatemalensis*), cítricos (*Citrus* sp.), plátano y banano (*Musa* sp.) y manzana de agua (*Syzygium malaccense*) (Cuadro 11). Esta finca tiene un rendimiento promedio de entre 30-35 fanegas/ha (Pérez 2013) y se delimitaron dentro de ella dos áreas de muestreo: Café Ligeramente Sombreado con 60% de pendiente con acequias de ladera (CLS-60+A) y Café Moderadamente Sombreado con 60% de pendiente con acequias de ladera (CMS-60+A).

A diferencia de los suelos en las partes más altas, esta finca presenta una mayor pendiente (60%) reflejada en el pedón modal (Cuadro 11). Sin embargo, sí posee una pedregosidad de 10% y de igual forma un material parental proveniente de coluvios volcánicos.

Cuadro 11. Descripción general del pedón modal de la finca Parte Baja

Fecha	Martes 28 de enero del 2014	Ped/Roca superficial	10% de pedregosidad
Ubicación Geográfica	9,993335 N -84,468646 W	Sales y alcalinidad	Nula
Localización	Llano Brenes, San Rafael de San Ramón de Alajuela	Elevación	1095 m.s.n.m.
Número de punto	1	Dirección de pendiente	210 grados azimud
Nombre del Suelo	Llano Brenes-Parte Baja	Relieve	Fuertemente ondulado
Clasificación	Vitrandic Ustorthents	Erosión	Severa
Fisiografía	Serranía o Montes del Aguacate	Vegetación	Café (Caturra, Catuaí, Villa Sarchí), caña india, burío, guayaba, aguacate, itabo, mandarina, cítricos, plátano, banano y manzana de agua
Pendiente	60%	Clima	Ústico
Fertilidad Aparente	Media	Drenaje	Bueno
Material Parental	Coluvios de origen volcánico	Nivel freático	Más de 2 m

En comparación con las otras dos fincas, el pedón modal de la finca Parte Baja (Cuadro 12), presenta la particularidad de no tener horizontes enterrados ya que el valor de *value* del horizonte A₂ no disminuye al aumentar la profundidad. De igual forma, este suelo no posee un horizonte B, el cual es indicador de que el suelo ha tenido un poco de desarrollo de estructura, por lo cual puede encajar en el orden de los Entisoles. Otra diferencia con respecto a los otros suelos descritos, es que este tuvo una reacción más intensa en cuanto a la prueba NAF por lo que tiene más posibilidades de ser clasificado en el orden de los Andisoles siempre y cuando los análisis químicos lo confirmen.

Cuadro 12. Descripción morfológica del pedón modal de la finca Parte Baja

Horizontes	Profundidad (cm)	Color (húmedo)	Estructura	Consistencia (húmedo)	Formaciones	Poros	Raíces	Límites	Prueba NAF
Ap	0-16	10 YR 3/2	Bloques subangulares finos y muy finos moderado	Ligeramente firme, ligeramente adherente y plástico	Pedregosidad en bloques de (3X3,5-10X7,5) en un 7%	Finos y muy finos abundantes, gruesos comunes	Finas y muy finas abundantes, medias escasas	Gradual y plano	Leve
A₂	16-56	10 YR 2/2	Bloques subangulares medios y finos moderados	Ligeramente adherente y plástico y friables	Pedregosidad en bloques de (3X2-10X9) en un 10%	Finos, muy finos, medios y gruesos abundantes	Muy finas, finas y medias abundantes	Gradual y plano	Moderada
A₃	56-100	10 YR 3/3	Bloques subangulares medios y muy finos moderados	Ligeramente adherente y plástico	Pedregosidad en bloques de (0,5X2-5X8) en un 7%	Finos y muy finos abundante, medios comunes y gruesos abundantes	Muy finas, finas y medias escasas	Gradual y plano	Moderada
A/C	100-120	10 YR 3/3	Bloques subangulares finos y muy fino débiles	Ligeramente adherente y plástico	Fragmentos de roca muy meteorizada en un 10%	Muy finos y finos abundantes, gruesos y medios comunes	Muy finas, finas y medias escasas	Irregular y claro	Leve
C₁	120-148	10 YR 3/4	Bloques subangulares gruesos y medio débiles	Ligeramente adherente y plástico	Fragmentos de roca muy meteorizada en un 10%	Finos y muy finos abundantes, gruesos y muy gruesos comunes	Muy finas, finas y medias escasas	Plano y claro	Moderada
C₂	148-195	10 YR 4/6	Bloques subangulares gruesos y medios débiles	Ligeramente firme, ligeramente plástico y adherente	Fragmentos de roca muy meteorizada en un 10%	Finos, muy finos, medios y gruesos abundantes	Muy finas, finas y medias escasas	-	Leve

5.1.4 Descripción física y química de los pedones modales de los suelos estudiados

El Cuadro 13 muestra el tamaño de partícula expresada en porcentajes de arena, limo y arcilla de todos los horizontes del perfil de los pedones modales de las fincas evaluadas. Estos datos brindan información sobre el grado de meteorización de cada suelo, en donde la finca Parte Alta todos tiene un mismo grado de meteorización física, mientras que en la finca Parte Media se aprecia que los horizontes C₁ y C₂, tienen texturas más francas ya que la alteración física de estos horizontes no ha sido tan severa.

Cuadro 13. Porcentaje de arena, limo y arcilla determinado en el laboratorio por el método de Bouyoucos (Henríquez y Cabalceta 1999) de los horizontes en cada pedón modal analizado.

(%)					
Profundidad (cm)	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural	
Finca Parte Alta					
Ap	0-25	45	35	20	Franco
Ab₁	25-47	47	35	18	Franco
Ab₂	47-61	44	33	23	Franco
A/C	61-82	47	33	20	Franco
C₁	82-110	44	33	23	Franco
C₂	110-150	42	33	25	Franco
Finca Parte Media					
Ap	0-16	37	35	28	Franco arcilloso
C₁	16-77	40	35	25	Franco
Ab	77-122	35	37	28	Franco arcilloso
C₂	122-190	38	37	25	Franco
Finca Parte Baja					
Ap	0-16	52	30	18	Franco arenoso
A₂	16-56	45	27	28	Franco arcilloso
A₃	56-100	42	30	28	Franco arcilloso
A/C	100-120	50	27	23	Franco arcillo arenoso
C₁	120-148	60	25	15	Franco arenoso
C₂	148-195	62	23	15	Franco arenoso

Fuente: Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica 2014. N° de registros: 48147, 49418, 49258.

Las propiedades físicas del suelo cumplen un papel determinante no sólo en la clasificación del mismo, sino que también proveen información sobre el movimiento del agua. Para efectos de clasificación, y junto con las prueba NAF, la densidad aparente es uno de los parámetro que indica si el suelo posee características ándicas y puede clasificarse en el orden de los Andisoles. Para que un suelo pueda clasificarse como Andisol, este debe de poseer características ándicas en más de 35 cm de espesor, y una de estas características es poseer una densidad menor a $0,9 \text{ g/cm}^3$ (Soil Survey Staff 2010). En el Cuadro 15 se observa que sólo el horizonte Ap de la finca Parte Media tiene un densidad menor a la requerida pero tan sólo son 16 cm de espesor, por lo que podría ser un suelo influenciado por la ceniza volcánica pero no pertenece al orden de los Andisoles.

La conductividad hidráulica de un suelo es la capacidad que tiene este de mover el agua cuando este se encuentra saturado y también es un parámetro que ayuda a entender principalmente a estimar el tamaño de obras de drenaje en una finca (Henríquez y Cabalceta 1999). Existen formas de calificar la conductividad hidráulica, donde en el Cuadro 14 aparecen las distintas clases dependiendo de su magnitud. Basándose en esta clasificación, se notará que la finca Parte Alta tiene una conductividad hidráulica general de Moderada a Moderadamente Rápida dentro de todo el perfil, mientras que la Finca Parte Media posee una conductividad hidráulica de Rápida a Muy Rápida, inclusive con valores de 169 cm/h en el horizonte Ap. Sin embargo los horizontes más profundos de esta última, no presentan movilidad de agua en condiciones saturadas. Por último, la finca Parte Baja, presenta conductividades hidráulicas de Rápida a Muy Rápida por lo que podría esperarse que el movimiento superficial de sedimento no fuese tan alto.

Cuadro 14. Clasificación cuantitativa de la conductividad hidráulica del suelo.

Clase	Conductividad Hidráulica (cm/h)
Muy lenta	Menos de 0,13
Lenta	0,13-0,51
Moderadamente lenta	0,51-2,00
Moderada	2,00-6,30
Moderadamente rápida	6,30-12,70
Rápida	12,70-25,40
Muy rápida	Más de 25,40

Fuente: U.S. Bureau of Plant Industry and Agricultural Engineering, citado por Henríquez y Cabalceta 1999.

Cuadro 15. Características físicas de los horizontes del pedón modal de las fincas evaluadas.

Horizonte	Profundidad (cm)	Retención (%)		Agua (%)		Densidad (g/cm ³)		Conductividad Hidráulica (cm/h)
		0,33	15	Útil	Aparente	Partículas		
Finca Parte Alta								
Ap	0-25	31	25	6	0,99	2,44	9,01	
Ab₁	25-47	34	28	6	1,22	2,33	16,02	
Ab₂	47-61	28	23	5	1,11	2,65	0,05	
A/C	61-82	29	25	4	1,18	2,53	1,38	
C₁	82-110	30	27	3	1,04	2,73	2,72	
C₂	110-150	37	34	3	1,04	2,84	4,62	
Finca Parte Media								
Ap	0-16	42	29	13	0,73	2,48	169,2	
C₁	16-77	37	22	15	1,24	2,44	16,1	
Ab	77-122	38	27	11	1,32	2,65	0,0	
C₂	122-190	42	29	13	1,30	2,79	0,0	
Finca Parte Baja								
Ap	0-16	36	33	3	1,13	2,42	106	
A₂	16-56	32	29	3	1,06	2,53	23	
A₃	56-100	33	28	5	1,15	2,48	61	
A/C	100-120	34	31	3	1,07	2,30	19	
C₁	120-148	37	31	6	1,20	2,49	18	
C₂	148-195	40	39	1	1,19	2,74	37	

Fuente: Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica 2014. N° de registros: 48148, 49419, 49259.

Cuadro 16. Análisis químico completo de fertilidad de los horizontes del pedón modal de las fincas evaluadas.

Horizontes	Profundidad (cm)	cmol(+)/l							mg/l				
		pH	Acidez	Ca	Mg	K	CICE	%SA	P	Zn	Mn	Cu	Fe
Niveles Críticos		5,5	0,5	4	1	0,2	5	10	10	3	5	1	10
Parte Alta													
Ap	0-25	4,8	2,20	7,3	2,6	0,52	12,62	17,43	4	1,6	34	6	29
Ab1	25-47	5,1	0,50	9,40	3,10	0,74	13,74	3,64	4	2,0	23	4	29
Ab2	47-61	5,4	0,25	18,10	4,60	0,83	23,78	1,05	3	0,9	14	5	14
A/C	61-82	5,4	0,20	26,90	6,10	0,70	33,90	0,59	6	0,5	6	6	9
C1	82-110	5,5	0,25	20,60	5,40	0,21	26,46	0,94	4	0,2	4	10	8
C2	110-150	5,4	0,20	17,20	4,70	0,33	22,43	0,89	6	0,4	5	10	9
Parte Media													
Ap	0-16	4,9	2,00	4,7	1,6	0,72	9,02	22,17	26	3,8	45	5	90
C1	16-77	4,7	0,70	7,8	2,2	0,41	11,11	6,30	8	0,6	3	4	32
Ab	77-122	4,6	1,10	5,9	2,4	0,23	9,63	11,42	5	0,6	4	4	8
C2	122-190	4,6	3,00	5,0	2,9	0,18	11,08	27,08	4	0,7	3	3	7
Parte Baja													
Ap	0-16	4,8	0,50	12,2	3,3	0,19	16,19	3,09	9	0,8	3	4	18
A2	16-56	5,2	0,50	8,7	2,3	0,16	11,66	4,29	8	1,4	6	3	29
A3	56-100	4,9	0,55	10,2	2,8	0,43	13,98	3,93	13	0,6	32	4	27
A/C	100-120	4,7	0,35	13,9	3,3	0,24	17,79	1,97	10	1,4	3	3	12
C1	120-148	4,6	0,50	14,7	3,9	0,30	19,40	2,58	9	1,3	4	3	12
C2	148-195	4,6	0,60	23,7	5,4	0,34	30,04	2,00	15	0,6	8	4	11

Nota: Solución extractora: KCl-Olsen Modificado

Fuente: Laboratorio de suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) 2014. N° de registro: (3319-3324), (419-422), (423-428).

Es notable la influencia volcánica que existe en todos los suelos descritos, sin embargo, la clasificación de suelos es exclusiva, y según los datos de cada finca, ninguno de estos suelos se puede catalogar como Andisoles. En cuanto a características químicas, para que un suelo pueda clasificarse como Andisol, este requiere que en 35 cm del suelo del perfil se dé una retención de fósforo sea igual o mayor a 85% y además que la suma de la mitad del porcentaje de hierro (Fe) y el porcentaje total de aluminio (Al) sea igual o mayor a 2. Todas las fincas cumplen con la primera característica, en especial la Parte

Media y Baja, sin embargo no cumplen con la última por lo que no se clasifican en el orden de los andisoles, pese a tener influencia volcánica.

Por otro lado, mediante el Cuadro 17 se puede considerar que tanto la finca Parte Alta y Parte Baja, son de naturaleza éútrica, ya que el porcentaje de saturación de bases en todos los horizontes es elevado. La finca Parte Media por otro lado, posee niveles de saturación de bases que lo podrían clasificar en el orden de los Ultisoles, sin embargo este suelo no posee un horizonte argílico por la cual no se clasifica en esta categoría.

Cuadro 17. Características químicas para clasificación de los horizontes del pedón modal de las fincas evaluadas.

Horizontes	Profundidad (cm)	Amorfos (Oxalato) (%)		Retención P (Blackmore) (%)	Cationes intercambiables (meq/100g)				
		Fe	Al	P	Ca	Mg	K	CIC	SB (%)
Finca Parte Alta									
Ap	0-25	1,2	0,85	85,6	11,20	2,80	0,69	35,7	41
Ab₁	25-47	1,1	0,65	84,3	15,70	3,20	0,87	37,2	53
Ab₂	47-61	1,2	0,75	86,2	23,40	4,70	0,98	43,6	67
A/C	61-82	1,3	0,75	84,7	30,40	6,30	0,84	51,7	73
C₁	82-110	1,1	0,65	86,9	25,10	5,50	0,31	44,7	69
C₂	110-150	1,3	0,55	87,3	22,60	4,80	0,42	40,1	69
Finca Parte Media									
Ap	0-16	1,65	0,85	92,0	6,2	1,7	0,87	28,6	31
C₁	16-77	1,40	0,90	86,4	8,9	2,4	0,61	35,7	33
Ab	77-122	1,55	0,95	82,5	7,1	2,5	0,34	28,6	35
C₂	122-190	1,30	0,75	81,6	6,2	3,1	0,29	27,3	35
Finca Parte Baja									
Ap	0-16	1,50	0,90	90,3	15,3	3,5	0,25	34,4	55
A₂	16-56	1,60	0,85	89,5	10,5	2,5	0,23	32,8	40
A₃	56-100	1,35	0,75	89,7	14,2	2,9	0,52	36,6	48
A/C	100-120	1,45	0,65	85,2	16,3	3,4	0,36	37,9	53
C₁	120-148	1,25	0,45	79,8	17,4	4,1	0,44	38,4	57
C₂	148-195	1,35	0,40	80,6	26,9	5,6	0,46	49,6	66

Nota: Los cationes intercambiables fueron extraídos con acetato de amonio.

Fuente: Laboratorio de suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) 2014. N° de registro: (3318-3324), (419-422), (423-428).

El Cuadro 18 muestra nuevamente la evidencia de horizontes enterrados como es el caso de la finca Parte Alta, ya que el porcentaje de materia orgánica aumenta el doble conforme aumenta la profundidad del suelo, cuando en un suelo este usualmente disminuye al aumentar la profundidad. La finca Parte Media no tiene este aumento en el porcentaje de materia orgánica al aumentar la profundidad como en la finca Parte Alta. Esta, a los 20 cm presentó un horizonte C₁ con bajo porcentaje de materia orgánica, seguido de otro horizonte Ab de color más oscuro (Cuadro 8), por lo que también se consideró como un horizonte enterrado.

Cuadro 18. Análisis de porcentaje de carbono y nitrógeno, relación carbono/nitrógeno y porcentaje de materia orgánica de los dos primeros horizontes del pedón modal de las fincas evaluadas.

Horizontes	Profundidad (cm)	% Total		Relación C/N	MO (%)
		C	N		
Parte Alta					
Ap	0-25	1,12	0,14	8,0	1,6
Ab₁	25-47	2,52	0,32	7,9	3,6
Parte Media					
Ap	0-16	3,81	0,41	9,3	5,45
C₁	16-77	0,58	0,06	9,7	0,83
Parte Baja					
Ap	0-16	1,67	0,18	9,3	2,39
A₂	16-56	1,60	0,21	7,6	2,29

Nota: El % C y N totales se determinaron con el Autoanizador de C/N por combustión seca. El valor del % MO con esta metodología fue determinado multiplicando el % C total por 1,43.

Fuente: Laboratorio de Suelos y Foliare del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica 2014. N° de registro: 49578.

Finalmente, al no clasificarse dentro del orden de los Andisoles, Alfisoles, Ultisoles, los suelos evaluados podrían estar dentro del orden de los Inceptisoles, este orden de suelo se caracteriza por poseer un grado de desarrollo pedogenético incipiente (horizontes B), el cual no se da en este caso, por lo tanto estos suelos se clasificaron en el orden de los Entisoles. El Cuadro 19 resume la clasificación de cada finca a nivel de subgrupo.

Cuadro 19. Clasificación taxonómica a nivel de subgrupo de las tres fincas donde se realizaron las mediciones de pérdida de suelo.

Finca	Unidad Taxonómica	
	Orden	Subgrupo
Parte Alta	Entisol	Typic Ustorthents
Parte Media	Entisol	Lithic Ustorthents
Parte Baja	Entisol	Vitrandic Ustorthents

5.2 Clasificación por Capacidad de Uso de Tierras

Con la información recopilada en el análisis taxonómico de suelo y añadiendo que Rojas (2011) clasifica esta parte de la cuenca como Bosque Húmedo Tropical (bh-T) de acuerdo a la clasificación de zonas de vidas de Holdridge, fue posible realizar una adecuada clasificación de capacidad de uso de tierras. El Cuadro 20 muestra el resumen de la clasificación de cada área de muestreo, así como sus principales limitantes.

Se puede observar que estas tierras son de clase VII, según el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica (Bolaños *et. al* 1991), esta clase posee grandes limitaciones para la producción agropecuaria y sólo pueden utilizarse para el manejo forestal en forma de cobertura boscosa. Si estas tierras tienen un uso distinto, se debe procurar la regeneración natural del bosque. Dentro de las limitaciones más evidentes que poseen estas tierras están las altas pendientes, la erosión severa, la baja profundidad del suelo, la alta pedregosidad y la baja fertilidad, todas resumidas en el Anexo 5, donde aparecen las categorías de los parámetros utilizados para la clasificación adecuada.

Cuadro 20. Clasificación de la capacidad de uso de tierras de las diferentes áreas de muestreo evaluadas.

Área de muestreo	Unidad de manejo
CLS-30+AG	VII e ₁₂ S ₁₂₃₄ C ₂₃
CSS-30+AG	VII e ₁₂ S ₁₂₃₄ C ₂₃
CSS-60+AG	VII e ₁₂ S ₁₂₃₄ C ₂₃
CLS-60+A	VII e ₁₂ S ₁₃ C ₂₃
CMS-60+A	VII e ₁₂ S ₁₃ C ₂₃

5.3 Cuantificación y determinación de la tasa de erosión

5.3.1 Cuantificación de erosión laminar por medio del geotextil “Silt Fence” T2100

La tasa de erosión laminar se evaluó semanalmente durante 22 semanas, desde el mes de julio hasta el mes de diciembre, así mismo, se evaluó la precipitación acumulada semanal para determinar cómo esta afecta el proceso erosivo. La Figura 26 muestra esta evaluación de 22 semanas, en donde, la máxima tasa de erosión laminar semanal fue de 2,3 t/ha en el área CMS-60+A, en la transición agosto-setiembre y sin erosión en el mes de diciembre. El análisis de precipitación indica que para las 22 semanas de evaluación, la precipitación total fue de 2916,2 mm, el máximo momento de precipitación semanal alcanzó los 342 mm entre el 30 de agosto y 6 de setiembre y el más bajo (sin lluvia) entre el 22 de noviembre y 13 diciembre (Anexo 2). La Figura 26 explica claramente como la precipitación está ligada a la tasa de erosión hídrica, donde los picos de precipitación coinciden notablemente con los picos de erosión. Además, el hecho de que 2 o 3 semanas antes de los picos máximos de erosión se hicieran aplicaciones de herbicidas sistémicos (glifosato y S-metolacoloro) los días 23 y 30 de agosto y 20 de setiembre, puede estar influyendo de forma positiva la tasa de erosión. Ver el Anexo 6 donde aparecen las tasas de erosión hídrica laminar semanales de cada una de las microparcels así como la precipitación acumulada semanal.

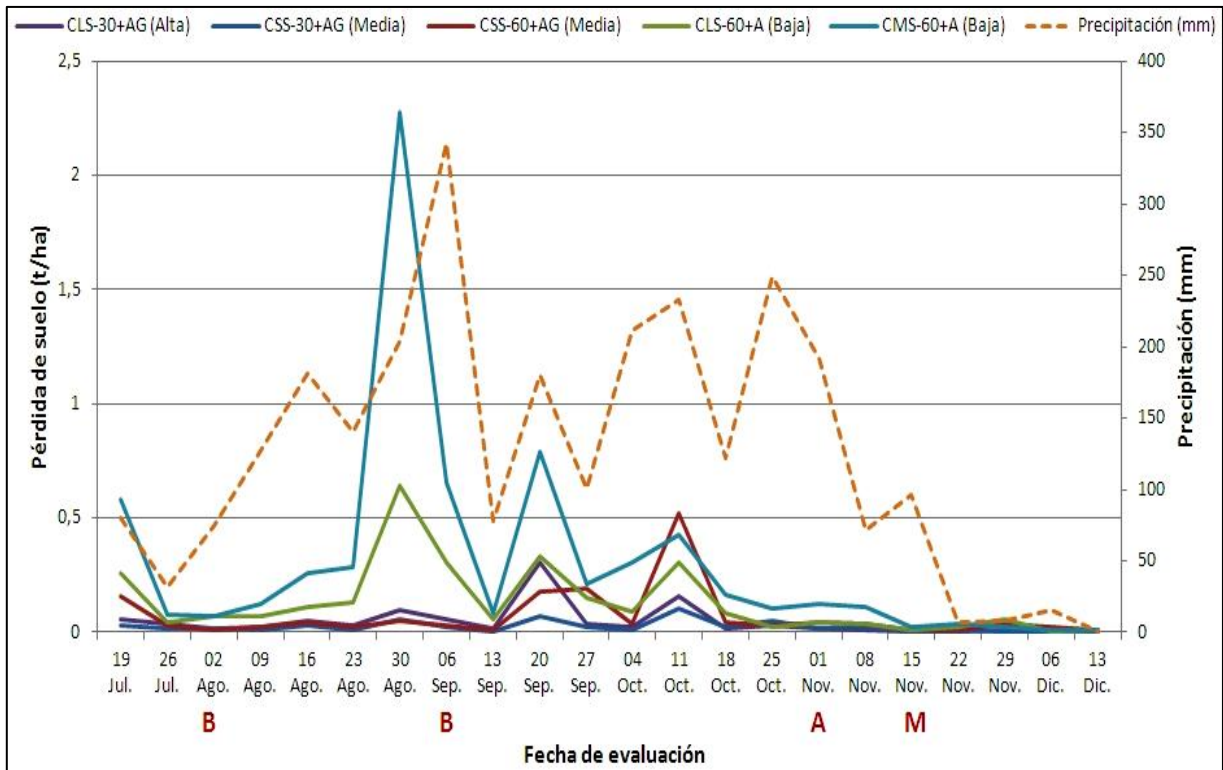


Figura 26. Sedigrama e Hidrograma que expone la tasa de erosión laminar semanal y precipitación acumulada semanal durante 22 semanas, en cinco áreas de muestreo en plantaciones de café ubicadas en la cuenca del Río Jesús María, en el distrito de San Rafael de San Ramón de Alajuela. **B:** Aplicación de herbicida en la finca Parte Baja. **A:** Aplicación de herbicida en la finca Parte Alta. **M:** Aplicación de herbicida en la finca Parte Media.

Nota: La precipitación acumulada semanal se obtuvo de la estación meteorológica Nagaatac del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), ubicada a 9,3 km al noroeste del sitio de estudio y a una altura de 490 m.s.n.m.

Otra de las variables que más afecta la erosión hídrica laminar es la magnitud de la pendiente, donde se observa en la Figura 27, que las áreas de muestreo que presentan mayor erosión son las que poseen 60% de pendiente, independientemente de la sombra y las obras de conservación. Por otro lado, la Figura 27 también expone una diferencia en las tasas de erosión entre las fincas que poseen gavetas de recolección y las que no. En las primeras, como las áreas de muestreo CSS-30+AG, CSS-60+AG y CLS-30+AG, las tasas de erosión no superan una t/ha, esto se debe en gran parte a que las obras de conservación disminuyen la velocidad de escorrentía provocando un menor arrastre de sedimento y por lo tanto una menor erosión laminar (Figura 28).

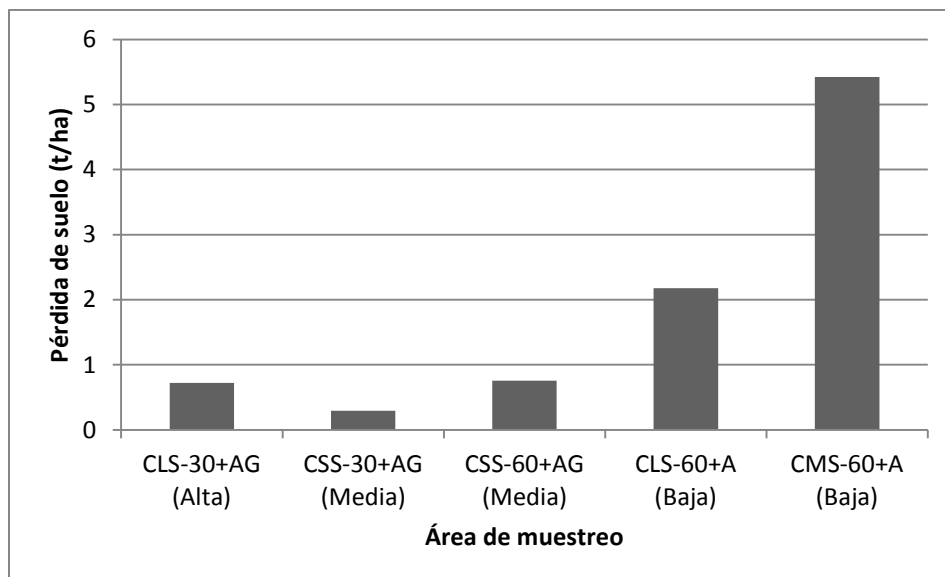


Figura 27. Pérdida de suelo total en un periodo de 11 semanas comprendido desde el 19 de julio hasta el 27 de setiembre del 2013, en cinco áreas de muestreo en plantaciones de café ubicadas en la cuenca del Río Jesús María, en el distrito de San Rafael de San Ramón de Alajuela.



Figura 28. Fotografía de una acequia de ladera y una gaveta de recolección en el área de muestreo CSS-30+AG (finca Parte Media) con aproximadamente 1,5 m de profundidad, tomada en setiembre del 2013.

En contraste, la segunda parte de la época lluviosa del año (octubre, noviembre y diciembre) se registraron lluvias de menor magnitud (ver Anexo 4), debido a esto, las tasas

de erosión en la Figura 29 no superan las 2 t/ha. Además, esta disminución en la precipitación puede provocar que en las áreas de muestreo se de un cambio en las tasa de erosión. En la segunda parte del semestre, al comprar áreas de muestreo con igual pendiente y diferentes obras de conservación, se notó que aunque el área CSS-60+AG tenga gavetas de recolección, esta mostró mayor susceptibilidad a la erosión que otras áreas de muestreo con gavetas (CLS-60+A). Esto se puede deber al hecho de que en el segundo período de la época lluviosa se hicieron dos aplicaciones más de herbicida que no se hicieron en el área de muestro CLS-60+A (finca Parte Baja), una a principios de setiembre y otra a mediados de noviembre (Figura 26). Un manejo más intensivo de la cobertura vegetal con herbicidas puede causar mayor velocidad de escorrentía y por ende más erosión laminar.

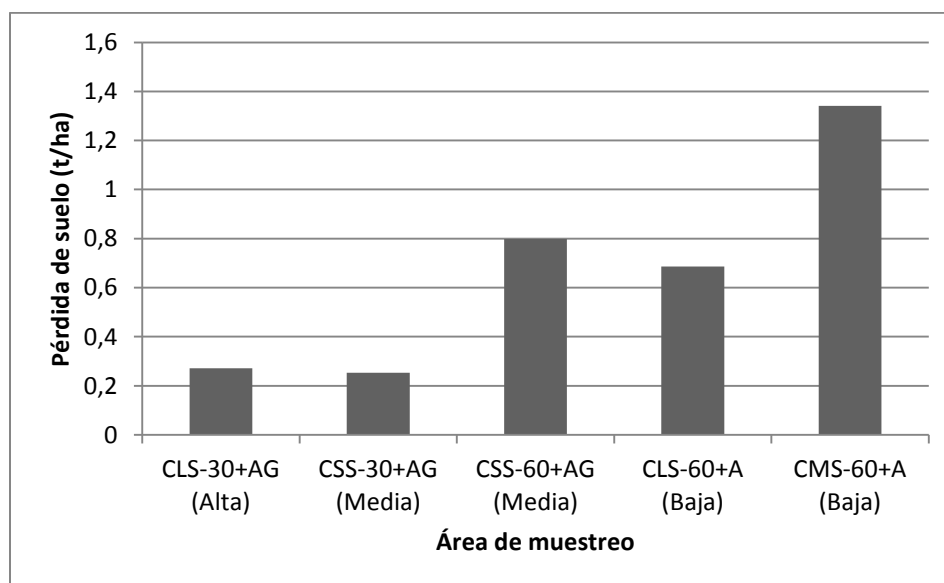


Figura 29. Pérdida de suelo total en un periodo de 11 semanas comprendido desde el 27 de setiembre hasta el 13 de diciembre del 2013, en cinco áreas de muestreo en plantaciones de café ubicadas en la cuenca del Río Jesús María, en el distrito de San Rafael de San Ramón de Alajuela.

La tasa total de pérdida de suelo en las 22 semanas de evaluación presentó el mismo comportamiento que el primer período de evaluación, la mayor tasa de erosión laminar se encontró en las áreas sin gavetas de recolección y con mayores pendientes (Figura 30). El

área de muestreo con mayor tasa de erosión laminar es CMS-60+A, debido a su alta pendiente y obras de conservación insuficientes (Figuras 30, 31 y 32).

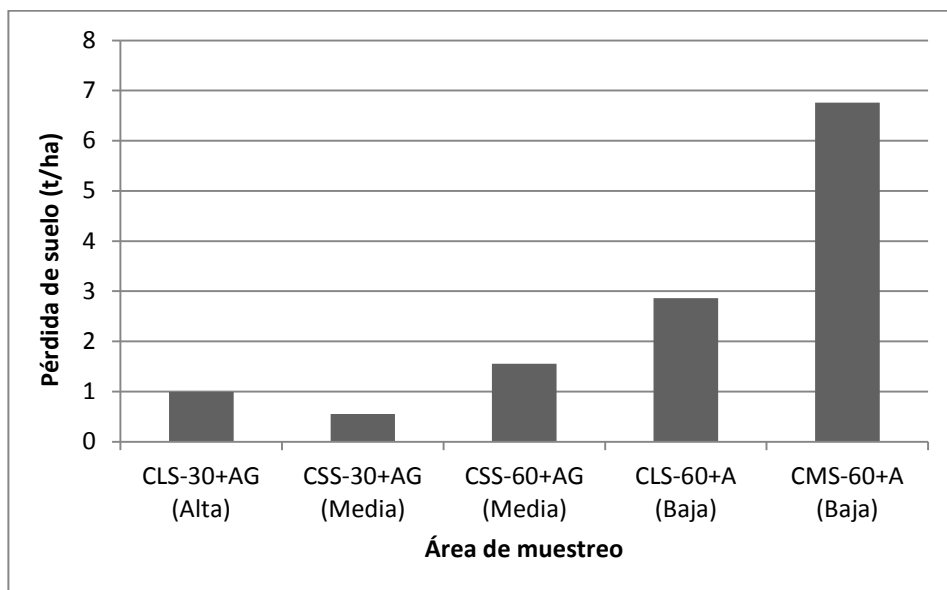


Figura 30. Pérdida de suelo total en un periodo de 22 semanas comprendido desde el 19 de julio hasta el 13 de diciembre del 2013, en cinco áreas de muestreo en plantaciones de café ubicadas en la cuenca del Río Jesús María, en el distrito de San Rafael de San Ramón de Alajuela.



Figura 31. Fotografía del geotextil de recolección en el área de muestreo CMS-60+A, tomada en setiembre del 2013.

La Figura 32 muestra cómo las obras de conservación en esta área de muestreo colapsaron de tal forma que el agua de escorrentía sobrepasó el nivel de la acequia de ladera, lo que lleva a considerar un rediseño de estas obras, mediante el aumento de su cauce e incluyendo gavetas de recolección y barreras de vivas. Este fenómeno es el mismo que ocurre en algunos ríos que acarrear grandes cantidades de agua y sedimento, el cual este último se deposita en el fondo del río, disminuyendo su cauce, lo que provoca un desborde del mismo, inundando las áreas aledañas.



Figura 32. Fotografía de la acequia de ladera colapsada en el área de muestreo CMS-60+A, tomada en setiembre del 2013.

A pesar de todas estas comparaciones, es importante notar que la mayor tasa total de erosión laminar no supera las 7 t/ha (Figura 30), catalogándose esta como tolerable según la clasificación de Jeffery et al. (1994) citado por Núñez (2001).

Como ya se había mencionado anteriormente, existen valores de erosión máxima tolerables (T) para que un suelo no se vuelva improductivo. Teóricamente estos valores pueden disminuir si se calibran para zonas donde la erosión tiende a ser mayor, como el trópico. Brady y Weil (2008) mencionan que para suelos infértiles, impermeables y rocosos, estos valores T deben de ser menores (5 t/ha/año o menos dependiendo del

nivel de degradación), ya que naturalmente son suelos degradados en donde no se debería permitir más erosión.

Cuando los suelos poseen un notorio proceso de degradación como los entisoles de las fincas en estudio y presentan poco desarrollo de estructura, existe un problema adicional a la pérdida de nutrimentos, materia orgánica y productividad, y es el hecho de que los suelos que gradualmente se erosionan, pierden poco a poco el horizonte A, dejando expuesto el horizonte C o la roca, que son horizontes más impermeables y favorecen la escorrentía y el escaso almacenaje de agua (Ramírez 2009). Cuando un suelo pierde esta facultad, el acceso al agua por parte de la vegetación puede limitarse, si esta no crece, provoca un efecto de bola de nieve donde al suelo al estar desnudo e impermeable, sigue favoreciendo la escorrentía y la carencia de vegetación, proceso que podría desertificar la zona. Potencialmente este fenómeno podría ocurrir en la realidad de la cuenca del río Jesús María, pero requeriría de más años de degradación de suelo. Aunque no se tengan datos de infiltración, la conductividad hidráulica en los horizontes superficiales fue muy alta, haciendo que el suelo tenga capacidad suficiente para que el agua se mueva cuando esta se encuentra saturada, sin embargo no es el mismo caso para los horizontes más profundos que presentaron conductividades hidráulicas nulas, en especial la finca Parte Media (Figura 28).

La tasa de erosión laminar en las 22 semanas de evaluación (Figura 30) fue mayor en el área de muestro con mayor concurrencia de sombra (CMS-60+A), si se compara con el área continua (CLS-60+A), la cual fue un área con menor concurrencia de sombra. Esto contradice a lo encontrado por la literatura, donde se ha mencionado que la utilización de sombra aumenta la cobertura muerta del suelo, protegiéndolo de la erosión, además de otros beneficios al suelo como aporte de nitrógeno cuando la sombra la proveen árboles fijadores de nitrógeno (Ramírez 2009). En muchas ocasiones este fenómeno ocurre, sin embargo no es una verdad absoluta y depende en gran medida de los árboles utilizados como sombra. Brady y Weil (2008) advierten que el impacto directo de las gotas de lluvia con el suelo puede ser más perjudicial en términos de erosión que la misma velocidad de escorrentía y que los esfuerzos para evitar la pérdida de suelo deben enfocarse no sólo en

disminuir esta velocidad sino también a proteger el suelo desnudo. Así mismo mencionan que en las condiciones de bosque, es la cobertura rastrera la que protege al suelo de la erosión y no el dosel de los árboles o las raíces de los mismos. Esto contrasta con lo mencionado por Ramírez (2009), quien da importancia especial a los sistemas de caficultura forestal, pero no para disminuir la velocidad del agua de escorrentía sino para contribuir por medio de las grandes raíces pivotantes de los árboles, al amarre del suelo, disminuir las aguas internas y prevenir los derrumbes y deslizamientos. Por otro lado, la utilización de árboles muy altos, puede ser contraproducente para la mitigación de la erosión debido a que en el momento en que el agua de lluvia impacta con la copa de los árboles, las gotas de agua se agregan y crecen en volumen y al haber mucha altura, la velocidad terminal de la gota aumenta y golpea el suelo con mayor energía que inclusive las lluvias más intensas, creando mayores pérdidas laminares de suelo (Brady y Weil 2008). Así mismo se ha recomendado que para el cultivo de café, la sombra se debe mantener lo más bajo posible de manera que el agricultor pueda manejarla con facilidad, además de que se evitan las goteras que aumentan la erosión y favorecen la incidencia del ojo de gallo (*Mycena citricolor*) (OIRSA 2001) la cual podría ser de aproximadamente 2 metros por encima del promedio de la altura del cafetal.

5.3.2 Estimación de la erosión por la medición de surcos y cárcavas en la finca Parte Media

A pesar de que la erosión laminar encontrada se clasificó como tolerable, las observaciones de campo que se muestran en la Figura 33 evidencian eventos catastróficos como microdeslizamientos y coluviones en varias partes de las áreas de estudio. Estos eventos son considerados dentro de otro tipo de erosión hídrica distinta a la erosión laminar, la cual no fue contemplada en los objetivos de este proyecto. Debido a estas evidencias cualitativas y a la observación de múltiples cárcavas y microdeslizamientos, se propuso incluir otra metodología adicional que contemplara los movimientos de suelo más abruptos en dichas localidades por la cual se realizó la medición de surcos y cárcavas.



Figura 33. Fotografías de microdeslizamientos en distintas partes del área en estudio. A: Dentro de los caminos de la finca Parte Media, B: Dentro de la finca Parte Alta, C y D: Al borde de la carretera de la finca Parte Alta.

Los resultados de la medición de surcos y cárcavas dentro de la finca Parte Media, presentaron otra perspectiva distinta a los resultados encontrados en la metodología con el geotextil “Silt Fence”. En el Cuadro 21 se observa que la finca Parte Media hubo tres grandes cárcavas (Figuras 35 y 37), en especial la cárcava Costado Sur, la cual tuvo una medida de 95 m^3 equivalente a 69,7 toneladas, y se formó en una sola noche, haciendo que se pueda clasificar como erosión por remoción en masa. En total, sumando las medidas de las tres cárcavas, la finca Parte Media que tiene un área de 3,5 ha presentó una pérdida de suelo total de 81,8 t (23,4 t/ha), catalogándose como moderada. Esto contrasta en gran medida con lo encontrado en los resultados de la Figura 30, donde las dos áreas de muestreo (CSS-30+AG y CSS-60+AG) pertenecientes a esta finca Parte Media suman un total que no sobrepasa las 3 t/ha.

Cuadro 21. Pérdida de suelo registrada en tres cárcavas en la finca Parte Media estimada por medio de la metodología de la medición de surcos y cárcavas.

Nombre de Cárcava	Volumen (m³)	Densidad Aparente (g/cm³)	Masa (t)
Costado Norte	10,2	0,73	7,4
Costado Oeste	6,5	0,73	4,7
Costado Sur	95,4	0,73	69,7

Nota: La finca Parte Media tiene un área de 3,5 ha. Al sumar la pérdida de suelo de las 3 cárcavas en esta finca, se encontró una pérdida total de 81,8 t, equivalente a 23,4 t/ha.

En el Anexo 2 aparecen las mediciones de cada cárcava y los cálculos respectivos para estimar la pérdida de suelo en cada una de ellas.

Esta diferencia en las tasas de erosión se debe principalmente al modo en que ocurre el transporte de sedimentos, la erosión hídrica laminar ocurre cuando el agua de escorrentía superficial acarrea las partículas más grandes de suelo y las deposita en zonas bajas. Este tipo de erosión depende en gran medida de la velocidad de escorrentía que no fue medida, y en las características físicas de las capas más superficiales. Un Entisol como la finca Parte Media que posee poca cantidad de partículas de arenas y limos en su horizonte más superficial (Ap), acarreará en su mayoría partículas más finas como arcillas, pero estas son más difíciles de desprender por el agua de escorrentía debido a su naturaleza cohesiva. Como contraejemplo, en un suelo más franco como resultó ser la finca parte Baja sería más fácil para el agua de escorrentía acarrear sedimento. Aunque la erosión por surcos y cárcavas también depende en gran medida del agua de escorrentía ya que ocurre por el paso sucesivo del agua en los caminos irregulares del terreno, esta también se ve afectada por características y movimientos del subsuelo que conllevan a microdeslizamientos como los de las Figura 33. La finca Parte Media (Cuadros 14 y 15) presenta en los horizontes superficiales (Ap y C₁) una conductividad hidráulica baja, mientras que en los más profundos (Ab y C₂) es nula lo que indica que cuando el suelo está saturado con agua, se mueve rápido superficialmente y luego no se mueve en los horizontes más profundos. Según Brady y Weil (2008) el subsuelo posee una capa

denominada zona vadosa (Figura 34), la cual se caracteriza a diferencia de la tabla de agua por no estar saturada con agua, pero dependiendo de la precipitación y el contenido de humedad del suelo, esta se puede saturar provocando un desplazamiento del agua subterránea hacia los afluentes cercanos cuando se encuentra en condiciones de pendiente.

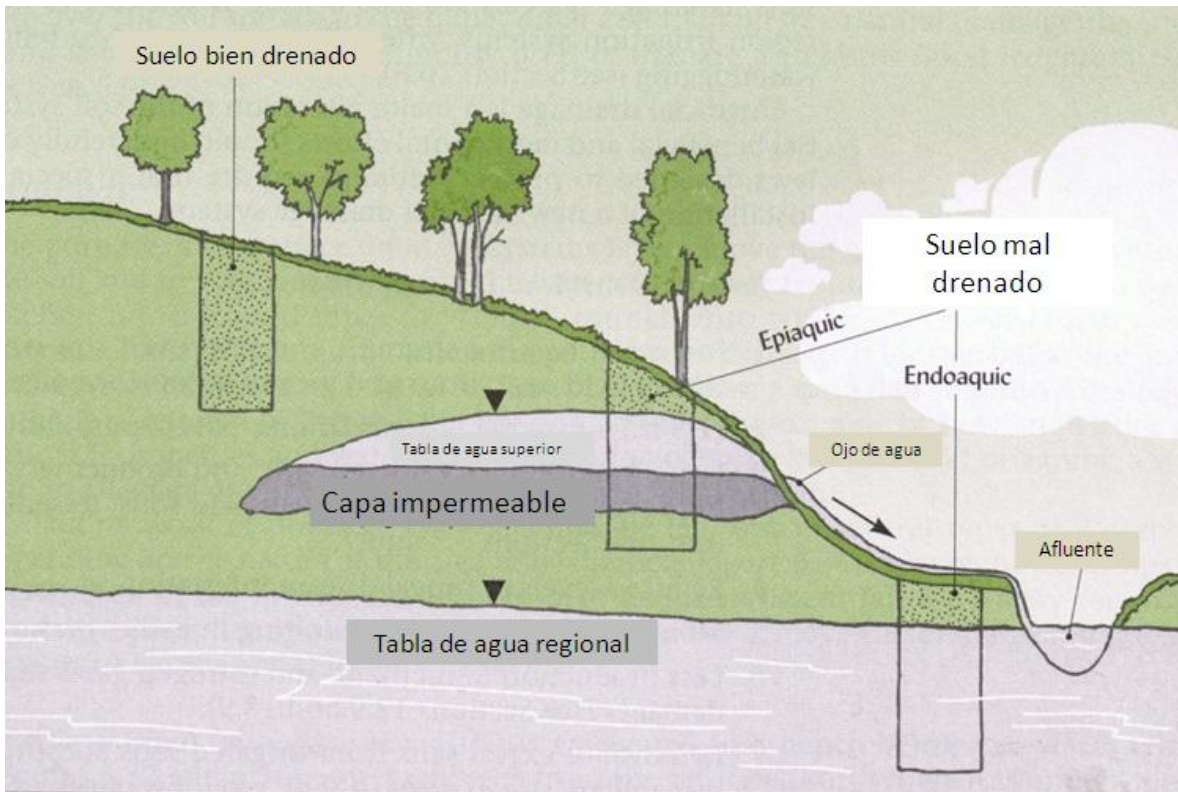


Figura 34. Dibujo donde se explica el ordenamiento del suelo y el subsuelo y el movimiento del agua subterránea. La zona vadosa se encuentra por encima de la tabla de agua superior.
Fuente: Modificado de Brady y Weil (2008).

Los horizontes con conductividad hidráulica muy baja o nula pueden ser parte de esta zona vadosa. Si esta zona se encuentra impidiendo el movimiento de agua subterránea cuando está saturada y debido a la topografía se expone a la superficie por la presencia de cárcavas, puede ocasionarse un movimiento en masa de suelo provocando microdeslizamientos como la cárcava Costa Sur de la Figura 35. Según Ramírez (2009), este tipo de erosión ocurre cuando el suelo tiene una excesiva capacidad de infiltración que por acción de la gravedad crean los deslizamientos. Aunque no se tengan datos de

infiltración, la alta conductividad hidráulica superficial que tuvo este suelo en sus horizontes más superficiales, comparada con los horizontes más profundos (0 cm/h) puede estar causando un tipo de escorrentía en los horizontes pertenecientes a la zona vadosa.



Figura 35. Fotografías de la cárcava Costado Sur ubicada en la finca Parte Media. A: Vista en contra de la pendiente, B: Vista del costado de la pendiente, C: Vista a favor de la pendiente.

Los problemas agrícolas provocados por la erosión por remoción en masa tan devastadora y abrupta no son fáciles de controlar o disminuir, poco puede hacer un caficultor establecido desde el punto de vista de manejo para evitar que ocurran deslizamientos en sus fincas. Probablemente la solución más prudente y dado que estas tierras son Clase VII, es que estas zonas de la finca con pendientes de 60%, sean completamente reforestadas, inclusive cuando esto afecte la realidad del agricultor, puesto que si no se hace, la cárcava puede seguir creciendo y se corre el riesgo de seguir perdiendo suelo de forma masiva. Este tipo de erosión por remoción en masa se puede también ver afectada por una deficiente planeación de las obras civiles de la zona (Figura 36).



Figura 36. Fotografía de la carretera que colinda con finca Parte Media, donde se observan obras viales deficientes que pueden estar afectando el proceso erosivo en la zona.

La erosión por remoción en masa en esta zona lleva a concretar ciertos desafíos en cuanto a la construcción de carreteras. Si bien es cierto no compete a esta investigación la adecuada construcción de obras viales ni las bases científicas para comprobarlo, es un tema de interés público del cual las autoridades regionales deben estar al tanto, ya que afecta no solo a caficultores, sino también a transportistas, estudiantes, turistas, ciudadanos e inclusive los puertos de las zonas bajas. Cuando se construyen caminos o se talan los bosques, las raíces pivotantes de los árboles usualmente se pudren lentamente, una vez que estas mueren se pierden por efecto de la pendiente y pueden llegar a formar cárcavas como la Costado Sur, por esta razón se debe prestar atención a la forma en que se maneja de la tala de bosques en zonas con altas pendientes. Chaplot (2013) insiste en que la erosión subterránea o sub-superficial es un problema que ha sido pasado por alto, ya que muchos de los esfuerzos han ido en controlar las aguas de escorrentía y el escurrimiento, cuando por debajo del suelo, los drenajes artificiales también pueden erosionarse, haciendo que se bloqueen y pierdan estabilidad, incrementando la presión dentro de estos, que al liberarse crean los deslizamientos o movimientos en masa.



Figura 37. Fotografías de la cárcava Costado Norte (A) y Costado Oeste (B) ubicadas en la finca Parte Media.

Ramírez (2009) menciona algunas medidas que se pueden tomar para corregir el problema de cárcavas:

1. Controlar la erosión de la cabecera de la cárcava mediante:
 - a) Desviación de la escorrentía por el canal guardia.
 - b) Reformación del talud con inclinación de 25%
 - c) Establecimiento de una capa de césped sobre el talud
2. Formación de una barrera viva mediante:
 - a) Establecimiento de un muro de césped con estacas
 - b) Colocación de una capa de rastrojo en la parte superior del muro para taparlo con tierra
 - c) Siembra de semilla de pasto o transplantes de una franja de césped.

Algunas de las medidas que se tomaron para remediar la cárcava Costado Sur se presentan en las Figuras 38, 39 y 40, donde se tomó plástico y el mismo geotextil T2100 sobrante del proyecto y se utilizó para cubrir los taludes de las acequias de ladera. Así

mismo, se plantaron especies de caña india (*Dracaena* spp.) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en el talud inferior y en el relleno de la cárcava, respectivamente.



Figura 38. Fotografía de los taludes de la acequia de ladera en la cárcava Costado Sur, ubicada en la finca Parte Media, cubiertos por plástico y geotextil T2100 y sembrados con caña india (*Dracaena* spp.).



Figura 39. Fotografía del relleno de la cárcava Costado Sur, ubicada en la finca Parte Media luego de ser remediada con prácticas de conservación.

Por otro lado, en otros sectores críticos de la finca Parte Media donde la acequia de ladera sufre problemas de remociones en masa, se implementó la utilización de vetiver (*Vetiveria zizanoides*) como barrera viva en el talud superior.



Figura 40. Fotografía de barreras vivas de vetiver (*Vetiveria zizanoides*) sembradas en el talud superior de las acequias de ladera en la finca Parte Media.

3- Para casos extremos se deben de realizar trabajos de construcción de muros de contención, reforestación y drenajes específicos como por ejemplo las obras civiles mostradas en la Figura 41.



Figura 41. Fotografía de los drenajes en Rincón de Mora realizados en la carretera que conecta San Ramón Centro con Llano Brenes.

5.4 Pérdida total de nutrimentos y materia orgánica

El Cuadro 22 muestra el comportamiento del proceso erosivo en cuanto al tamaño de la partícula desprendida. En todas las áreas de muestreo se observó un comportamiento general: tanto las arenas y los limos disminuyeron su porcentaje del primer periodo al segundo periodo, lo cual significa que primero se lavaron estas partículas y posteriormente las arcillas, esto concuerda con lo encontrado por Castillo (2012), donde en general, se encontró más cantidad de arcilla en el sedimento recolectado en las evaluaciones finales, indicando que estas partículas se perdieron después de haberse perdido otras de mayor tamaño como las arenas o los limos. Esto se confirma también al observar el comportamiento contrario en el caso de las arcillas, donde el primer periodo de evaluación se encontró un porcentaje menor de arcillas con respecto al segundo periodo.

Cuadro 22. Comparación del tamaño de partícula del sedimento depositado en las microparcelas de erosión en diferentes áreas de muestreo, en dos períodos de evaluación. Período I: del 19 de julio al 27 de setiembre, período II: del 27 de setiembre al 13 de diciembre.

Área de muestreo/Periodo	%							
	Arena		Limo		Arcilla		Clase Textural	
	I	II	I	II	I	II	I	II
CLS-30+AG (Alta)	51 (7)	48 (6)	32 (5)	27 (5)	16 (1)	24 (2)	Franco	Franco arcillo arenoso
CSS-30+AG (Media)	63 (6)	54 (8)	26 (3)	24 (4)	11 (4)	22 (3)	Franco arenoso	Franco arcillo arenoso
CSS-60+AG (Media)	54 (3)	53 (3)	31 (1)	24 (2)	15 (3)	23 (3)	Franco arenoso	Franco arcillo arenoso
CLS-60+A (Baja)	55 (10)	56 (7)	30 (7)	23 (4)	14 (4)	21 (3)	Franco arenoso	Franco arcillo arenoso
CMS-60+A (Baja)	59 (4)	62 (8)	31 (1)	21 (5)	10 (3)	17 (2)	Franco arenoso	Franco arenoso

Nota: Los valores reportados corresponden al promedio de los porcentajes de cada partícula (\pm desviación estándar) en el sedimento recolectado en las tres microparcelas de cada área de muestreo. Ver el Anexo 6A donde aparecen los análisis de textura de todas las microparcelas de erosión.

Fuente: Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica 2013.

En los Cuadros 23 y 24 se observan los análisis químicos de los sedimentos recolectados en todas las áreas de muestreo tanto en el primer como en el segundo periodo de evaluación, respectivamente.

El primer período de evaluación tiene como característica principal la gran cantidad de calcio, magnesio y potasio que se encuentran en el sedimento, observándose además que estos exceden los niveles críticos, esto también se confirma con los altos valores del CICE. Así mismo sucede con el fósforo, el cual aparece en el análisis como un elemento que está presenta en cantidades suficientes para satisfacer los requerimientos de la planta. La única excepción es el porcentaje de materia orgánica que se encuentra en niveles relativamente bajos en todas las áreas de muestreo.

Cuadro 23. Análisis químico completo del sedimento recolectado en el primer período de evaluación (del 19 de julio al 27 de setiembre del 2013) en todas las áreas de muestreo evaluadas.

Área de muestreo	pH	Acidez	cmol(+)/L					mg/L					%		M.O.	C/N
			Ca	Mg	K	CICE	%SA	P	Zn	Mn	Cu	Fe	N	C		
Nivel Crítico	5,5	0,5	4	1	0,2	5	10	10	3	5	1	10	-	-	5	-
CLS-30+AG	4,3 (0,06)	4,6 (2)	13,47 (6)	5,17 (2)	1,12 (0,14)	24,32 (9)	18,46 (1)	23,7 (13)	5,9 (0,46)	120,3 (25)	4,7 (1,15)	75,7 (32)	0,2 (0,34)	0,6 (0,21)	1,0 (0,03)	2,9 (1)
CSS-30+AG	4,6 (0,20)	2,5 (0,63)	11,83 (2)	4,27 (0,45)	1,36 (0,18)	19,95 (2,8)	12,62 (3,7)	19,0 (2)	2,6 (0,56)	160,3 (46)	2,3 (1,53)	68 (14)	0,18 (0,17)	0,8 (0,10)	1,31 (0,03)	4,2 (0,75)
CSS-60+AG	4,3 (0,06)	5,2 (3)	10,93 (1)	4,47 (1)	1,14 (0,23)	21,71 (4)	22,61 (9,8)	12,0 (6)	2,1 (0,44)	149,3 (6)	2,0 (1)	42,3 (11)	0,2 (0,17)	0,5 (0,12)	0,8 (0,03)	2,5 (0,97)
CLS-60+A	4,6 (0,12)	1,2 (0,78)	13,5 (1,3)	3,83 (0,2)	1,05 (0,17)	19,63 (1,6)	5,95 (4)	11,0 (1)	2,2 (0,51)	51,7 (16)	2,7 (0,58)	28,7 (3)	0,2 (0,00)	0,3 (0,00)	0,6 (0,03)	1,6 (0,19)
CMS-60+A	4,7 (0,20)	0,8 (0,58)	18,50 (2)	5,67 (0,8)	0,88 (0,31)	25,83 (3,51)	2,92 (1,85)	6,7 (1,53)	2,4 (0,49)	40,0 (11)	1,0 (0,00)	18,3 (2,5)	0,2 (0,17)	0,5 (0,12)	0,8 (0,01)	2,8 (0,71)

Nota: Los valores reportados corresponden al promedio de los análisis químicos (\pm desviación estándar) del sedimento recolectado en las tres microparcels de cada área de muestreo. Ver el Anexo 6B donde aparecen los análisis químicos de todas las microparcels de erosión en el primer periodo.

Fuente: Laboratorio de suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) 2014.

El cuadro 24 muestra valores similares a los del primer período, en donde todas las bases se encuentran en gran cantidad, sobrepasando los niveles críticos, así mismo con el fósforo. A diferencia del primer período, el calcio en el segundo período se encuentra en menor cantidad en casi todas las áreas de muestreo, mientras que el fósforo y el porcentaje de materia orgánica son el caso contrario, se encuentran en mayor cantidad en el segundo período para todas las áreas de muestreo, debido posiblemente a la fertilización del café previo a la fructificación para obtener un mayor rendimiento en cosecha.

Cuadro 24. Análisis químico completo del sedimento recolectado en el segundo período de evaluación (del 27 de setiembre al 19 de diciembre del 2013) en todas las áreas de muestreo evaluadas.

Área de muestreo	pH	cmol(+)/L					mg/L					M.O.	
		Acidez	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Mn	Cu		Fe
Nivel Crítico	5,5	0,5	4	1	0,2	5	10	10	3	5	1	10	5
CLS-30+AG	4,5 (0,2)	3,6 (1,9)	9,73 (3,9)	5,13 (2,5)	1,31 (0,9)	19,8 (6)	19,6 (12)	30,7 (19)	9,1 (2)	81,0 (21)	4,7 (1,5)	73,3 (31)	2,6 (0,5)
CSS-30+AG	4,4 (0,2)	2,2 (1,6)	8,1 (1,1)	4,3 (0,9)	1,2 (0,1)	15,8 (2)	13,9 (9)	33,7 (7)	9,8 (3)	98,7 (25)	3,7 (1,2)	94,0 (32)	3,2 (0,2)
CSS-60+AG	4,4 (0,0)	3,5 (1,1)	9,23 (2,1)	4,07 (0,4)	1,15 (0,1)	17,9 (3)	19,3 (5)	29,7 (8)	6,4 (3)	62,7 (17)	4,0 (1)	72,0 (9,5)	3,2 (0,3)
CLS-60+A	5,1 (0,3)	0,6 (0,7)	16,3 (5,9)	5,3 (2,6)	0,9 (0,2)	23,1 (9)	2,3 (2)	16,7 (5)	3,6 (3)	15,7 (7,1)	3,7 (0,6)	26,7 (4,7)	2,8 (0,6)
CMS-60+A	4,7 (0,2)	1,3 (1)	13,20 (4,4)	4,00 (0,9)	1,21 (0,2)	19,7 (6)	5,7 (4)	20,3 (1,5)	3,2 (0,6)	38,7 (0,6)	4,0 (1)	40,3 (4,7)	2,8 (0,7)

Nota: Los valores reportados corresponden al promedio de los análisis químicos (\pm desviación estándar) del sedimento recolectado en las tres microparcels de cada área de muestreo. Ver el Anexo 6C donde aparecen los análisis químicos de todas las microparcels de erosión en el segundo periodo.

Fuente: Laboratorio de suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) 2014.

Debido a que las bases y el fósforo están dados en los análisis en términos de volumen (cmol+)/L y mg/L) fue necesario determinar la densidad aparente del sedimento recolectado en cada microparcels, las cuales aparecen promediadas en el Cuadro 25.

Cuadro 25. Promedio de densidad aparente del suelo recolectado en cada microparcels medido en la copa de 2,5 ml.

Tratamiento	Densidad (g/cm ³)		
	Repetición		
	1	2	3
CLS-30+AG (Alta)	0,85	0,81	0,85
CSS-30+AG (Media)	0,79	0,77	0,90
CSS-60+AG (Media)	0,86	0,88	0,86
CLS-60+A (Baja)	0,95	0,83	0,96
CMS-60+A (Baja)	0,93	0,93	0,96

Fuente: Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica 2013.

Las Figuras 42, 44, 45, 46 y 47 muestran un patrón común en cuanto a la pérdida de calcio, magnesio, potasio, fósforo y materia orgánica, respectivamente, en donde todos estos se perdieron más en el primer período de evaluación, con respecto al segundo periodo. Esto se puede deber a que la pérdida de suelo fue mayor en el primer período que en el segundo, haciendo que la pérdida de nutrientes sea mayor también.

El calcio y magnesio son de los elementos más importantes para el crecimiento del café y las plantas en general, cumplen funciones estructurales y fisiológicas en los tejidos de las hojas para el proceso de fotosíntesis, lo que contribuye a la prevención de diferentes enfermedades que ingresan por este medio. Así mismo, las enmiendas con estos elementos son utilizadas para corregir los suelos ácidos. El potasio por otro lado, es un elemento importante en el balance osmótico y transporte de nutrimentos dentro de la planta, por lo que también es importante para el llenado de fruto con azúcares.

Tanto el calcio como el magnesio y el potasio se perdieron más en las áreas de muestreo que presentaron mayor pérdida de suelo, como lo fue el CMS-60+A y CLS-60+A, dado a sus altas pendiente y que posiblemente sus obras de conservación no soportaron los niveles de precipitación y escorrentía. La pérdida total de calcio osciló entre los 1,5 y 25 kg/ha, el magnesio entre los 0,3 y 5 kg/ha y el potasio se mantuvo entre los 0,3 y 2 kg/ha.

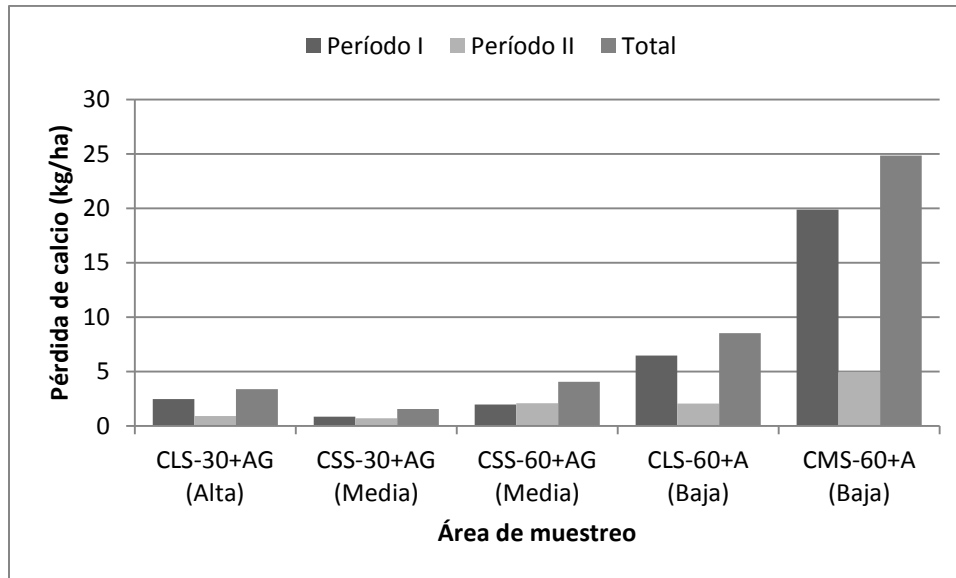


Figura 42. Pérdida del elemento calcio en distintas áreas de muestreo en dos períodos de evaluación y total. Período I: del 19 de julio al 27 de setiembre del 2013, período II: del 27 de setiembre al 19 de diciembre del 2013.

Según Brady y Weil (2008), naturalmente la erosión siempre provocará un detrimento en la productividad natural del suelo debido a la pérdida de fertilidad, sin embargo, esta pérdida es más impactante en suelo con poca profundidad (Figura 43). Los suelos profundos que pueden tolerar cierta tasa de erosión, pueden de igual forma seguir siendo productivos mientras se hagan las enmiendas de fertilización necesarias al suelo, incluso estos, pese a la pérdida de suelo pueden aumentar su productividad. Un suelo poco profundo con el horizonte C muy expuesto, perderá productividad exponencialmente, y las enmiendas con fertilizantes harán poco para resolver el problema. Debido a esto, las soluciones para mejorar un poco la pérdida de nutrientes por erosión debe ser enfocado en mitigar estas pérdidas y no en soluciones de corto plazo como enmiendas químicas.

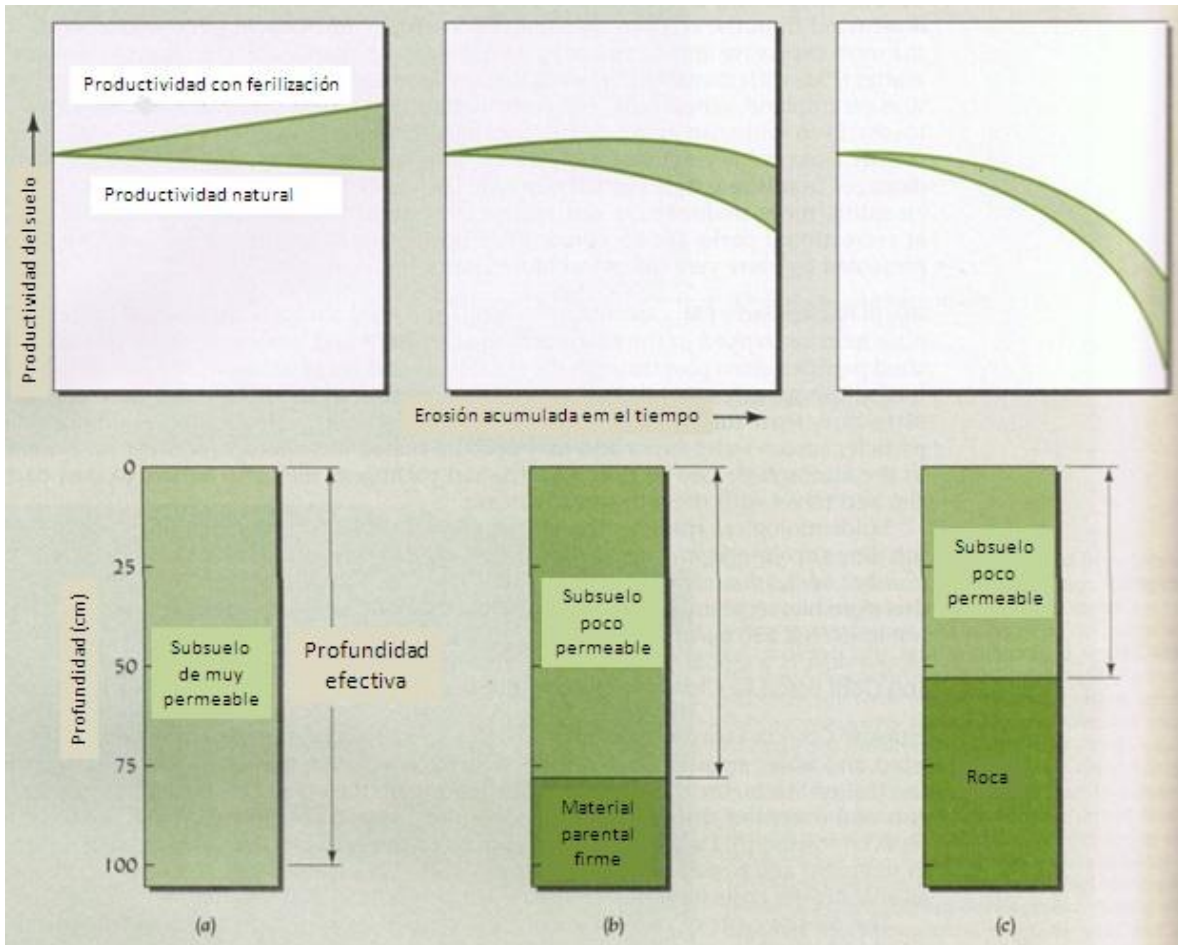


Figura 43. Diagramas donde se explica la tolerancia de suelos a mantener su productividad después de eventos erosivos. (a): Suelo profundo con moderada a rápida permeabilidad, el cual después de pasar por eventos erosivos puede ser productivo con enmiendas químicas, (c): Suelo poco profundo con lenta permeabilidad, el cual después de pasar por eventos erosivos no recupera su productividad, aún con enmiendas químicas. (b): Intermedio entre la situación a y c. Fuente: Modificado de Brady y Weil (2008).

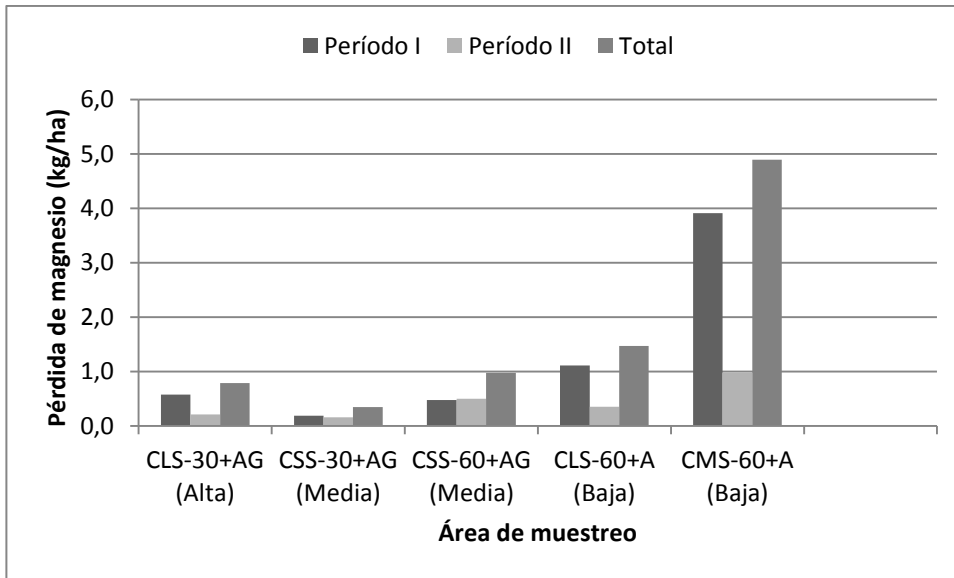


Figura 44. Pérdida del elemento magnesio en distintas áreas de muestreo en dos períodos de evaluación y total. Período I: del 19 de julio al 27 de setiembre del 2013, período II: del 27 de setiembre al 19 de diciembre del 2013.

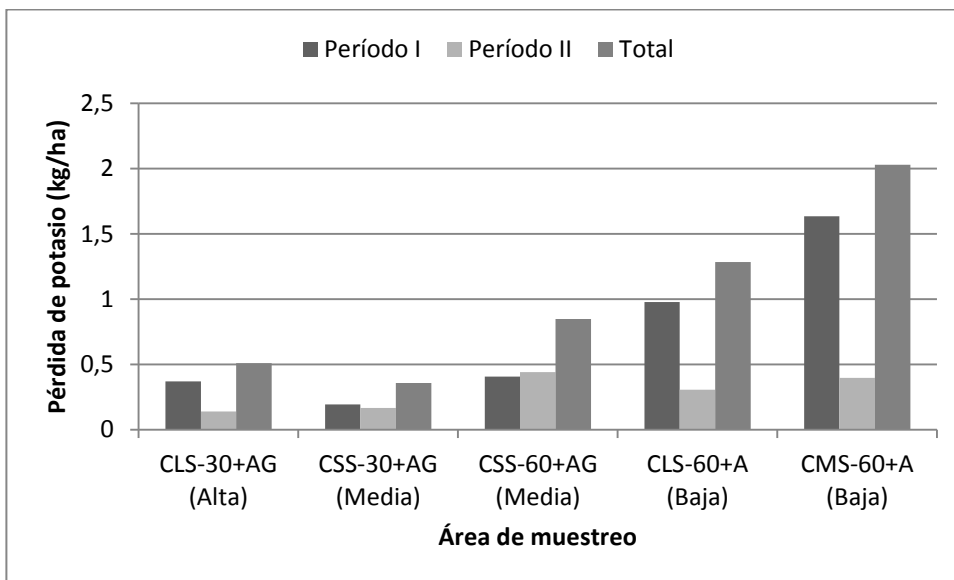


Figura 45. Pérdida del elemento potasio en distintas áreas de muestreo en dos períodos de evaluación y total. Período I: del 19 de julio al 27 de setiembre del 2013, período II: del 27 de setiembre al 19 de diciembre del 2013.

El fósforo fue el elemento que menos se perdió en las microparcels, el cual no llegó a 1 kg/ha (Figura 46), esto se debió principalmente sus bajos contenidos originales en el suelo. El fósforo es un elemento de suma importancia para el desarrollo radical y

para el desarrollo de semillas dentro del fruto ya que estas almacenan energía en forma de lípidos, las cuales se constituyen de fósforo. Aunque normalmente las plantas no absorben grandes cantidades de este elemento, se le considera un elemento mayor debido a su alta fijación en el suelo que lo vuelve inaccesible a la raíz.

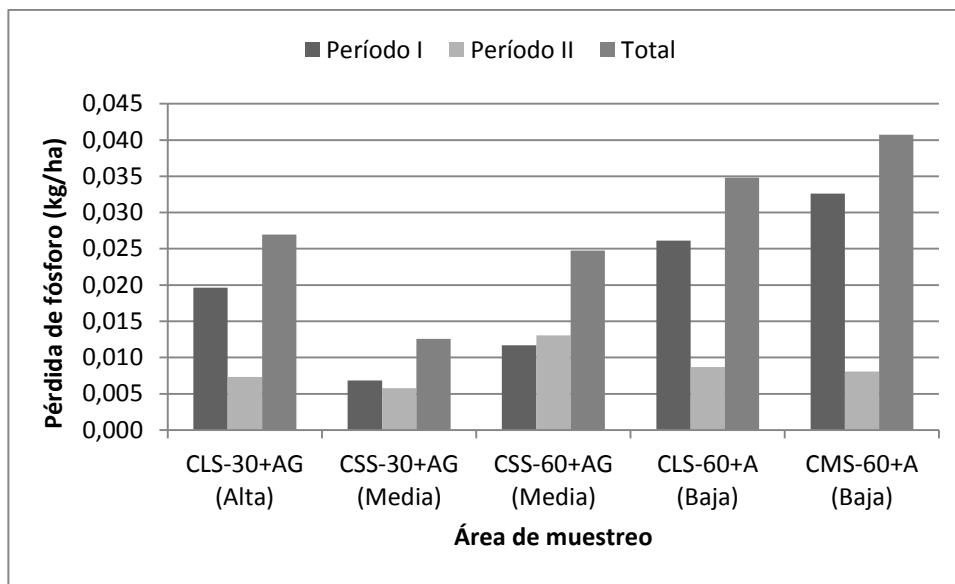


Figura 46. Pérdida del elemento fósforo en distintas áreas de muestreo en dos períodos de evaluación y total. Período I: del 19 de julio al 27 de setiembre del 2013, período II: del 27 de setiembre al 19 de diciembre del 2013.

Probablemente la materia orgánica es el componente del suelo que pasa más desapercibido en cuanto a importancia para el desarrollo de las plantas y es precisamente el componente que más se agotó dentro de la microparcela (Figura 47), el cual estuvo entre 12 y 80 kg/ha. La materia orgánica es fundamental para la formación del suelo, si esta se pierde, se interrumpe el reciclaje natural del carbono, dejando a los microorganismos sin su fuente principal de energía, y en un suelo sin actividad microbiana y sin materia orgánica difícilmente se formará estructura estable.

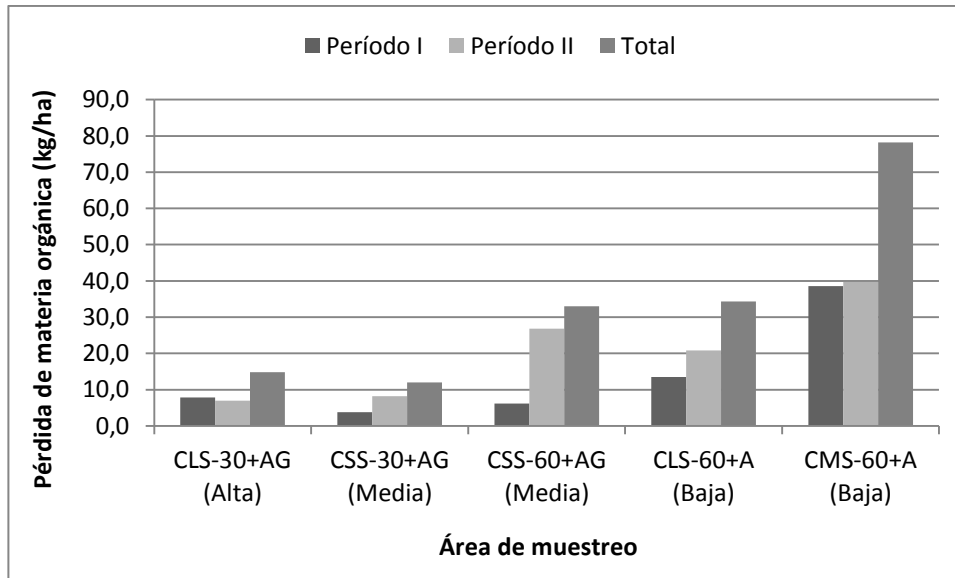


Figura 47. Pérdida de materia orgánica en distintas áreas de muestreo en dos períodos de evaluación y total. Período I: del 19 de julio al 27 de setiembre del 2013, período II: del 27 de setiembre al 19 de diciembre del 2013.

6. CONCLUSIONES

- La actividad cafetalera en la parte alta de la cuenca no es la única responsable de la erosión en la zona pero no contribuye a mitigar el desgaste de la misma.
- Las tres fincas evaluadas (Parte Alta, Parte Media y Parte Baja) son de Clase VII dentro de la clasificación de la capacidad de uso de tierras. Según la metodología oficial para la clasificación de tierras en Costa Rica, estas no son aptas para la actividad cafetalera y solo lo son para actividades de reforestación.
- Las variables que más incrementaron el proceso de erosión laminar fueron: la precipitación, la alta magnitud de pendiente y el diseño de obras de conservación insuficientes para contrarrestar la velocidad de escorrentía.
- Las fincas ubicadas a mayor altitud presentaron áreas de muestreo con menor tasa de erosión laminar.
- La erosión hídrica laminar en todas las áreas de muestreo se clasificó como tolerable-moderada.

- Los episodios de más alta erosión laminar se dieron en el primer período de evaluación (del 19 de julio al 27 de setiembre), período que coincide con las semanas de mayor precipitación.
- Las primeras partículas de suelo en perderse por erosión hídrica laminar fueron las arenas y los limos, luego las arcillas.
- El geotextil “Silt Fence” T2100 mostró capacidad suficiente para retener sedimentos en una microparcela de erosión, haciéndolo un material eficiente y económico para determinar la erosión hídrica laminar pero no así para la erosión por surcos y cárcavas. El material también presentó versatilidad para utilizarse como obra de conservación.
- La tasa de erosión determinada mediante la metodología por medición de surcos y cárcavas en la finca Parte Media se clasificó como moderada-servera.
- La diferencia registrada entre las dos metodologías empleadas en la finca Parte Media (20 t/ha más en la metodología de medición de surcos y cárcavas) evidencia la versatilidad del proceso erosivo el cual puede ocurrir gradual y uniformemente o localizado y de forma abrupta.

7. RECOMENDACIONES

a-) Largo plazo:

- Gestionar un plan de mejora junto con las autoridades de obras civiles regionales para regular una adecuada construcción de calles donde se desvíe adecuadamente la escorrentía descontrolada que afecta las fincas en estado más crítico.
- Se recomienda en la medida de lo posible, comenzar un plan de reforestación en las localidades más críticas de la cuenca, en donde la paga de servicios ambientales se vuelvan rentables para el agricultor por medio de entidades públicas y privadas.
- Dados los valiosos recursos ecológicos, agronómicos, hídricos y edáficos que posee la parte alta de la cuenca, promover la actividad agroturística resulta una alternativa

atractiva de desarrollo comunitario para los agricultores que más estén afectados por la erosión.

b-) Corto y mediano plazo:

- Se recomienda tanto al señor José Joaquín Jiménez Alfaro como al señor Omar Pérez Rodríguez mantener las obras de conservación que poseen pero adicionalmente establecer la siembra de barreras vivas en las áreas de alta pendiente (60%), con especies que se mencionarán en los puntos siguientes. Las especificaciones cambian dependiendo de cada especie, pero las más efectivas son las macollas, las cuales se siembran al tres bolillo o pata de gallo (doble fila) separadas entre plantas por 15 cm y entre filas 20-30 cm, preferiblemente en los inicios de la época lluviosa (abril o mayo), a 20 o 30 cm por encima de la acequia de ladera y a 15 cm de profundidad.
- Se recomienda tanto al señor José Joaquín Jiménez Alfaro como al señor Omar Pérez Rodríguez implementar módulos de “bancos de barreras vivas” con especies como vetiver (*Andropogon muricatus* o *Vetiveria zizanoides*), zacate limón (*Andropogon citratus*), itabo (*Yucca elephantipes*), pasto King Grass (*Pennisetum purpureum*), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), *Dracaena* spp. u otras plantas perennes de crecimiento lento y con raíz fibrosa.
- Se recomienda tanto al señor José Joaquín Jiménez Alfaro como al señor Omar Pérez Rodríguez una racionalización de la aplicación de herbicidas en los meses más erosivos del año, aproximadamente desde principios del mes de agosto hasta mediados del mes de octubre.
- Se recomienda al señor José Joaquín Jiménez Alfaro mantener la siembra de una barrera viva en el talud superior de la cárcava Costado Sur que se encuentra en una condición crítica en cuanto a erosión de suelo y seguir las recomendaciones de Ramírez (2009) mencionadas en la parte de “5. Resultados y Discusión”.
- Se recomienda al señor Omar Pérez Rodríguez rediseñar sus obras de conservación, aumentando la profundidad de las acequias de ladera, procurando que esta tenga

cobertura vegetal como pasto, canutillo o kudzú tropical (*Pueraria phaseoloides*), una gradiente de 0,2-0.8% y cada 100 metros una gaveta de recolección colocada al final de la acequia.

8. BIBLIOGRAFÍA

Andrade O., Rodríguez O. 2002. Evaluación de la eficiencia de barreras vivas como sistemas de conservación de suelo en ladera. *Bioagro* 14 (3): 123-133

Barboza C. 2013. Comunicación Personal. Caracterización de la cuenca del río Jesús María. San José: Agencia de Extensión Agropecuaria del Ministerio de Agricultura y Ganadería de Jesús María, San Mateo.

Bienes R., Moscoso del Prado J., Del Olmo A., Rodríguez C. 1996. Pérdida de suelo por erosión hídrica en un suelo agrícola de la zona centro de España provocada por una tormenta de corta duración. *Ecología* 10: 71-77

Bolaños R., Cubero D., Mojica F., Sancho F., Vargas R., Vázquez A., Watson V. 1991. Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras en Costa Rica. San José: Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Ministerio de Recursos Naturales, Energía y Minas (MIRENEM) p. 31

Brady N., Weil R. 2008. *The Nature and Properties of Soils*. Nueva Jersey: Pearson Education pp. 173-264, 739-791.

Castillo M. 2012. Determinación y Cuantificación de la tasa de erosión en un ciclo del cultivo de papa en la zona de Pacayas de Alvarado, Cartago. Práctica dirigida presentada para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Agronómica. Escuela de Agronomía. Facultad de Ciencias Agroalimentarias. Universidad de Costa Rica pp. 134.

Centro de Investigaciones Agronómica de la Universidad de Costa Rica (CIA). 2014. Datos de análisis textural y de materia orgánica de muestras para la clasificación taxonómica de suelos y del sedimento recolectado en las microparcels.

Cervantes C., Vahrson W. 1992. Características físicas y pérdida de nutrimentos de las parcelas de erosión de Cervatana, Puriscal. *Agronomía Costarricense* 16(1): 99-106

Chaplot V. 2013. Impact of terrain attributes parent material and soil types on gully erosion. *Geomorphology* 186: 1-11.

Chaplot V., Coadou Le Brozec E., Silvera N., Valentin C. 2005. Spatial and temporal assessment of linear erosion in catchments under sloping lands of northern Laos. *Catena* 63: 167-184

Comisión Asesora sobre Degradación de Tierras (CADETI). 2004. Programa de Acción Nacional de lucha contra la degradación de tierras. San José: MINAE/CADETI pp. 111

Cubero D. 1995. Características agroecológicas, uso de las tierra y prácticas de manejo más comunes en Costa Rica. San José: MAG/FAO pp. 7

Cubero D. 1999. Las barreras vivas y su aplicación en la agricultura conservacionista. XI Congreso Nacional Agronómico/III Congreso Nacional de Suelos, Conferencia 67, pp. 10

De Alba S., Alcázar M., Ivón F., Barbero F. 2011. Erosión y manejo de suelo. Importancia de Laboreo ante los procesos erosivos naturales y antrópicos. Agricultura Ecológica en Secano 1(7): 13-38

Forsythe W. 1980. Manual de laboratorio de física de suelos. San José: Instituto Interamericano de Ciencia Agrícolas p. 172

G.F.A. Consulting Group S.A. 2009. Estudio del estado de la producción sostenible y propuesta de mecanismos permanentes para el fomento de la producción sostenible. San José: MAG/PFPAS pp. 417

Gómez F. 2002. Evaluación de la erosión potencial y producción de sedimentos en tres cuencas de Costa Rica. Proyecto de Graduación presentado para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de Costa Rica pp. 132.

Gómez F. 2010. Hydrological, ecophysiological and sediment processes in coffee agroforestry basin: Combining experimental and modelling methods to assess. Tesis presentada para optar por el grado académico de Doctor en Aguas Continentales y Sociedad. Systèmes Intégrés em Biologie, Agronomie, Géosciences. Hydrosiences, Environment (SICAGHE). Centre International D' Études Supérieures em Sciences Agronomiques- Montpellier SUPAGRO. pp. 216.

Gómez R. 2005. Efecto del control de malezas con Paraquat y Glifosato sobre la erosión y pérdida de nutrientes del suelo en cafeto. Agronomía Mesoamericana 16 (1): 77-87

Hatshorn G.S., Villalobos C., Umaña A., Tosi O., Joseph A. J., Stiles G F., Solórzano R., Solera C., Pool D.J., Ocampo R. A. 1982. Costa Rica: Perfil ambiental. Estudio de campo. San José, Costa Rica: Centro Científico Tropical (CCT) pp. 151

Henríquez C., Cabalceta G. 1999. Guía Práctica para el Estudio Introductorio de Los Suelos con un Enfoque Agrícola. San José: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo pp. 65-68.

Herrera L.M. 2013. Acelerada sedimentación obligó a adelantar dragado en Caldera. La Nación, el País. Publicado el 21 de junio.

Hudson N. W. 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y la escorrentía. Roma: FAO pp. 130

Instituto Costarricense de Electricidad. 2013. Datos de precipitación diaria (mm) reportada en la estación Nagaatac N° 80005 desde el mes de julio hasta el mes de diciembre, 2013.

Jiménez J.J. 2013. Comunicación Personal. Caracterización de la fincas Parte Alta y Parte Media. San José: Agricultor propietario de las finca Parte Alta y Parte Media, Llano Brenes, San Rafael, San Ramón de Alajuela.

Le Bissonnais Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* 47: 425-437

Le Bissonnais Y., Arrouays D. 1997. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. *European Journal of Soil Science* 48: 39-48

Le Bissonnais Y., Benkhadra H., Chaplot V., Fox D., King D., Daroussin J. 1998. Crusting runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m² to small catchments. *Soil and Tillage Research* 46: 69-80

Le Bissonnais Y., Blavet D., De Noni G., Laurent J.Y., Asseline J., Chenu C. 2007. Erodibility of Mediterranean vineyard soils: relevant aggregate stability methods and significant soil variables. *European Journal of Soil Science* 58: 188-195

Legout C., Leguédois S., Le Bissonnais Y. 2005. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements. *European Journal of Soil Science* 56: 225-237

Lianes E., Marchamalo M., Roldán M. 2009. Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 33(2): 217-235

Mehuys G., Tiessen K., Villatoro M., Sancho F., Lobb D. 2009. Erosión por labranza con arado de disco en suelos volcánicos de ladera en Costa Rica 33(2): 205-215

Mexichem. 2014. Geotextiles, ficha técnica. Recuperado el 5 de junio de 2014, de: http://www.mexichem.cr/geosinteticos/Tec_GEOTEXTILES_09.pdf

Ministerio de Agricultura y Ganadería, C.R. (MAG). 1998. Ley 7779 Uso, Manejo y Conservación de Suelos. San José, Costa Rica. Recuperado el 16 de junio de 2014, de: <http://www.mag.go.cr/legislacion/1998/ley-7779.pdf>.

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)/Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1996. Agricultura Conservacionista: Un enfoque para producir y conservar. 1996. San José: MAG pp. 90

Mora I. 1987. 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 presentada para optar por el grado académico de Magister Scientiae. Turrialba: CATIE: pp. 104.

Morgan R.P. 1997. Erosión y conservación de suelo. Madrid: Mundi-Prensa pp. 295

Núñez J. 2001. Manejo y conservación de suelos. San José: EUNED pp. 288

Organismo Internacional Regional de la Sanidad Agropecuaria (OIRSA). 2001. Manual técnico de buenas prácticas agrícolas de café orgánico. Costa Rica: Proyecto Regional de Fortalecimiento de la Vigilancia Fitosanitaria en cultivos de exportación no tradicional VIFINEX, con financiamiento de la República de China. pp. 104

Oyarzun C. 1993. Evaluación del modelo U.S.L.E. para predecir pérdidas de suelo en áreas forestadas de la cuenca del río Bío-Bío. Bosque 13 (1) 45-54

Pérez O. 2013. Comunicación Personal. Caracterización de la finca Parte Baja. San José: Agricultor propietario de las finca Parte Baja, Llano Brenes, San Rafael, San Ramón de Alajuela.

Prado R. y Aguilar J. F. 2007. Manual de instalación de barreras con geotextil "Silt Fence" para la medición de la erosión en parcelas experimentales. San José: Proyecto Microcuenca Plantón-Pacayas pp. 20

Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central (PASOLAC). 2005. Manual de métodos sencillos para estimar la erosión hídrica. Managua: PASOLAC pp. 61

Ramírez J. E. 2009. Hacia la caficultura sostenible. San José: ICAFE pp. 39-60, 87-89

Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A. and Porter, J.P. 1991. RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation. Journal of Soil and Water Conservation 46:30-33.

Rey J.A., Veihe A., Quinton J.N., Strauss P., Sancho F.M. 2003. Calibración y evaluación del modelo EUROSEM en América Latina: México, Nicaragua y Costa Rica. *Terra* 21: 41-53

Robichaud P., Brown R. 2002. Silt Fences: an economical technique for measuring hillslope soil erosion. Colorado: United States Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station 24 pp.

Rojas N. 2011. Cuenca río Jesús María. San José: MINAET/IMN/PNUD Costa Rica pp. 18

Santacruz G. 2011. Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo en la cuenca del río Cohacán, Chiapas, México. *Aqua-LAC* 3 (1): 45-54

Secretaría Ejecutiva de Planificación del Sector Agropecuario (SEPSA). Boletín estadístico agropecuario N. 22. San José: SEPSA pp. 185

Somarriba M., Obando M., Beltrán J.A. 2005. Manual de métodos sencillos para estimar la erosión hídrica basado en experiencias nacionales. Managua: UNA-UAP-PASOLAC-CIAT Laderas pp. 17-21

Schoeneberger P., Wysocki D., Benham E., Broderson W. 2002. Field book for describing and sampling soils, Version 2.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center: Lincoln, NE pp. 9

Soil Survey Staff. 2010. Keys for soil taxonomy. Washington D.C.: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service pp.11-145

Solano S., Aguilar J. F., Govaere G. 2010. Estimation of Soil Erosion using USLE equation in Río Pirrís Watershed in Costa Rica. 21st Century Watershed Technology improving water quality and environment conference proceedings, 21-24.

Tapia L. M., Tiscareño M., Salinas R., Velázquez V., Vega P., Guillén A. 2002. Respuesta de la cobertura residual del suelo a la erosión hídrica y la sostenibilidad del suelo en laderas agrícolas. *TERRA Latinoamericana* 20 (4): 449-457

Vahrson W. G. 1990. El potencial erosivo de la lluvia en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 14(1): 15-24

Vargas C. 2003. Historia y políticas nacionales de conservación. Costa Rica: EUNED pp. 176

Vásquez A. 1985. Suelos de Costa Rica. San José: IMN/MINAE

Wischmeier W.H., Smith D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. USDA-SEA: Washington, DC. p.69

9. ANEXOS

ANEXO 1. Características del geotextil “Silt Fence” T2100

- Producto: Geotextil tejido fotodegradable y no biodegradable a base de cintas de polipropileno. Consisten en material textil permeable utilizado para una variedad de funciones, entre ellas, control de la erosión.
- Fabricante: Mexichem, antiguo Amanco.
- Modelo: T2100
- Dimensiones: 3,85 m de ancho y 300 m de largo
- Área: 1115 m²

Propiedades hidráulicas	Norma	Unidad	Valor
Tamaño de abertura aparente	ASTM D4751	mm (Num. Tamiz)	0,300 (50)
Permeabilidad	ASTM D4491	cm/s	1,2x10 ⁻²
Permitividad	ASTM D4491	S ⁻¹	0,66
Tasa de flujo	ASTM D4491	L/min/m ²	2100
Propiedades físicas			
Espesor	ASTM D5199	mm	1
Resistencia UV @ 500	ASTM D4355	%	>70
Ancho	Medido	m	3,85
Largo	Medido	m	300
Área	Calculado	m ²	539

ANEXO 2. Cálculos para la estimación de la erosión de suelo en la finca Parte Media por el método de mediciones de surcos y cárcavas.

- P en volumen = $\Sigma[L * (A_{n-1}+A_n)/2]$
- P en masa = $\Sigma[[L * (A_{n-1}+A_n)/2]*da]$

Donde:

- P en volumen = Erosión de cárcava (m^3)
- P en masa = Erosión de cárcava (t)
- L = Largo de un segmento de la cárcava (m)
- A_n = Área transversal al final de un segmento medido (m^2)
- A_{n-1} = Área transversal al inicio de un segmento medido (m^2)
- da = Densidad aparente (g/cm^3 o t/m^3)

Una vez medida la longitud de la cárcava y separada en segmentos de igual tamaño, así como el ancho y la profundidad de los mismos, se procede a calcular el área de las caras de cada segmento para luego calcular el volumen de estos. El área de cada cara se obtiene multiplicando el ancho del segmento por la profundidad del segmento y dividiendo entre dos ($0,38 m^2$ para el Costado Norte1) y esto se repite para cada segmento. Una vez obtenidas las caras de cada segmento, se calcula un área media, la cual se obtiene mediante un promedio entre las caras anteriores. Por ejemplo, para obtener el área media del primer segmento, se promedian las áreas de las caras de "Costado Norte1" y "Costado Norte2" ($0,38$ y $1,35 m^2$) para obtener $0,86 m^2$. El área media del segundo segmento se obtiene con el promedio del área de las caras de "Costado Norte2" y "Costado Norte3" ($1,35$ y $1,13 m^2$) el cual es $1,24 m^2$. Obtenida el área media, se procede a multiplicar esta, (por ejemplo $0,86 m^2$) por la longitud del segmento ($1,4 m$) para obtener el volumen aproximado del segmento ($1,21 m^3$). Con este volumen y la densidad aparente del suelo se obtiene la masa de cada segmento, luego se suman todas estas masas y se obtiene el total de masa perdida en la cárcava. Luego se suman las masas de cada cárcava y se obtiene la masa pérdida total en la finca, en este caso la finca mide 3,5 hectáreas y finalmente se puede estimar la pérdida t/ha o kg/ha.

**Resumen de medidas de los segmentos de las 3 cárcavas medidas en la finca Parte
Media y cálculos para estimar la pérdida de suelo.**

Nombre de Cárcava	Longitud de cárcava (m)	Longitud de segmentos (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Área de caras (m ²)	Área media (m ²)	Volumen/segmento (m ³)	Densidad Ap (g/cm ³)	Masa/segm. (t)	Total en 3,5ha	Pérdida de suelo (t/ha)
Costado Norte1	14	1,4	1	0,75	0,38						
Costado Norte2	14	1,4	3	0,9	1,35	0,86	1,21	0,73	0,88		
Costado Norte3	14	1,4	2,5	0,9	1,13	1,24	1,73	0,73	1,26		
Costado Norte4	14	1,4	2,1	0,3	0,32	0,72	1,01	0,73	0,74		
Costado Norte5	14	1,4	1,7	3,6	3,06	1,69	2,36	0,73	1,72		
Costado Norte6	14	1,4	0,75	2,5	0,94	2,00	2,80	0,73	2,04		
Costado Norte7	14	1,4	0,7	0,46	0,16	0,55	0,77	0,73	0,56		
Costado Norte8	14	1,4	0,7	0,7	0,25	0,20	0,28	0,73	0,21		
TOTAL							10,16		7,42		
Costado Oeste1	21	2,1	0,6	1	0,30						
Costado Oeste2	21	2,1	0,65	0,9	0,29	0,30	0,62	0,73	0,45		
Costado Oeste3	21	2,1	0,6	0,9	0,27	0,28	0,59	0,73	0,43		
Costado Oeste4	21	2,1	0,94	0,67	0,31	0,29	0,61	0,73	0,45		
Costado Oeste5	21	2,1	1,7	0,6	0,51	0,41	0,87	0,73	0,63		
Costado Oeste6	21	2,1	0,82	0,78	0,32	0,41	0,87	0,73	0,64		
Costado Oeste7	21	2,1	1,8	0,68	0,61	0,47	0,98	0,73	0,71		
Costado Oeste8	21	2,1	1,57	0,6	0,47	0,54	1,14	0,73	0,83		
Costado Oeste9	21	2,1	0,84	0,75	0,32	0,39	0,83	0,73	0,60		
TOTAL							6,51		4,75		
Costado Sur1	46	4,6	1	1,9	0,95						
Costado Sur2	46	4,6	3,1	1,5	2,33	1,64	7,53	0,73	5,50		
Costado Sur3	46	4,6	1,2	0,9	0,54	1,43	6,59	0,73	4,81		
Costado Sur4	46	4,6	1,29	1,65	1,06	0,80	3,69	0,73	2,69		
Costado Sur5	46	4,6	1,6	1,63	1,30	1,18	5,45	0,73	3,98		
Costado Sur6	46	4,6	2,25	1,5	1,69	1,50	6,88	0,73	5,02		
Costado Sur7	46	4,6	1,73	1,83	1,58	1,64	7,52	0,73	5,49		
Costado Sur8	46	4,6	2,44	3	3,66	2,62	12,06	0,73	8,80		
Costado Sur9	46	4,6	3	3,76	5,64	4,65	21,39	0,73	15,61		
Costado Sur10	46	4,6	4,7	2,1	4,94	5,29	24,32	0,73	17,76		
TOTAL							95,43		69,67	81,8	23,4

ANEXO 3. Ejemplo de cálculos para la obtención de la pérdida de nutrientes en kg/ha en el suelo recolectado de las microparcels de erosión.

A- Peso y densidad del suelo recolectado en todas las microparcels de erosión contenido en la copa con un volumen de 2,5 ml. Las mediciones se hicieron por triplicado a cada repetición.

Área de muestreo	Repetición	Copa	Peso (g)	Volumen de copa (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Área de muestreo	Repetición	Copa	Peso (g)	Volumen de copa (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
CLS-30+AG	1	1	2,0896	2,5	0,84	CLS-30+AG	2	3	2,2364	2,5	0,89
	1	2	2,1207	2,5	0,85		3	1	2,1396	2,5	0,86
	1	3	2,1541	2,5	0,86		3	2	2,2699	2,5	0,91
	2	1	2,0039	2,5	0,80		3	3	2,0517	2,5	0,82
	2	2	2,0536	2,5	0,82	CLS-60+A	1	1	2,3843	2,5	0,95
	2	3	2,0458	2,5	0,82		1	2	2,4423	2,5	0,98
	3	1	2,159	2,5	0,86		1	3	2,325	2,5	0,93
	3	2	2,1248	2,5	0,85		2	1	2,1496	2,5	0,86
3	3	2,0967	2,5	0,84	2		2	2,0519	2,5	0,82	
CSS-30+AG	1	1	1,9609	2,5	0,78		2	3	2,0175	2,5	0,81
	1	2	1,9077	2,5	0,76		3	1	2,4334	2,5	0,97
	1	3	2,0792	2,5	0,83		3	2	2,373	2,5	0,95
	2	1	1,8805	2,5	0,75	3	3	2,3696	2,5	0,95	
	2	2	2,0038	2,5	0,80	CMS-60+A	1	1	2,3633	2,5	0,95
	2	3	1,8933	2,5	0,76		1	2	2,3427	2,5	0,94
	3	1	2,2645	2,5	0,91		1	3	2,2978	2,5	0,92
	3	2	2,2533	2,5	0,90		2	1	2,4227	2,5	0,97
3	3	2,2465	2,5	0,90	2		2	2,311	2,5	0,92	
CSS-60+AG	1	1	2,2472	2,5	0,90		2	3	2,2425	2,5	0,90
	1	2	2,1048	2,5	0,84		3	1	2,3738	2,5	0,95
	1	3	2,1351	2,5	0,85		3	2	2,3596	2,5	0,94
	2	1	2,14	2,5	0,86	3	3	2,4445	2,5	0,98	
	2	2	2,2368	2,5	0,89						

Fuente: Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica 2014.

Para explicar cómo se calcularon las cantidades de nutrientes y materia orgánica en kg/ha, se toma como ejemplo el cálculo de todos los elementos para una misma área de muestreo (CSS-30+AG), misma repetición (1) y mismo periodo de evaluación (I, hasta el 27 de setiembre).

Para efectos de solo presentar un elemento con unidades en $\text{cmol}(+)/\text{L}$, se utilizará el calcio. El primer paso para la conversión es tomar los elementos seleccionados que están dados en $\text{cmol}(+)/\text{L}$ y transformarlos a $\text{cmol}(+)/\text{kg}$, para esto se necesita la densidad aparente del sedimento recolectado de cada microparcela, reportadas en el Anexo 3A y resumidas en el Cuadro 25 (en este caso $0,79 \text{ g}/\text{cm}^3$).

Con este dato se divide los $\text{cmol}(+)/\text{L}$ (14,7) entre la densidad de partículas ($0,79 \text{ g}/\text{cm}^3$) y se obtienen los $\text{cmol}(+)/\text{kg}$ (18,5), de esta forma se obtiene un dato de masa y no volumen como viene originalmente reportado en los análisis de laboratorio. Luego este dato se multiplica por el factor de conversión de calcio, el cual es 200 y se obtienen los mg de nutrimento/kg de masa de suelo (3707), así mismo sucede para el magnesio (factor de conversión 122) y el potasio (factor de conversión 391). Seguidamente se divide este dato por 1000 para obtener los g de nutrimento/kg de suelo (3,7) y se multiplica por los kilogramos de suelo acumulados hasta la fecha en esta microparcela (0,620 kg), ya que se conoce la cantidad de nutrimento en 1 kg de suelo pero se necesita calcular la cantidad de gramos de nutrimentos que hay en 0,620 kg (2,3 g). Finalmente, con una regla de tres, se calcula la cantidad de nutrimento perdido en 1 ha conociendo la cantidad perdida en 21 m^2 que es lo que mide la microparcela; $(\text{g de sedimento depositado en } 0,620 \text{ kg} \times 10000 \text{ m}^2) / 21 \text{ m}^2$. Así mismo se obtienen los gramos de nutrimento perdidos en una hectárea y al dividirlo entre 1000 se obtienen los kilogramos.

Para el elemento fósforo, el cálculo es aún más sencillo ya que el análisis de suelo reporta este elemento en mg/L (22), por lo que solamente se divide este dato entre la densidad aparente de suelo y se obtienen los miligramos de nutrimentos contenidos en un kilogramos de suelo (27,7). De aquí en adelante se sigue el procedimiento mencionado en el párrafo anterior hasta obtener los kg/ha.

El contenido de materia orgánica en el sedimento recolectado se obtiene mediante una regla de tres, donde el porcentaje de materia orgánica representa los gramos de materia orgánica en 100 g de suelo, por lo que se calcula la cantidad de materia orgánica en 620 g de suelo acumulado en la microparcela; $(1,21 \text{ g} \times 620 \text{ g}) / 100$. Con esta regla de tres se obtiene que en 620 g de suelo acumulado en la microparcela de 21 m^2 , hay 7,51 g de

materia orgánica. Este dato, como en los párrafos anteriores, se convierte a gramos/ha por medio de la misma regla de tres y se divide entre 1000 para obtener los kg/ha.

Por último, se hace este mismo procedimiento con todos los elementos seleccionados (Ca, Mg, K, F y M.O.) para las dos restantes repeticiones y se promedian los kg/ha para obtener la media de un área de muestreo. Luego se repite lo mismo para el segundo período (hasta el 19 de diciembre).

B- Resumen de cálculos para la obtención de la pérdida de macronutrientes, fósforo y materia orgánica en kg/ha

Área de muestreo	CSS-30+AG		
Repetición	1		
Periodo de evaluación	1, hasta el 27 de setiembre		
g sedimento acumulado	620		
kg sedimento acumulado	0,620		
Densidad en copa (g/cm ³)	0,79		
Elemento	Ca	Mg	K
cmol(+)/L	14,7	4,7	1,5
cmol(+)/kg	18,5	5,9	1,8
mg/kg	3707	723	715
g/kg	3,7	0,7	0,7
g/kg sedimento acumulado	2,3	0,4	0,4
g/ha	1095	214	211
kg/ha	1,1	0,2	0,2
Elemento	P		
mg/L	22,0		
mg/kg	27,7		
g/kg	0,028		
g/ kg sedimento acumulado	0,017		
g/ha	8,195		
kg/ha	0,008		
Elemento	M.O.		
%	1,210		
g/kg sedimento depositado	7,51		
g/ha	3574,37		
kg/ha	3,57		

ANEXO 4. Resultados del régimen de precipitación diaria (mm) de la estación meteorológica Nagaatac del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) ubicada a 10,0515411 latitud Norte y 84,5443349 longitud Oeste.

Año:		2013					
Día/Mes	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
1	2,5	41,1	30,7	63,2	44,2	0,0	
2	37,6	0,0	47,2	61,2	0,8	0,0	
3	72,1	73,9	48,0	34,5	21,8	10,7	
4	25,9	0,0	9,4	7,4	0,3	0,0	
5	2,3	0,0	95,2	40,4	26,9	0,0	
6	26,2	0,0	25,1	50,0	2,0	5,1	
7	0,3	0,0	0,3	15,2	0,5	0,0	
8	1,0	45,5	0,0	52,1	19,3	0,0	
9	0,0	8,6	5,3	39,6	26,7	0,0	
10	31,2	1,5	41,9	2,5	0,0	0,0	
11	3,8	0,8	0,0	33,5	0,0	0,0	
12	1,0	11,9	27,4	24,4	1,8	0,0	
13	1,0	10,4	3,6	0,0	0,0	0,0	
14	19,6	0,3	2,5	15,5	52,3	0,0	
15	0,0	35,6	56,6	21,1	15,0	2,0	
16	0,8	120,9	61,7	48,8	0,0	0,0	
17	21,3	0,5	8,9	3,3	3,0	0,0	
18	0,0	7,1	49,5	8,6	0,0	0,5	
19	0,0	9,7	0,3	5,6	0,0	0,0	
20	1,5	2,0	0,8	70,4	1,0	0,0	
21	14,5	0,3	7,6	18,3	0,3	0,0	
22	9,9	105,9	78,7	35,1	3,0	0,0	
23	0,0	15,2	0,0	62,0	3,3	0,0	
24	0,8	94,7	0,8	13,5	0,0	0,0	
25	4,6	0,0	0,3	44,2	0,0	0,0	
26	0,0	1,3	4,8	79,5	2,0	0,0	
27	0,5	95,8	8,1	3,8	2,5	0,0	
28	32,5	0,0	10,4	51,6	0,0	0,0	
29	0,0	0,0	18,3	0,3	0,0	0,0	
30	0,3	12,2	16,3	9,1	0,0	0,0	
31	0,0	87,1		3,3		0,0	
Total	311,2	782,3	659,7	918,0	226,7	18,3	2916,2

Fuente: ICE 2014

ANEXO 5. Determinación de las categorías de los parámetros utilizados para la adecuada clasificación de tierras según su capacidad de uso

Área de muestreo	CSS-30+AG		CLS-30+AG		CSS-60+AG	
Parámetro	Categoría	Clase	Categoría	Clase	Categoría	Clase
Pendiente e1 (%)	30%	VI	30%	VII	60%	VII
Erosión sufrida e2	Severa	VII	Severa	VII	Severa	VII
Profundidad efectiva s1 (cm)	16 cm, superficial	VII	47 cm, poco profundo	V	16 cm, superficial	VII
Textura a menos 30cm s2	Moderadamente Fina	II	Moderadamente Fina	II	Moderadamente Fina	II
Textura a más 30 cm s2	Moderadamente Fina	II	Moderadamente Fina	II	Moderadamente Fina	II
Pedregosidad s3	Extremadamente Pedregoso	V	Muy pedregoso	IV	Muy pedregoso	IV
Fertilidad s4	Media	II	Media	II	Media	II
Toxicidad s5	Leve	I	Leve	I	Leve	I
Salinidad s6	Leve	I	Leve	I	Leve	I
Drenaje d1	Bueno	I	Bueno	I	Bueno	I
Riesgo de inundación d2	Nulo	I	Nulo	I	Nulo	I
Zonas de Vida c1	Húmedo Tropical (bh-T)	I	Húmedo Tropical (bh-T)	I	Húmedo Tropical (bh-T)	I
Período seco c2	Fuerte	III	Fuerte	III	Fuerte	III
Neblina c3	Moderada	III	Moderada	III	Moderada	III
Viento C4	Ausente	I	Ausente	I	Ausente	I

Área de muestreo	CLS-60+A		CMS-60+A	
Parámetro	Categoría	Clase	Categoría	Clase
Pendiente e1 (%)	60%	VII	60%	VII
Erosión sufrida e2	Moderada	III	Moderada	III
Profundidad efectiva s1 (cm)	100 cm, profundo	II	100 cm, profundo	II
Textura - 30cm s2	Mediana	I	Mediana	I
Textura +30 cm s2	Moderada	I	Moderada	I
Pedregosidad s3	Mediana	II	Mediana	II
Fertilidad s4	Alta	I	Alta	I
Toxicidad s5	Leve	I	Leve	I
Salinidad s6	Leve	I	Leve	I
Drenaje d1	Bueno	I	Bueno	I
Riesgo de inundación d2	Nulo	I	Nulo	I
Zonas de Vida c1	Húmedo Tropical (bh-T)	I	Húmedo Tropical (bh-T)	I
Período seco c2	Fuerte	III	Fuerte	III
Neblina c3	Moderada	III	Moderada	III
Viento C4	Ausente	I	Ausente	I

ANEXO 6. Tasas de erosión (t/ha) y régimen de precipitación semanal (mm) reportada en la estación Nagaatac.

A- Tasas de erosión semanales (t/ha) de todas las microparcelas.

Área de muestreo	CLS-30+AG			CSS-30+AG			CSS-60+AG			CLS-60+A			CMS-60+A		
	Repetición			Repetición			Repetición			Repetición			Repetición		
Fecha	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
19/07/2013	0,029	0,063	0,085	0,041	0,027	0,032	0,064	0,270	0,146	0,566	0,129	1,043	0,112	0,160	0,510
26/07/2013	0,039	0,050	0,016	0,007	0,016	0,019	0,030	0,028	0,025	0,029	0,040	0,169	0,034	0,042	0,059
02/08/2013	0,010	0,021	0,015	0,012	0,004	0,040	0,008	0,006	0,018	0,038	0,066	0,117	0,057	0,074	0,085
09/08/2013	0,015	0,001	0,059	0,002	0,003	0,016	0,016	0,039	0,014	0,137	0,077	0,168	0,086	0,016	0,113
16/08/2013	0,039	0,065	0,055	0,023	0,029	0,038	0,057	0,046	0,031	0,195	0,111	0,465	0,101	0,085	0,147
23/08/2013	0,023	0,043	0,016	0,008	0,010	0,011	0,027	0,024	0,026	0,214	0,096	0,543	0,090	0,149	0,150
30/08/2013	0,073	0,087	0,123	0,079	0,052	0,047	0,048	0,070	0,036	1,537	0,624	4,658	0,595	0,623	0,702
06/09/2013	0,037	0,058	0,072	0,022	0,020	0,031	0,011	0,048	0,039	0,288	0,161	1,526	0,380	0,252	0,278
13/09/2013	0,011	0,022	0,024	0,004	0,006	0,010	0,007	0,018	0,003	0,030	0,016	0,210	0,046	0,021	0,102
20/09/2013	0,170	0,343	0,396	0,057	0,046	0,109	0,150	0,271	0,118	0,315	0,148	1,902	0,468	0,345	0,193
27/09/2013	0,012	0,042	0,054	0,039	0,007	0,022	0,014	0,256	0,301	0,060	0,069	0,515	0,243	0,164	0,048
04/10/2013	0,022	0,015	0,035	0,005	0,003	0,027	0,021	0,068	0,028	0,155	0,032	0,735	0,115	0,107	0,044
11/10/2013	0,148	0,132	0,189	0,128	0,050	0,128	0,128	1,014	0,419	0,259	0,030	0,997	0,276	0,578	0,063
18/10/2013	0,031	0,009	0,014	0,038	0,023	0,009	0,028	0,056	0,041	0,252	0,063	0,174	0,077	0,130	0,037
25/10/2013	0,028	0,027	0,035	0,037	0,054	0,059	0,015	0,031	0,051	0,074	0,031	0,200	0,024	0,036	0,016
01/11/2013	0,010	0,009	0,027	0,006	0,008	0,041	0,058	0,035	0,041	0,118	0,021	0,230	0,083	0,052	0,004
08/11/2013	0,005	0,012	0,010	0,006	0,006	0,053	0,045	0,032	0,024	0,097	0,034	0,195	0,042	0,048	0,025
15/11/2013	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,007	0,004	0,008	0,013	0,015	0,000	0,056	0,019	0,007	0,005
22/11/2013	0,003	0,005	0,000	0,003	0,003	0,034	0,005	0,005	0,014	0,047	0,011	0,058	0,030	0,025	0,009
29/11/2013	0,000	0,025	0,005	0,001	0,000	0,009	0,038	0,044	0,035	0,035	0,005	0,039	0,035	0,062	0,069
06/12/2013	0,003	0,003	0,000	0,002	0,004	0,007	0,007	0,010	0,056	0,003	0,009	0,019	0,009	0,003	0,005
13/12/2013	0,002	0,005	0,000	0,005	0,002	0,001	0,010	0,007	0,004	0,003	0,009	0,019	0,015	0,007	0,003

B- Resumen de tasas de erosión (t/ha) por área de muestreo (\pm desviación estándar) y régimen de precipitación semanal (mm) reportada en la estación Nagaatac.

Fecha	CLS-30+AG	CSS-30+AG	CSS-60+AG	CLS-60+A	CMS-60+A	Precipitación (mm)
19/07/2013	0,1774 (0,0283)	0,1000 (0,0071)	0,4805 (0,1037)	0,7814 (0,4571)	1,7379 (0,2173)	79,7
26/07/2013	0,1049 (0,0175)	0,0422 (0,0066)	0,0822 (0,0028)	0,1351 (0,0777)	0,2379 (0,0130)	31,3
02/08/2013	0,0457 (0,0057)	0,0561 (0,0186)	0,0313 (0,0062)	0,2159 (0,0396)	0,2214 (0,0136)	74,4
09/08/2013	0,0750 (0,0299)	0,0211 (0,0075)	0,0683 (0,0141)	0,2148 (0,0464)	0,3814 (0,0497)	128
16/08/2013	0,1594 (0,0133)	0,0899 (0,0075)	0,1334 (0,0129)	0,3320 (0,1854)	0,7706 (0,0320)	181,4
23/08/2013	0,0823 (0,0141)	0,0289 (0,0017)	0,0776 (0,0016)	0,3885 (0,2315)	0,8525 (0,0345)	140,7
30/08/2013	0,2830 (0,0258)	0,1780 (0,0174)	0,1536 (0,0176)	1,9200 (2,1154)	6,8192 (0,0556)	204
06/09/2013	0,1663 (0,0179)	0,0733 (0,0054)	0,0982 (0,0190)	0,9094 (0,7545)	1,9750 (0,0676)	342,7
13/09/2013	0,0564 (0,0067)	0,0191 (0,0029)	0,0273 (0,0079)	0,1683 (0,1081)	0,2556 (0,0414)	78,5
20/09/2013	0,9089 (0,1179)	0,2119 (0,0334)	0,5385 (0,0805)	1,0054 (0,9679)	2,3645 (0,1376)	180,3
27/09/2013	0,1084 (0,0215)	0,0681 (0,0163)	0,5712 (0,1541)	0,4550 (0,2601)	0,6441 (0,0983)	100,3
04/10/2013	0,0717 (0,0101)	0,0346 (0,0135)	0,1173 (0,0257)	0,2655 (0,3755)	0,9216 (0,0391)	211,3
11/10/2013	0,4687 (0,0294)	0,3060 (0,0452)	1,5612 (0,4516)	0,9165 (0,5053)	1,2863 (0,2585)	233,3
18/10/2013	0,0549 (0,0113)	0,0703 (0,0146)	0,1253 (0,0143)	0,2443 (0,0949)	0,4889 (0,0468)	121,7
25/10/2013	0,0898 (0,0045)	0,1498 (0,0114)	0,0970 (0,0180)	0,0767 (0,0878)	0,3057 (0,0103)	249,1
01/11/2013	0,0454 (0,0101)	0,0549 (0,0197)	0,1339 (0,0116)	0,1389 (0,1042)	0,3688 (0,0396)	191,8
08/11/2013	0,0262 (0,0038)	0,0650 (0,0269)	0,1012 (0,0107)	0,1150 (0,0812)	0,3268 (0,0115)	71,6
15/11/2013	0,0065 (0,0037)	0,0069 (0,0040)	0,0251 (0,0047)	0,0307 (0,0290)	0,0709 (0,0078)	95,8
22/11/2013	0,0078 (0,0024)	0,0400 (0,0082)	0,0244 (0,0055)	0,0635 (0,0248)	0,1155 (0,0110)	7,3
29/11/2013	0,0305 (0,0131)	0,0100 (0,0047)	0,1163 (0,0045)	0,1660 (0,0183)	0,0784 (0,0178)	7,8
06/12/2013	0,0058 (0,0017)	0,0132 (0,0023)	0,0735 (0,0275)	0,0165 (0,0082)	0,0305 (0,0027)	15,8
13/12/2013	0,0069 (0,0027)	0,0084 (0,0023)	0,0216 (0,0031)	0,0246 (0,0085)	0,0309 (0,0064)	0

ANEXO 7. Análisis físicos y químicos de los sedimentos recolectados en todas las microparcelas de erosión.

A- Porcentajes de arena, limo y arcilla de los sedimentos recolectados en dos períodos de evaluación. Período I: del 19 de julio al 27 de setiembre del 2013, período II: del 27 de setiembre al 19 de diciembre del 2013.

Área de muestreo	Repetición	Arenas, Limos y Arcillas (%)					
		Arena		Limo		Arcilla	
		I	II	I	II	I	II
CLS-30+AG	1	44	45	38	30	18	25
	2	50	45	32	30	18	25
	3	58	55	28	22	14	23
CSS-30+AG	1	60	52	28	25	12	23
	2	70	62	22	20	8	18
	3	60	47	28	28	12	25
CSS-60+AG	1	52	50	30	25	18	25
	2	58	55	30	25	12	20
	3	52	55	33	22	15	23
CLS-60+A	1	44	50	38	25	18	25
	2	60	55	28	25	12	20
	3	62	64	25	18	13	18
CMS-60+A	1	60	62	30	23	10	15
	2	62	70	30	15	8	15
	3	55	55	33	25	12	20

Fuente: Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica 2014. N° de registro: 48614, 49284.

B- Análisis químico completo del sedimento recolectado en todas las microparcels de erosión en el primer período de evaluación (del 19 de julio al 27 de setiembre del 2013).

Área de muestreo	Repetición	pH	Acidez	cmol(+)/l				CICE	%	SA	mg/l				%			C/N
				Ca	Mg	K	P				Zn	Mn	Cu	Fe	M.O.	C	N	
CLS-30+AG	1	4,4	3,15	9,8	3,8	1,23	17,98	17,52	26	6,2	120	6	83	0,62	0,34	0	1,79	
CLS-30+AG	2	4,3	3,55	10,6	4,4	1,17	19,72	18,00	36	6,2	146	4	104	1,21	0,7	0	3,89	
CLS-30+AG	3	4,3	7,00	20,0	7,3	0,96	35,26	19,85	9	5,4	95	4	40	1,21	0,7	0	3,04	
CSS-30+AG	1	4,8	2,25	14,7	4,7	1,45	23,10	9,74	22	2,0	115	2	66	1,21	0,7	0,21	3,33	
CSS-30+AG	2	4,6	2,00	10,8	3,8	1,16	17,76	11,26	17	3,1	159	1	55	1,50	0,87	0,19	4,58	
CSS-30+AG	3	4,4	3,20	10,0	4,3	1,48	18,98	16,86	18	2,7	207	4	83	1,21	0,7	0,15	4,67	
CSS-60+AG	1	4,3	3,30	9,6	3,8	0,97	17,67	18,68	8	1,6	150	1	33	0,92	0,54	0	3,38	
CSS-60+AG	2	4,4	3,20	12,2	4,0	1,40	20,80	15,38	19	2,3	155	3	54	0,92	0,54	0	2,71	
CSS-60+AG	3	4,3	9,00	11,0	5,6	1,06	26,66	33,76	9	2,4	143	2	40	0,62	0,34	0	1,46	
CLS-60+A	1	4,7	0,45	12,4	3,9	1,22	17,97	2,50	12	2,3	40	3	26	0,62	0,34	0	1,79	
CLS-60+A	2	4,5	2,00	13,2	3,6	0,88	19,68	10,16	11	2,6	45	2	32	0,62	0,34	0	1,62	
CLS-60+A	3	4,5	1,10	15,1	4,0	1,05	21,25	5,18	10	1,6	70	3	28	0,62	0,34	0	1,42	
CMS-60+A	1	4,5	1,40	21,0	6,6	0,74	29,74	4,71	7	2,6	53	1	21	0,92	0,54	0	3,00	
CMS-60+A	2	4,9	0,25	18,3	5,0	1,23	24,78	1,01	8	1,8	36	1	18	0,92	0,54	0	3,38	
CMS-60+A	3	4,7	0,70	16,2	5,4	0,66	22,96	3,05	5	2,7	31	1	16	0,62	0,34	0	2,00	

Nota: Solución extractora: KCl-Olsen Modificado

Fuente: Laboratorio de suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) 2014. N° de registro: (3302-3316).

C- Análisis químico completo del sedimento recolectado en todas las microparcelas de erosión en el segundo período de evaluación (del 27 de setiembre al 19 de diciembre del 2013).

Área de muestreo	Repetición	pH	Acidez	cmol(+)/l				%		mg/l				M.O.
				Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Mn	Cu	Fe	
CLS-30+AG	1	4,30	4,35	5,90	2,30	0,87	13,42	32,41	37,00	11,40	72,00	6,00	97,00	3,01
CLS-30+AG	2	4,70	1,45	9,60	5,90	2,35	19,30	7,51	46,00	7,50	105,00	5,00	86,00	2,71
CLS-30+AG	3	4,60	5,00	13,70	7,20	0,71	26,61	18,79	9,00	8,50	66,00	3,00	37,00	2,09
CSS-30+AG	1	4,30	1,80	9,30	5,30	1,28	17,68	10,18	42,00	12,80	70,00	5,00	119,00	3,01
CSS-30+AG	2	4,70	0,90	7,90	3,70	1,26	13,76	6,54	30,00	10,20	109,00	3,00	58,00	3,31
CSS-30+AG	3	4,30	4,00	7,10	3,80	1,10	16,00	25,00	29,00	6,50	117,00	3,00	105,00	3,35
CSS-60+AG	1	4,40	2,20	8,90	3,60	1,09	15,79	13,93	33,00	9,60	53,00	4,00	81,00	3,03
CSS-60+AG	2	4,40	4,15	11,50	4,40	1,10	21,15	19,62	35,00	5,00	52,00	5,00	73,00	3,61
CSS-60+AG	3	4,40	4,10	7,30	4,20	1,25	16,85	24,33	21,00	4,50	83,00	3,00	62,00	3,05
CLS-60+A	1	5,30	0,25	18,00	4,90	0,77	23,92	1,05	18,00	1,50	8,00	3,00	23,00	3,01
CLS-60+A	2	5,10	0,20	9,80	2,90	1,13	14,03	1,43	21,00	2,50	17,00	4,00	32,00	3,31
CLS-60+A	3	4,80	1,35	21,20	8,10	0,70	31,35	4,31	11,00	6,90	22,00	4,00	25,00	2,09
CMS-60+A	1	4,90	0,25	8,10	3,00	1,44	12,79	1,95	22,00	3,80	39,00	3,00	44,00	2,04
CMS-60+A	2	4,60	2,25	15,70	4,70	1,01	23,66	9,51	20,00	3,10	39,00	5,00	42,00	3,01
CMS-60+A	3	4,70	1,30	15,80	4,30	1,17	22,57	5,76	19,00	2,60	38,00	4,00	35,00	3,31

Nota: Solución extractora: KCl-Olsen Modificado

Fuente: Fuente: Laboratorio de suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) 2014. N° de registro (429-443).