

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

**ANÁLISIS DE LA INTERVENCIÓN EN OBRAS DE CONSERVACIÓN DE
SUELO Y AGUA Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD
DEL SUELO EN DOS FINCAS PRODUCTORAS DE CAFÉ EN
LA CUENCA ALTA DEL RÍO JESÚS MARÍA**

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PRESENTADO ANTE LA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS
COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y DE BIOSISTEMAS

DIEGO ANDRÉS CHACÓN GÓMEZ

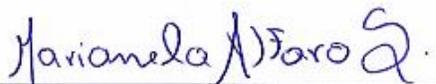
CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO
SAN JOSÉ, COSTA RICA

2022

Trabajo Final de Graduación sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas



Diego Andrés Chacón Gómez
Postulante



Ing. Marianela Alfaro Santamaría, Ph.D.
Directora, Comité Asesor



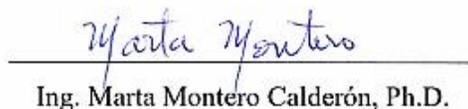
Ing. José Francisco Aguilar Pereira, M.Sc.
Miembro, Comité Asesor



Marjo Villatoro Sánchez, Ph.D.
Miembro, Comité Asesor



Ing. Alejandra Rojas González, Ph.D.
Miembro, Tribunal Examinador



Ing. Marta Montero Calderón, Ph.D.
Presidente, Tribunal Examinador

Dedicatoria

A Dios, por permitirme finalizar esta etapa.

A mi madre Sonia, por su apoyo incondicional.

A mi hermana Cinthya, por inspirarme a salir adelante.

A mi hermano Sebastián, por escucharme y motivarme siempre.

Agradecimientos

A mi madre, por inculcar en mí el valor de la educación y por todo su apoyo durante todos estos años.

A mi hermana Cinthya, por sus palabras de aliento y acompañamiento durante toda mi carrera universitaria, y a mi hermano Sebastián por estar siempre disponible para lo que necesite.

A la directora del proyecto, Ing. Marianela Alfaro Santamaría, Ph.D, por la paciencia, acompañamiento, tiempo invertido y muchas otras cosas más por las que siempre voy a estar agradecido.

A los profesores asesores del proyecto, Ing. José Francisco Aguilar Pereira, M.Sc. y Mario Villatoro Sánchez, Ph.D. por sus valiosos aportes y recomendaciones.

Al Ing. Donald Vásquez Pacheco por brindarme su tiempo e información necesaria para el desarrollo del proyecto.

A mis compañeros de carrera, que se convirtieron en amigos incondicionales para toda la vida.

RESUMEN

La cuenca del Río Jesús María fue catalogada como la más degradada de Costa Rica, por lo que entes gubernamentales como la Comisión Asesora Sobre Degradación de Tierras (CADETI) y el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) han intervenido la zona con planes de conservación (1). Específicamente en la parte alta de la cuenca, desde el 2012 se han implementado acequias de ladera y gavetas de infiltración como obras de conservación para reducir/evitar la degradación del suelo por acción de la erosión que afecta a las fincas cafetaleras con altas pendientes de este lugar.

Con el fin de analizar el efecto de dicha intervención sobre la calidad del suelo, se evaluaron varios indicadores de calidad del suelo a una profundidad de 30 cm en dos fincas con distinto tipo de manejo de cultivo, una bajo sombra y otra a pleno sol. Los parámetros estudiados fueron el contenido de humedad, densidad aparente, porosidad total, conductividad hidráulica, contenido de materia orgánica, contenido de carbono orgánico y la fracción liviana y pesada de la materia orgánica. Además, se analizó la intervención a partir de la caracterización de las fincas estudiadas y de información provista por profesionales involucrados en el plan de conservación en la cuenca desde sus inicios.

Dentro de los resultados encontrados, se determinó que para todos los indicadores de calidad estudiados, el suelo intervenido con acequias de ladera de la finca agroforestal presentó diferencias estadísticas significativas al compararlo con el suelo sin intervenir ($p < 0,001$), y se encontraron valores promedio de contenido de humedad (28,9 %), densidad aparente (0,85

g cm⁻¹), porosidad (67,9 %), materia orgánica (4,37 %), carbono orgánico (55,8 MgC ha⁻¹) y fracción liviana de la MOS (4,18 g kgss⁻¹) en el suelo intervenido con acequias de ladera, y valores promedio de contenido de humedad (25,8 %), densidad aparente (0,99 g cm⁻¹), porosidad (62,7 %), materia orgánica (3,46 %), carbono orgánico (51,2 MgC ha⁻¹) y fracción liviana de la MOS (3,19 g kgss⁻¹) en el suelo intervenido con gavetas de infiltración, siendo estos últimos muy similares a los encontrados en el suelo control a excepción del indicador de calidad “contenido de humedad”.

Por su parte, la comparación de los indicadores de calidad en la finca en monocultivo (pleno sol) demostró que el suelo intervenido tanto con acequias como con gavetas, no presenta diferencias estadísticas significativas con respecto al suelo sin intervenir ($p > 0,05$), excepto por la conductividad hidráulica del suelo con acequias de ladera. Los valores promedio encontrados para el sistema control fueron, contenido de humedad (20,9 %), densidad aparente (1,18 g cm⁻¹), porosidad (55,6 %), materia orgánica (2,24 %), carbono orgánico (37,8 MgC ha⁻¹) y fracción liviana de la MOS (3,02 g kgss⁻¹), los cuales son muy cercanos y similares a los encontrados en los tratamientos “acequias de ladera” y “gavetas de infiltración”.

Con respecto a la comparación entre sistemas productivos, se encontraron diferencias significativas para todos los indicadores de calidad estudiados. Por ejemplo, propiedades físicas como la densidad aparente y porosidad del suelo con acequias de la finca agroforestal presentaron valores promedio de 0,85 g cm⁻¹ y 67,9 % respectivamente, mientras que para el

caso del suelo bajo estas mismas condiciones pero en la finca a pleno sol, se encontraron valores de $1,15 \text{ g cm}^{-1}$ y $56,8 \%$ respectivamente. En cuanto al suelo intervenido con gavetas se encontró, por ejemplo, que el COS en la finca bajo sombra fue de $51,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$, mientras que el de su contraparte, en la finca a pleno sol, fue de $36,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$; valores que dejan en evidencia la diferencia que existe entre tipos de manejo de cultivo y el papel de los árboles como complemento a la intervención con obras.

Dentro de las conclusiones más relevantes, se determinó que las gavetas no deben utilizarse como única obra para mitigar los efectos de la degradación en esta parte de la cuenca, pues por sí solas no son obras de conservación que mejoren la calidad del suelo en laderas cafetaleras como las que en este estudio se analizaron. También, se concluye que los árboles en el cafetal bajo sombra tienen un efecto importante sobre las condiciones de calidad del suelo, reflejadas en la mejoría de los parámetros estudiados. Se concluyó, además, que los árboles de sombra confieren características más adecuadas al suelo para conseguir sostenibilidad y que su combinación con acequias de ladera pueden favorecer la calidad de este recurso.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	v
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. OBJETIVOS.....	16
3. MARCO TEÓRICO.....	17
3.1. El suelo y su papel en los ecosistemas naturales y sistemas agrícolas productivos	17
3.2. Calidad del suelo.....	19
3.2.1. Indicadores de calidad del suelo	20
3.3. Degradación del suelo y agua	26
3.3.1. Erosión hídrica y pérdida de suelo.....	30
3.3.2. Degradación de suelo en Costa Rica: Caso de la cuenca del Río Jesús María	33
3.4. Proyectos de conservación en la Cuenca Alta del Río Jesús María.....	37
3.4.1. Acequias de ladera.....	39
3.4.2. Gavetas de infiltración.....	40
3.4.3. Otros esfuerzos de conservación en fincas cafetaleras de la cuenca alta.....	42
3.5. Parámetros y consideraciones de diseño de obras de conservación.....	47
3.6. Agricultura en la cuenca del Río Jesús María: cultivo de café	53
3.6.1. Cultivo a pleno sol (monocultivo)	55
3.6.2. Cultivo bajo sombra (agroforestal).....	56
4. METODOLOGÍA.....	57
4.1. Área de estudio.....	57
4.2. Selección de las fincas de estudio	58
4.2.1. Selección de parcelas dentro de las fincas	59

4.3.	Caracterización de las fincas seleccionadas para el estudio.....	59
4.4.	Caracterización de las estructuras de conservación de suelo y agua implementadas en las fincas de estudio.....	60
4.5.	Muestreo del suelo	61
4.6.	Análisis de laboratorio	61
4.6.1.	Contenido de humedad	61
4.6.2.	Densidad aparente.....	62
4.6.3.	Porosidad	63
4.6.4.	Conductividad hidráulica.....	63
4.6.5.	Contenido de materia orgánica del suelo.....	63
4.6.6.	Carbono orgánico del suelo	64
4.6.7.	Fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo.....	64
4.7.	Análisis estadístico.....	65
4.7.1.	Comparaciones múltiples entre tratamientos para cada sistema productivo .	65
4.7.2.	Comparaciones entre sistemas productivos	66
5.	RESULTADOS	67
5.1.	Caracterización de la zona de estudio	67
5.1.1.	Cuenca del Río Jesús María.....	67
5.2.	Caracterización de las fincas seleccionadas para el estudio.....	69
5.2.1.	Finca: sistema bajo sombra (SAF).....	69
5.2.2.	Finca: sistema a pleno sol (monocultivo)	72
5.3.	Intervención con obras de conservación en la cuenca RJM en las fincas de estudio	73
5.3.1.	Antecedentes y planeación del proyecto de intervención.....	73
5.3.2.	Construcción de las obras de conservación	75
5.3.3.	Caracterización de las obras de conservación implementadas	76
5.3.4.	Mantenimiento de las obras de conservación	78
5.3.5.	Capacitación a productores y seguimiento del proyecto	79

5.3.6.	Estado de las fincas en estudio	80
5.4.	Parámetros evaluados por tratamiento para cada sistema productivo.....	83
5.4.1.	Sistema productivo bajo sombra (SAF).....	83
5.4.2.	Sistema productivo a pleno sol (monocultivo)	85
5.5.	Comparaciones entre sistemas productivos	87
6.	DISCUSIÓN.....	90
6.1.	Caracterización de las fincas intervenidas	90
6.2.	Intervención de las fincas estudiadas con obras de conservación.....	92
6.3.	Análisis de dos factores sobre indicadores de calidad estudiados	94
6.4.	Comparaciones múltiples entre tratamientos para cada sistema productivo.....	95
6.4.1.	Sistema productivo bajo sombra (SAF).....	95
6.4.2.	Sistema productivo a pleno sol (monocultivo)	104
6.5.	Comparación entre sistemas productivos.....	108
6.5.1.	Suelo intervenido con obras de conservación.....	108
6.5.2.	Suelo no intervenido	109
7.	CONCLUSIONES.....	117
8.	RECOMENDACIONES	119
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
10.	ANEXOS	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Funciones del suelo como matriz inmersa en un ecosistema.	18
Figura 2. Tipos de erosión hídrica que afectan al suelo.	31
Figura 3. Componentes generales del proceso de erosión.	31
Figura 4. Distribución territorial de los cantones que conforman la cuenca del Río Jesús María (Proyección CRTM05, Datum: WGS84).	34
Figura 5. Acequia de ladera para conservación de suelo y agua en cultivos de café en la cuenca alta del Río Jesús María. Fuente: Barboza (2021) (37).	40
Figura 6. Gaveta de infiltración para conservación de suelo y agua en cultivos de café en la cuenca alta del Río Jesús María. Fuente: Barboza (2021) (37).	41
Figura 7. Sección a. trapezoidal y b. triangular utilizadas en el diseño de canales (75). ...	48
Figura 8. Distribución de los distritos que conforman el cantón de San Ramón, donde se ubica la zona de estudio. (Proyección CRTM05, Datum: WGS84).	57
Figura 9. Modelo digital de elevación (DEM) de la cuenca del Río Jesús María.	67
Figura 10. Modelo de pendientes del terreno de la cuenca del Río Jesús María.	68
Figura 11. Sistema de producción de café con manejo agroforestal en la parte alta de la cuenca RJM.	71
Figura 12. Sistema de producción de café con manejo a pleno sol en la parte alta de la cuenca RJM.	72
Figura 13. Acequia de ladera en finca bajo manejo de cultivo agroforestal.	80
Figura 14. Gaveta de infiltración en finca bajo manejo de cultivo agroforestal.	81
Figura 15. Acequia de ladera en finca bajo manejo de cultivo a pleno sol.	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relaciones geométricas de las secciones más utilizadas en canales agrícolas.	51
Tabla 2. Características generales de la finca bajo sistema productivo de café sombreado (SAF).	70
Tabla 3. Características generales de la finca bajo sistema productivo de café a pleno sol.	73
Tabla 4. Dimensiones características de las acequias de ladera y canales de guardia implementados en fincas cafetaleras de la parte alta de la cuenca RJM.....	76
Tabla 5. Dimensiones características de las gavetas de infiltración implementados en fincas cafetaleras de la parte alta de la cuenca RJM.	78
Tabla 6. Resultados de prueba ANOVA de dos factores para determinar influencia del tratamiento, sistema productivo y combinación de estos sobre los indicadores de calidad como variables de respuesta.	84
Tabla 7. Resultados de comparación múltiple de los indicadores de calidad del suelo evaluados en el sistema productivo bajo sombra (SAF), utilizando la prueba estadística ANOVA.	85
Tabla 8. Resultados de comparación múltiple de los indicadores de calidad del suelo evaluados en el sistema productivo a pleno sol (monocultivo), utilizando la prueba estadística ANOVA.	86
Tabla 9. Resultados de comparación de los indicadores de calidad del suelo evaluados en el sistema productivo bajo sombra y a pleno sol para las parcelas <u>intervenidas</u> , utilizando la prueba estadística T-Student.	88
Tabla 10. Resultados de comparación de los indicadores de calidad del suelo evaluados en el sistema productivo bajo sombra y a pleno sol para las parcelas <u>no intervenidas</u> , utilizando la prueba estadística T-Student.	89

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo, una gran cantidad de zonas sufren procesos de degradación de sus suelos producto de la deforestación, sobrepastoreo, uso de prácticas insostenibles, variabilidad climática y regímenes extremos de precipitación. Costa Rica no es la excepción, es por esto que en un marco de sostenibilidad y conservación ambiental, la Comisión Asesora Sobre Degradación de Tierras (CADETI), a través del Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Degradación de la Tierra y Sequía (PAN); realizó un estudio que identificó a la cuenca del Río Jesús María (RJM) como la más degradada del país (1).

Al ser esta una cuenca extensa con aproximadamente 352,8 km² de área que comprende zonas como San Ramón, San Mateo, Orotina, Esparza y Garabito (2), las actividades económicas que explotan sus recursos naturales son muy variadas. La degradación del suelo en esta zona se ha generado debido a la ausencia de prácticas agrícolas sostenibles por el desconocimiento o despreocupación que rodea este tema.

La mala planificación y la descontrolada expansión de estas actividades económicas, como la ganadería o la agricultura, en especial la producción de café, asociada a la siembra en cultivos en laderas con grandes pendientes y en cercanías de las nacientes, uso excesivo de agroquímicos, entre otros, han provocado la presencia de una pobre cobertura vegetal en el suelo y generado un efecto negativo sobre la calidad y capacidad de este, al reducir su potencial para el desarrollo normal de la biodiversidad en la región (2). La degradación de

este recurso supone, entonces, una pérdida de equilibrio de sus propiedades, incluyendo aspectos físicos (erosión), químicos (déficit de nutrientes, acidez, entre otros) y biológicos del suelo (deficiencia de materia orgánica) (3).

Desde hace varios años, CADETI ha realizado esfuerzos importantes en pro de controlar y revertir la degradación del suelo por erosión en el país. En la cuenca alta del río Jesús María, específicamente desde el 2012, dicha institución en coordinación con el Programa de Pequeñas Donaciones del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (PPN) del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), ha implementado un plan de intervención con obras de conservación como acequias de ladera y gavetas de infiltración en diferentes fincas cafetaleras de la parte alta con pendientes pronunciadas, para evitar o reducir la erosión y pérdida de suelo, además de fomentar la infiltración del agua en este (4).

La evaluación de la calidad del suelo es de suma importancia ya que por medio de indicadores se puede evaluar la sustentabilidad de sistemas de uso, manejo y conservación de este recurso. En el país no se ha generado información científica completa que respalde la implementación de estas obras de control de degradación del suelo.

Esta investigación tuvo como objetivo principal analizar la intervención en obras de conservación del suelo y agua y su relación con la calidad del suelo en dos fincas productoras de café, una finca con sistema de cafetal a pleno sol y otra bajo sombra, ubicadas en la cuenca alta del río Jesús María. Con esto, se generaron datos reales referentes a la evaluación del

suelo, con el fin de valorar el impacto de la implementación de estos dos tipos de obras de conservación en el suelo. En general, dicho análisis sirvió como diagnóstico de la calidad del suelo actual en la cuenca alta.

2. OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la intervención en obras de conservación del suelo y agua y su relación con la calidad del suelo en dos fincas productoras de café, una finca a pleno sol y otra bajo sombra, ubicadas en la cuenca alta del río Jesús María.

Objetivos específicos

1. Caracterizar las fincas seleccionadas para el estudio de acuerdo a su ubicación, tamaño, sistema productivo utilizado, productividad, prácticas de manejo de cultivo y topografía.
2. Evaluar la intervención en estructuras de conservación de suelo y agua implementadas en las fincas bajo estudio.
3. Evaluar la densidad aparente, porosidad, materia orgánica y carbono orgánico del suelo en las fincas seleccionadas para el estudio.
4. Evaluar el fraccionamiento físico y la fracción liviana de la materia orgánica del suelo en las fincas seleccionadas para el estudio, como indicador de gestión sostenible.
5. Determinar el efecto de las intervenciones en obras de conservación sobre la calidad del suelo tomando como base los parámetros evaluados, y de acuerdo con la modalidad de producción en monocultivo y sistema agroforestal.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. El suelo y su papel en los ecosistemas naturales y sistemas agrícolas productivos

El suelo, en su forma más general, puede entenderse como un cuerpo natural compuesto por materia orgánica e inorgánica, además de líquidos y gases que ocupan un espacio y cuya distribución se da en capas u horizontes que se distinguen del material inicial por efecto de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia que se dan a través del tiempo (5). El suelo, al estar conformado por elementos esenciales, posee la capacidad de participar en la dinámica de los ecosistemas, diversidad biótica, procesos de control de erosión, sustento de la seguridad alimentaria global, y demás tareas relacionadas a la capacidad de generar vida.

Los servicios o funciones ecosistémicas del suelo pueden definirse como la suma de diferentes procesos físicos, químicos y biológicos (3), tales como los ciclos del carbono, nitrógeno, fósforo y otros nutrientes, los cuales son esenciales para un correcto equilibrio ambiental. El suelo, al ser una matriz natural, realiza las siguientes funciones, las cuales están relacionadas a su vez al desarrollo de actividades ecosistémicas y culturales.

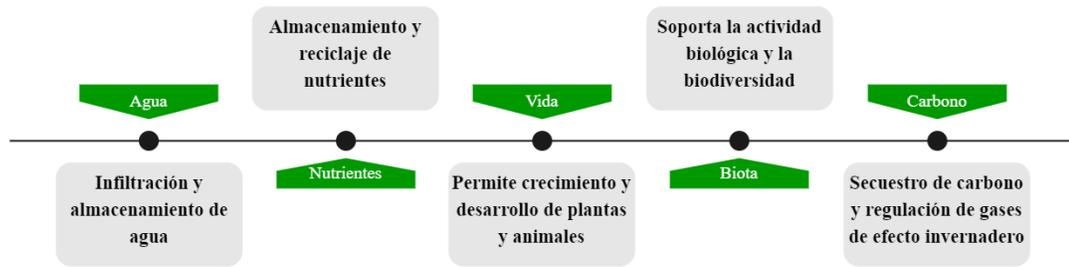


Figura 1. Funciones del suelo como matriz inmersa en un ecosistema.

Elaboración propia con información recopilada de Comerford et. al. (2013) (6)

Además de proporcionar estos servicios ecosistémicos, el suelo actúa como filtro ante la contaminación y ayuda a mitigar el cambio climático hasta cierto punto. Muchos contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos, están fuertemente unidos al suelo por lo que su biodisponibilidad es reducida y por consiguiente, su potencial contaminante en el ambiente disminuye. Esta propiedad del suelo se debe a su comportamiento como reactor biológico ya que la biota que se encuentra inmersa puede tratar y transformar contaminantes fácilmente debido a su naturaleza remediadora (7).

Todos los servicios ecosistémicos que provee este recurso y que son esenciales para el correcto equilibrio en el ambiente se ven afectados por la degradación de la calidad que sufren las propiedades y características del suelo. Burbano (2016) (8) explica que dichos efectos se atribuyen, principalmente, a los enfoques limitados y de corto plazo del sector agrario pues ante una demanda creciente de productos agrícolas, las acciones poco sostenibles se apoderan de los esquemas productivos, sin importar el daño ambiental que se pueda generar a partir de ello.

Dadas las características y funciones vitales para el desarrollo de la vida descritas, el suelo es capaz de sustentar diferentes actividades del ser humano, pues es el medio irremplazable utilizado para la generación y provisión de alimentos en forma de productos agrícolas, aprovechamientos forestales (madera y fibras), ganadería, servicios culturales con fines recreativos, desarrollo de estructuras e industrias de diferentes tipos, desarrollo urbano, entre otras actividades económicas de las que se ve beneficiada la sociedad (9).

3.2. Calidad del suelo

Doran y Parkin, citados por Ghaemi et al. (2014) (10) definen la calidad del suelo como la capacidad que posee esta matriz para funcionar dentro de un ecosistema natural o alterado, para sustentar la vida, el desarrollo y la producción de plantas y animales. El suelo, como medio biofísico que está en contacto directo con el ambiente, muchas veces es afectado por acciones del ser humano que generan cambios en el paisaje, pérdida considerable de fertilidad, compactación, entre otros factores que reducen su capacidad para sostener las actividades agrícolas (11).

La calidad del suelo no es estática y, por el contrario, puede cambiar en el corto plazo dependiendo del uso y prácticas de manejo, por lo que para conservarla en sus condiciones naturales se deben implementar prácticas sustentables y sostenibles. Por esta razón, su evaluación es imprescindible ya que esto permite un monitoreo real de sus condiciones, especialmente en zonas que han sufrido cambios en su suelo pues de esta manera se

identifican variaciones en sus características y propiedades, lo que facilita proponer planes de conservación adecuados a las necesidades del lugar (12).

3.2.1. Indicadores de calidad del suelo

Aunque la calidad del suelo no se puede determinar directamente, puede ser inferida a través de la medición de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Para esto, se requiere el uso de parámetros llamados indicadores, que permiten visualizar el origen de los procesos de degradación y, a partir de esto, delinear pautas de manejo que tiendan a mitigarlos o revertirlos (13).

Los indicadores como herramienta para la evaluación de la calidad de un suelo deben escogerse considerando las condiciones específicas de la zona de estudio. Bünemann et al. (2018) (14) mencionan que los indicadores seleccionados deben estar relacionados a amenazas hacia las funciones ecosistémicas de suelo, tales como la erosión, acumulación de sedimentos, reducción de infiltración del agua, compactación de su capa superficial, pérdida de nutrientes, cambios de pH, pérdida de materia orgánica, reducción de la actividad biológica, entre otros (15).

A continuación, se detallan algunos indicadores de calidad que pueden utilizarse como base para la evaluación de la calidad de un suelo.

3.2.1.1. Densidad aparente

La densidad aparente es considerada un indicador físico importante de la calidad del suelo ya que tiene correlación con ciertas de sus propiedades (16). En términos edafológicos, se

define como la masa del suelo por unidad de volumen (g cm^{-3} o kg m^{-3}) que describe la relación existente entre los sólidos y el espacio poroso (17). En general, un incremento de la densidad aparente conlleva a un aumento de la compactación del suelo y viceversa.

3.2.1.2. Porosidad total

La porosidad total es una propiedad física del suelo cuya calidad influencia muchas otras propiedades; esta se distribuye en microporos, mesoporos y microporos. La porosidad es uno de los factores involucrados en la capacidad de almacenamiento de agua y del intercambio fisicoquímico y biológico que se da entre las fases del suelo, por lo que se considera un buen indicador de la calidad edáfica de este (18). En términos generales, la porosidad puede ser definida como el porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. González et al. (2012) (19) recalcan la importancia del estudio de esta propiedad física, pues está relacionada a procesos y servicios ambientales hidrológicos que se dan en las cuencas hidrográficas tales como la infiltración y escurrimiento del agua, los cuales influyen en la erosión hídrica y por lo tanto, en la degradación del suelo.

3.2.1.3. Conductividad hidráulica

El término “conductividad hidráulica” hace referencia a la capacidad de un suelo para transmitir agua a través de su perfil en una condición de saturación con agua del suelo, o en otras palabras, es la velocidad con la que el agua atraviesa el suelo. Marín et al. (2016) (20) menciona que esta propiedad física está relacionada directamente al contenido de materia orgánica, pues un incremento de biomasa o diversificación de la vegetación en el suelo,

puede mejorar su actividad biológica y radicular, favoreciendo así la descompactación y formación de “canales” internos que contribuyen al incremento de la conductividad del agua en la matriz.

Entonces, una disminución de la velocidad de transferencia de agua al suelo puede denotar deficiencias en cuanto a otras características y propiedades, por lo que su análisis es importante en estudios de degradación y calidad de suelos.

3.2.1.4. Contenido de materia orgánica

La materia orgánica (MO) es considerada uno de los componentes del suelo más importantes debido a su estrecha relación con su productividad, fertilidad y calidad en general. Este es un componente clave del suelo ya que afecta muchas reacciones, teniendo efecto directo sobre propiedades físicas, químicas y biológicas. Por ejemplo, su capacidad cementante permite mantener unidas las partículas primarias del suelo (arena, limo y arcilla), formando a su vez una red de poros interconectados (relacionado a densidad aparente y porosidad) que permiten el movimiento del agua, oxígeno, microorganismos, entre otros. Además, la MO se relaciona con la transferencia y almacenamiento de carbono orgánico en las capas del suelo y otros nutrientes esenciales para el correcto balance de este recurso (21), entre otros beneficios asociados.

El cambio de uso de suelos naturales para llevar a cabo actividades agrícolas resulta en una reducción del contenido de materia orgánica, ocasionando problemas de fertilidad y degradación (22), por lo que el análisis de su contenido en el suelo puede aportar información

importante en estudios de calidad, considerando que su restauración a condiciones óptimas en un suelo con historial de degradación puede tomar mucho tiempo.

3.2.1.5. Carbono orgánico del suelo

El carbono orgánico del suelo (COS) hace referencia al carbono que se mantiene en el suelo una vez que se da la descomposición parcial de materiales producidos por organismos vivos (plantas y animales) (23). A nivel global, el COS representa el mayor almacén de carbono en los ecosistemas terrestres (24). Investigaciones realizadas alrededor del mundo respaldan esta afirmación al determinar que el COS acumulado en el primer metro del suelo corresponde a 1 502 billones de toneladas (25).

El COS es el componente principal de la materia orgánica y esta a su vez, está ligada a muchas de las características y propiedades del suelo, tales como la estabilización de su estructura, retención y liberación de nutrientes, infiltración y almacenamiento de agua, entre otros (23), lo que quiere decir que la pérdida del COS genera degradación del suelo.

A nivel mundial, el cambio en el uso del suelo, seguido de la gestión agrícola, representan la raíz del problema de pérdida de COS. Los cambios en el terreno, como por ejemplo la deforestación y remoción de la cobertura vegetal del suelo, no sólo generan pérdidas del COS, sino que también pueden llegar a provocar emisiones de GEI que contribuyen al cambio climático. El efecto inverso puede darse cuando se dan procesos de reforestación en suelos degradados, pues de esta manera se secuestra carbono a largo plazo (26).

Los procesos de degradación generados por los cambios en el uso de suelo, así como las acciones poco sostenibles del sector agrícola, potencian la pérdida de COS. En este contexto, Dlamini et al. (2014) (27) explican que la disminución del COS puede deberse a coberturas vegetales pobres o nulas del suelo, mientras que Shibin et al. (2017) (28) mencionan que otro factor que podría potenciar la pérdida de COS es la alteración de la temperatura del suelo pues un incremento de esta, estimula en gran manera la tasa de descomposición. Por su parte, otro factor que puede reducir las reservas de COS es el aumento de la densidad aparente y la disminución de la porosidad del suelo producto de procesos de compactación, pues generan un detrimento de la capacidad de infiltración y consecuente intensificación de la escorrentía de agua que da paso a la erosión hídrica, la cual podría remover el carbono ubicado en la sección superficial del suelo (29).

Debido a la importancia del COS en el desarrollo de los servicios ecosistémicos del suelo y su notoria pérdida ante la degradación de este, es considerado mundialmente como uno de los indicadores más importantes para monitorear la degradación en suelos.

3.2.1.6. Fracción liviana y pesada de la materia orgánica

La materia orgánica del suelo está compuesta por dos fracciones principales: la fracción liviana y la fracción pesada, las cuales pueden ser separadas por métodos de fraccionamiento físico. La fracción liviana o ligera, es la que no está firmemente asociada a los minerales del suelo y al estar compuesta por los residuos orgánicos (plantas y animales), su tasa de

descomposición es alta (se considera un importante sumidero de disponibilidad de C durante su descomposición), por lo que se considera “lábil” (30).

La fracción lábil de la materia orgánica, al estar compuesta de residuos de plantas y animales en diferentes etapas de su transformación, hace que su descomposición sea muy variable, lo que provoca a su vez que el contenido de carbono sea también muy variable (31). Gregorich et al. (2006), citado por Galantini & Suñer (2008) (31) realizaron una comparación entre la fracción lábil en suelos agrícolas, con pasturas o forestales y encontraron que el contenido de carbono en el suelo era menor en suelos cultivados que en suelos con pastos y agroforestales; diferencias que se hacen presentes por la calidad del material orgánico aportado al suelo.

Janzen et al., citados por Lozano (2011) (32), explican que la fracción liviana de la MOS es afectada, entre otros factores, por el uso que se le da al suelo y las prácticas de manejo utilizadas, provocando, en primera instancia, una descomposición rápida de la MOS. Como la fracción liviana es más sensible que la MOS total en el corto plazo a cambios en el ingreso de carbono al sistema, se ha utilizado ampliamente como un indicador temprano de cambios en la calidad de la materia orgánica y, por lo tanto, del suelo. De esta forma, la fracción liviana se posiciona como un parámetro de calidad que puede ser utilizado para cuantificar los efectos producidos como consecuencia de diferentes manejos agronómicos a corto y largo plazo, a partir de su nivel de presencia y acumulación en el suelo (30).

Por otro lado, la fracción pesada hace referencia a la porción de MOS que está asociada a los minerales del suelo y se encuentra incorporada en complejos organominerales, los cuales están asociados, a su vez, a las partículas de arcilla, limo y arena, por lo que se considera la fracción estable (33). A diferencia de la fracción liviana, esta se encuentra más transformada y su tasa de descomposición es más lenta, por lo que toma muchos años poder observar diferencias en esta fracción (30).

La fracción pesada, al estar presente en la matriz del suelo por más tiempo, es más resistente y diferentes a la materia original, por lo que tiene una influencia considerable sobre ciertas características y propiedades físicas y químicas del suelo, tales como la densidad aparente, retención de la humedad, adsorción, entre otros (21).

En general, las fracciones de la MOS pueden cambiar con el paso del tiempo dependiendo del uso que se le dé al suelo, por lo que han sido ampliamente utilizadas como indicador de la sostenibilidad de agroecosistemas (32). Sin embargo, las disminuciones son mucho más marcadas y ocurren primero en la fracción liviana, por lo que el análisis de la fracción pesada representa un complemento del estudio de su contraparte. (21).

3.3. Degradación del suelo y agua

La degradación del suelo está relacionada al cambio negativo que sufren las características y propiedades originales de dicho recurso debido al uso inapropiado que le dan los diferentes sistemas productivos que lo utilizan. Forouzangohar et al. (2014) (3) explican que este cambio se da por medio de procesos físicos, químicos y/o biológicos que afectan

directamente su calidad, la cual disminuye en términos de fertilidad, productividad y capacidad para sostener el equilibrio normal de sus procesos, debido al decrecimiento de la actividad de los servicios ecosistémicos.

La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD *por sus siglas en inglés*) estimó en su reporte “Perspectiva Global de la Tierra”, publicado en 2017, que el suelo degradado representa más de una quinta parte de los bosques y las tierras agrícolas de América Latina y el Caribe (34). Además, el informe del *Estado Mundial del Recurso Suelo* de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (*FAO por sus siglas en inglés*) y del Grupo Técnico Intergubernamental sobre Suelos (*ITPS por sus siglas en inglés*) (2015) (25), reveló que para el 2015 el 33 % del suelo en el mundo se encontraba de moderado a altamente degradado debido a la erosión, asegurando que dicho porcentaje podría aumentar al 90 % para 2030.

Debido al incremento exponencial de la población en el mundo, muchas zonas han sufrido cambios significativos ya que han pasado de ser ambientes naturales, a dominados por la agricultura intensiva, la cual engloba una larga lista de actividades económicas que hacen uso desmedido de los recursos naturales. La agricultura como forma de subsistencia se ha convertido en una de las causas más importantes de degradación del suelo pues los bosques y vegetación que sirven como recubrimiento y protección ante eventos erosivos, se han ido

eliminando parcial o totalmente propiciando un aumento considerable del potencial degradativo de factores naturales como la lluvia o el viento.

Se estima que el crecimiento previsto de la población en el mundo será de alrededor de 9000 millones en 2050, lo que provocará un aumento del 60 % de la demanda de alimentos para ese año (35). Este dato toma especial importancia cuando se considera que son pocas las posibilidades de ampliación de la superficie que puede ser utilizada por el sector agrícola y que la degradación del suelo a consecuencia de las acciones del ser humano incrementa a grandes pasos.

La degradación del suelo y agua por la explotación excesiva, desmedida y sin ningún fundamento conservacionista, se ha convertido en una problemática de origen antropogénico que preocupa desde el punto de vista ambiental. La manera en la que los productores trabajaban el suelo ha sido, posiblemente, la causa raíz de la degradación que hoy en día se vive en muchas zonas agrícolas.

Por ejemplo, el uso indiscriminado de terrenos no aptos para la siembra como lo son las laderas con potencial degradativo alto, sumado a una serie de prácticas agrícolas incorrectas, es una de las causas que llevan al aceleramiento de la degradación de los recursos naturales, pues es importante recordar que conforme aumenta la longitud de la ladera cultivada, se incrementa la superficie de captación de escorrentía, generando como resultado que los caudales de agua se concentren, aumenten su velocidad y por lo tanto, incrementen su capacidad erosiva (36).

La aplicación desmedida e indiscriminada de químicos como herbicidas y similares para mantener el suelo limpio, es otra causa importante de degradación que era muy común hace unos años y que incluso en este momento se sigue encontrando. Esta práctica, además de generar contaminación al ambiente, da como resultado suelos desnudos que son susceptibles a la erosión, la cual remueve con el tiempo los nutrientes, microorganismos y demás elementos que componen el suelo (37).

Por otro lado, la siembra en las cercanías de nacientes suma a la problemática de la degradación afectando no sólo al suelo sino también al recurso agua, debido a la consecuente contaminación por el uso inadecuado y excesivo de agroquímicos y también, por la sedimentación resultante del arrastre del suelo a diferentes cuerpos de agua.

Además de la producción de cultivos y alimentos, otras actividades económicas como la ganadería propician la degradación del suelo y agua si no se administran correctamente bajo un esquema de conservación adecuado. Se debe recordar que los sistemas de explotación ganadera generan inevitablemente compactación excesiva que provoca cambios en las propiedades físicas del suelo, las cuales modifican a su vez sus propiedades químicas y biota pues están directamente ligadas (38). Dicha compactación se traduce en la reducción de las dimensiones de sus poros, restricción de la penetración de las raíces, reducción de la tasa de infiltración de la lluvia y conductividad hidráulica, aumento de la densidad aparente y de la resistencia superficial.

3.3.1. Erosión hídrica y pérdida de suelo

Las actividades económicas que hacen uso incorrecto del suelo, propician las condiciones para que fenómenos como la erosión causen la degradación. La erosión, aunque se cataloga como un proceso natural, puede generar desgaste debido a que consiste en el desprendimiento de partículas de suelo y/o fragmentos de roca por acción del agua o viento (39). Al ser un fenómeno natural, su tasa de progresión es la responsable de parte de la formación de suelo, pero al acelerarse dicha tasa por acción antropogénica (del ser humano) se transforma en un proceso de degradación que puede ser destructivo.

La FAO (2015) (25) explica que de todos los tipos de erosión existentes, la erosión por agua o también llamada erosión hídrica, es la causa más común de degradación de suelos en la región de América Latina y el Caribe. La precipitación es el elemento que provoca la erosión hídrica pues se comporta como agente erosivo a través del impacto de las gotas de lluvia y la tensión ejercida por la esorrentía.

Existen tres tipos de erosión hídrica que pueden afectar los terrenos ante la presencia de agua de lluvia.

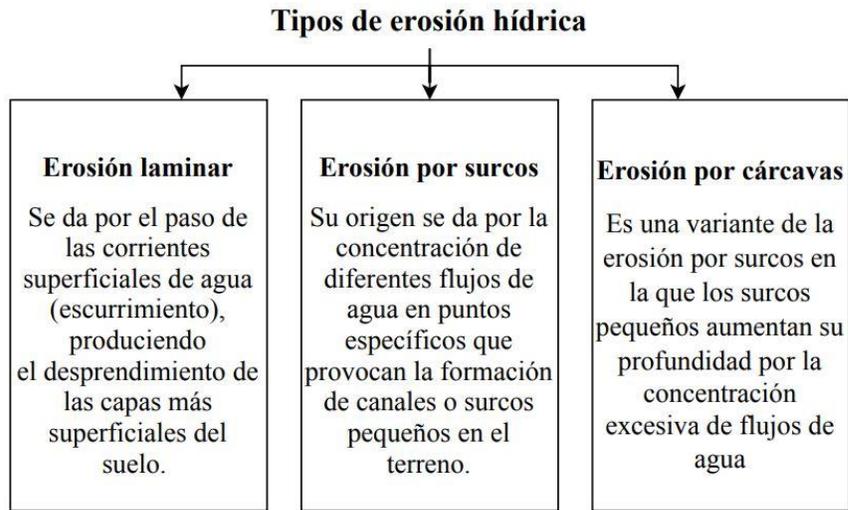


Figura 2. Tipos de erosión hídrica que afectan al suelo.

Elaboración propia con información proporcionada por Díaz (2011) (40).

La erosión provocada por corrientes de agua se divide en tres subprocesos que dan como resultado la degradación del suelo, tal como se resume en la **Figura 3**.

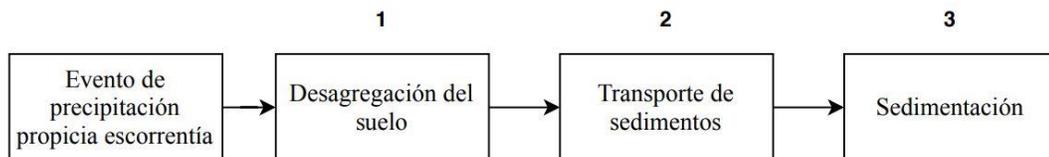


Figura 3. Componentes generales del proceso de erosión.

Elaboración propia con información proporcionada por Díaz (2011) (40).

Angulo y Beguería (2013) (41) explican más detalladamente que el proceso erosivo causado por la lluvia inicia por el efecto de salpicadura de las gotas que al impactar contra la superficie del suelo con poca o nula cobertura, dan paso a dos procesos consecutivos: el primero, que consiste en la compactación y formación de una costra y el segundo, donde se da la disgregación de las partículas del suelo y su consecuente desplazamiento o movimiento

causado por el escurrimiento superficial del agua. Dentro de las propiedades que caracterizan a los eventos de lluvia que promueven la erosión del suelo se encuentra: la cantidad, distribución, velocidad, tamaño de gota, duración e intensidad (42); lo más común pero no regla general es que entre mayor sea la intensidad y duración de las lluvias, mayor será el potencial de erosión.

Es importante mencionar que la cobertura vegetal en el suelo modifica el potencial erosivo que pueda tener el agua de lluvia; por ejemplo, al existir poco recubrimiento vegetativo, se promueve aún más el desprendimiento de sedimentos por la acción de las corrientes de agua y viceversa. Dicha cobertura intercepta el agua de lluvia, reduce la capacidad de arrastre de la escorrentía, incrementa la resistencia del suelo al aumentar su contenido de materia orgánica junto con el amarre de las raíces, estabiliza su estructura y promueve la actividad de macro y microorganismos por la actividad biológica asociada a la descomposición de la materia orgánica (43), lo que se traduce en una mayor calidad de suelo.

En zonas donde se llevan a cabo actividades agrícolas, es importante el uso de coberturas vegetales pues con estas se reduce considerablemente el efecto erosivo del agua, sobre todo en terrenos con fuertes pendientes (44). Camargo (2017) (42) menciona que mientras más larga e inclinada sea la pendiente de un terreno con una pobre cobertura vegetal, el suelo será afectado en mayor grado por la erosión hídrica; además, cuanto mayor sea la capacidad de transporte del agua en forma de escurrimiento, mayor será la tasa de pérdida de suelo por este tipo de erosión.

3.3.2. Degradación de suelo en Costa Rica: Caso de la cuenca del Río Jesús

María

Costa Rica no está exenta de la problemática que representa la degradación del suelo ya que según los datos más actualizados brindados por la Comisión Asesora Sobre Degradación De Tierras (CADETI), el 10% de los suelos del país padecen serios inconvenientes de degradación, lo que representa cerca de 5 110 kilómetros cuadrados del territorio erosionados, principalmente, por el fuerte impacto ambiental generado por la producción agropecuaria (45).

El Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Degradación de la Tierra y Sequía (PAN) desarrollado por CADETI, realizó un estudio bajo una metodología de priorización que identificó a la cuenca del Río Jesús María (RJM) como la más degradada del país. Dicha cuenca se ubica en la vertiente Pacífica de Costa Rica y cuenta con una extensión territorial de 375,5 km², lo cual representa cerca del 0,73 % del total de la superficie nacional (46).

La cuenca RJM se encuentra rodeada por las cuencas Barranca al norte y Tárcoles al este y sur (47), y se compone de las subcuencas de los ríos Jesús María, Paires, Machuca, Cuarros y Surubres. Tal como se aprecia en la **Figura 4**, esta cuenca al poseer un área importante, se compone de 14 distritos pertenecientes a los cantones de Esparza, Garabito, Orotina, San Mateo, San Ramón, y una pequeña fracción de Atenas y Palmares (2), por lo que su extensión incluye desde zonas altas hasta otras al nivel del mar.

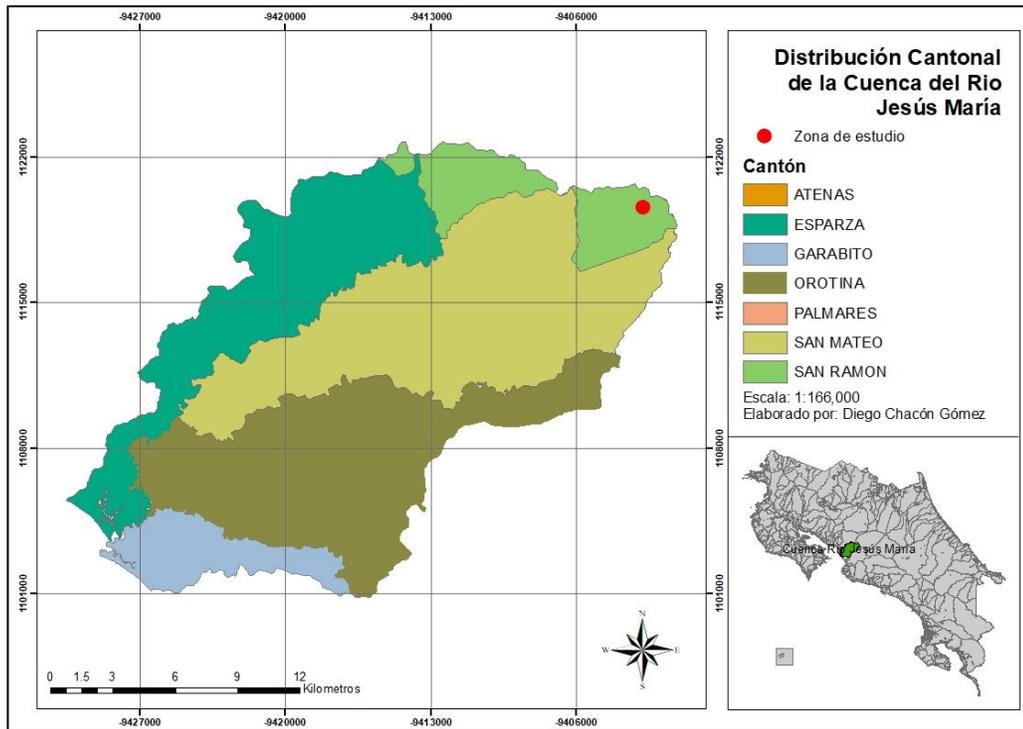


Figura 4. Distribución territorial de los cantones que conforman la cuenca del Río Jesús María (Proyección CRTM05, Datum: WGS84).

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por Atlas (2014) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) (48).

Desde hace más de 400 años, el uso del suelo más importante en casi toda la cuenca se concentra en la ganadería extensiva y producción de pastos, aunque la producción hortícola, cañera y frutal también es parte esencial de la cultura y subsistencia de los habitantes de la zona. Estas actividades, al remover gran parte de la cobertura vegetal, han incrementado desde sus inicios las probabilidades de degradación del lugar ya que el perfil topográfico alto con pendientes de terreno muy pronunciadas, especialmente las que se presentan en la parte

alta de la cuenca, aceleran el movimiento de escorrentía y arrastre de sedimentos ante eventos de precipitación (2).

La actividad cafetalera en la parte alta de la cuenca es una de las actividades económicas más populares entre sus habitantes. Alrededor de 3000 hectáreas de café se han reportado en dicha zona de la cuenca, lo que hace de este cultivo una de las fuentes más importantes de desarrollo socioeconómico del lugar (2).

La expansión de este cultivo en la zona se caracterizó desde sus inicios por el uso de prácticas agrícolas ineficientes y poco sostenibles, entre las que se encuentra la remoción de la cobertura vegetal del suelo, siembra en terrenos con altas pendientes con suelos desnudos y con una alta probabilidad de erosión por escorrentía superficial, terrenos sin árboles de sombra, entre otros. Todos estos factores han promovido la inevitable degradación del suelo y su consecuente pérdida cuenca abajo.

El uso de herbicidas para mantener limpios los terrenos sin ningún tipo de maleza fue una práctica contraproducente muy popular que se utilizaba entre los productores hace varios años. Con esto se dejaba al descubierto el suelo, lo cual incrementaba considerablemente su susceptibilidad a la erosión por agua ante eventos de precipitación. Adicional a esto, el Ingeniero Agrónomo Carlos Barboza (2021) (37), quien ha estado involucrado en proyectos en esta cuenca, menciona que el uso de herbicidas en climas nubosos como el que se encuentra en la cuenca RJM, puede dar paso al crecimiento de una “lana verde” impermeable

sobre la superficie del suelo que reduce la capacidad de este para absorber e infiltrar el agua, provocando así su escurrimiento por la superficie.

Con respecto a los estratos del suelo, se ha reportado que producto de la erosión que ha afectado a esta zona desde hace muchos años, en algunas fincas cafetaleras de la parte alta el horizonte A del suelo es muy delgado y en algunos casos, el suelo ni siquiera cuenta con dicho horizonte debido a la pérdida total del mismo (37). Se debe recordar que el horizonte A conforma parte del estrato cultivable del suelo y es en el que se encuentra una gran cantidad de materia orgánica necesaria para desarrollar los diferentes procesos naturales, por lo que su ausencia representa un impacto ambiental considerable y una disminución de la fertilidad y consecuente bajo rendimiento del cultivo de café.

Es importante mencionar que se ha demostrado que algunas de las áreas utilizadas actualmente para la siembra de café en la cuenca se catalogan como “Clase VII”, la cual, según la *Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras Agroecológicas de Costa Rica* (49), determina que este tipo de terrenos no son del todo aptos para la actividad cafetalera pues tienen severas limitaciones, por lo que su uso sólo debería estar asociado a actividades de reforestación o regeneración forestal (50).

En general, la suma de todas las prácticas llevadas a cabo por el sector agrícola y pecuario en esta cuenca ha resultado en el deterioro progresivo de su recurso suelo. La pérdida de suelo es una de las consecuencias directas de la erosión por agua ya que dicho proceso provoca la deposición de suelo fértil en el cauce de los ríos y el posterior arrastre de estos

sedimentos aguas abajo, lo que resulta en la pérdida inevitable de nutrientes, microorganismos y otros elementos que sustentan los procesos que se dan en el suelo (51); esto se traduce, entre otras cosas, en rendimientos bajos de los cultivos y en un aumento de los costos de producción por compra de fertilizantes.

3.4. Proyectos de conservación en la Cuenca Alta del Río Jesús María

La conservación del suelo y agua tiene como objetivo principal la preservación de las condiciones normales y equilibradas de estos recursos mediante la implementación de prácticas, técnicas y obras constructivas. A este concepto se asocia el de sostenibilidad ambiental, que aplicado al campo de la agricultura se define como la implementación de tecnologías modernas para el mejoramiento de la producción mientras se protegen y mejoran activamente los recursos naturales de los que se depende (52).

Los métodos de conservación de suelo y agua son la herramienta necesaria para llevar a cabo un plan de mitigación o prevención de la degradación de estos recursos. En términos generales, se componen de prácticas, técnicas, y obras constructivas cuya función principal se centra en evitar la afectación directa de condiciones degradadoras cuya fuente proviene, en casi todos los casos, de las actividades desarrolladas por el ser humano.

En el caso de la cuenca del Río Jesús María, en el 2011 se presentó un Plan de Manejo Integral de la cuenca desarrollado por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y que fue implementado por CADETI. Dicho Plan ha dado paso desde su creación, a la ejecución de otros proyectos que tienen como objetivo aumentar la cobertura

arbórea, mejorar el uso, manejo y conservación de suelos, proteger el recurso hídrico y mejorar la infiltración del agua en el suelo. El desarrollo de estos proyectos se ha realizado a nivel de microcuencas con el fin de obtener un manejo integral de toda la cuenca (37).

Un proyecto específico de conservación de suelo y agua en esta cuenca fue el que desarrolló CADETI en coordinación con el Programa de Pequeñas Donaciones (PPN) del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), con fondos del Fondo Mundial para el Medio Ambiente (*GEF por sus siglas en inglés*). Desde el 2012, se dio a la tarea de ayudar e instruir a los productores de café en la construcción de **acequias de ladera y gavetas de infiltración** como obras de conservación mecánicas para la conservación de suelo y agua (4). Como resultado, actualmente se contabilizan cerca de 210 km de acequias de ladera y un sin número de gavetas construidas y distribuidas en diferentes fincas, lo que representa aproximadamente a unos 700 productores involucrados en la lucha contra la degradación en esta zona (53).

Además de la construcción de estas obras, se ha inculcado en los productores el uso de otras estructuras mecánicas como el canal de guardia, el cual se considera una acequia de ladera de mayor tamaño que se construye con el objetivo de aislar los cafetales de las aguas de escorrentía que provienen de caminos, cunetas de la carretera, o en general, de áreas que interceptan grandes cantidades de agua (54).

A continuación se detallan las obras de conservación mecánicas de mayor importancia en la parte alta de la cuenca RJM y que conforman el objetivo de estudio de esta investigación.

3.4.1. Acequias de ladera

Las acequias de ladera son zanjas o canales que se construyen a través de la pendiente del terreno con el objetivo de controlar de manera segura el flujo de agua de lluvia antes de que adquiera velocidad erosiva que desgaste el suelo, desviando la escorrentía de las zonas inclinadas hasta un punto más estable en el terreno donde se pueda dar la infiltración del agua; de esta manera se evita el arrastre y posterior pérdida de sedimentos (55). Esta es una de las obras más utilizadas para la conservación de suelos y agua en zonas con pendientes de hasta 40 % y longitudes largas. Es importante mencionar que debido a la conformación estructural de este tipo de obras de conservación, para que su control erosivo sea eficiente, entre ellas se deben aplicar prácticas agronómicas como barreras vivas con el fin de amortiguar la velocidad del agua.

Algunos de los beneficios asociados a la implementación de acequias de ladera en sistemas productivos agrícolas son:

- Infiltración parcial o total del agua de lluvia para evitar escurrimiento y posterior arrastre de sedimentos de suelo.
- Retención del agua de lluvia en el suelo, por lo que se conserva la humedad por más tiempo.
- En laderas, evitan que el agua que va cuesta abajo aumente en volumen y velocidad.
- Reducción de la tasa de pérdida de suelo y nutrientes esenciales por erosión hídrica.



Figura 5. Acequia de ladera para conservación de suelo y agua en cultivos de café en la cuenca alta del Río Jesús María. Fuente: Barboza (2021) (37).

El Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) (2012) (56) hace la diferenciación entre las acequias de ladera a nivel y a desnivel; la diferencia más significativa entre estas dos radica en que las primeras se construyen sin ningún grado de pendiente por lo que se recomiendan para zonas con baja precipitación lluviosa mientras que las segundas se construyen con cierta pendiente para recibir el agua de escorrentía y luego drenar el exceso fuera del área de cultivo, por lo que se recomiendan para zonas con alta precipitación lluviosa y suelos con baja capacidad de infiltración (como los arcillosos). En el caso de las acequias de ladera a desnivel (las más utilizadas) se les debe aplicar una inclinación que puede ir de 0,5 % a un 2 %.

3.4.2. Gavetas de infiltración

Las gavetas son estructuras sencillas que se pueden definir como “agujeros” rectangulares de poca profundidad que se construyen con el fin de frenar el agua de escorrentía para que se infiltre a través del suelo y recoger los sedimentos de suelo que esta arrastra (57). Como

parte del agua de escorrentía que se recolecta con las acequias de ladera arrastra sedimentos importantes del suelo que se deben captar de nuevo, las acequias se combinan generalmente con gavetas para que se dé la sedimentación del suelo erosionado y la infiltración de una fracción de esta agua (54). Como estos sedimentos se depositan en el fondo de las gavetas, se requiere un trabajo periódico de “desenterramiento” para asegurar el correcto funcionamiento de la obra (57).



Figura 6. Gaveta de infiltración para conservación de suelo y agua en cultivos de café en la cuenca alta del Río Jesús María. Fuente: Barboza (2021) (37).

Según la literatura, las dimensiones recomendadas de las gavetas de infiltración son de aproximadamente 40 cm de ancho, 100 cm de largo y 20 cm de fondo (56). Está claro que a diferencia de las acequias de ladera, las gavetas no tienen la capacidad suficiente de recoger toda el agua en un evento de precipitación, por lo que una parte de esta se pierde ladera abajo junto con los sedimentos que arrastra. Esto se debe considerar en el dimensionamiento de la

gaveta pues el caudal en cada caso puede variar y por lo tanto, las dimensiones recomendadas también.

3.4.3. Otros esfuerzos de conservación en fincas cafetaleras de la cuenca alta

3.4.3.1. Prácticas de conservación de suelos y agua adicionales

En la parte alta de la cuenca se implementan, además de las acequias y gavetas, otro tipo de prácticas de conservación como lo son las terrazas continuas utilizadas para evitar el escurrimiento del agua pendiente abajo y, similar a estas, se construyen también terrazas individuales, que consisten en formar terrazas pequeñas para cada planta de café, removiendo suelo de la parte superior donde se sembró el cafeto y pasándola a la parte inferior para que de esta manera quede a nivel y el agua no escurra y pueda infiltrarse (37).

Según Barboza (2021) (37), la siembra en contorno es una práctica cultural que se ha arraigado entre los productores a partir de la implementación de los proyectos de conservación desarrollados en la cuenca. Esta consiste en sembrar el cultivo en hileras que van en contra de la pendiente, siguiendo las curvas de nivel para que sirvan de barrera u obstáculo para el agua de lluvia; de esta manera, se limita la velocidad, fuerza y consecuentemente el potencial erosivo del agua (54).

Es importante mencionar también que en la parte alta de la cuenca por recomendación de los diferentes entes involucrados en los proyectos, se ha comenzado a emplear cada vez más las barreras vivas como complemento de las obras mecánicas de conservación (58). El pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) es el más utilizado en este caso para la estabilización de

las acequias de ladera, gavetas, terrazas y canales de guardia; con su uso se evita que entren sedimentos a la estructura y que se produzcan rupturas (54).

El Ingeniero Agrícola Donald Vásquez (2021) (58), quien ha estado involucrado en la intervención de las fincas cafetaleras de la parte alta de la cuenca, explica que todas estas obras y estructuras de conservación tienen un mismo objetivo, es decir, retener el suelo y el agua de escorrentía, promoviendo su infiltración para aumentar el contenido de humedad de los suelos.

El uso de buenas prácticas agrícolas como la adición de materia orgánica al suelo en forma de abonos, uso de cobertura vegetal muerta (maleza) en la superficie del suelo y disminución considerable del uso de herbicidas (37), también ha sumado a la lucha contra la degradación en esta zona.

Según colaboradores del CADETI (2021) (37) y (58) esta intervención con estructuras de conservación y demás prácticas culturales ha generado un impacto positivo sobre el suelo de la cuenca, al aminorar hasta cierto punto la degradación que ha sufrido desde hace muchos años.

3.4.3.2. Sistemas agroforestales: uso de sombra en cafetales

La implementación de buenas prácticas de manejo de cultivos es la herramienta imprescindible para reducir y evitar la degradación del suelo. Una de las alternativas más utilizadas por sus aportes a la calidad del suelo y productividad es la agroforestería, que se

define como una combinación entre vegetación de sombra y cultivos y que tiene como fin principal la intensificación de la agricultura y a su vez, la conservación de los recursos (59).

En términos generales, los sistemas agroforestales contribuyen al mantenimiento y mejoramiento de las condiciones normales de la calidad del suelo debido a que la presencia de árboles inmersos en los cultivos ayuda al control de procesos degradativos como la erosión y supone el ingreso de materia orgánica a la matriz del suelo en forma de raíces, hojas y ramas (60). Dicha materia es uno de los componentes más importantes del suelo pues está directamente ligada a propiedades y procesos ecosistémicos como su estructura, capacidad de retención de agua y proveer diferentes ciclos de nutrientes.

Las especies leñosas perennes en sistemas agroforestales son consideradas importantes secuestradoras de carbono ya que, aunque la habilidad del suelo para acumular este elemento se debe a algunas de sus propiedades, prácticas agrícolas de este tipo pueden influenciar su toma y almacenamiento (60). Pandey, citado por Casanova et al. (2011) (61), explica que los árboles en sistemas agroforestales fijan carbono de la atmósfera mediante la fotosíntesis y luego lo transfieren al suelo en forma de desechos orgánicos. Generalmente, estas reservas de carbono almacenadas en el suelo disminuyen debido a que muchos de los suelos agrícolas actúan como fuente de gases de efecto invernadero (*GEI*), reduciendo parte importante del carbono original depositado en la matriz; este problema puede ser remediado parcialmente implementando un sistema agroforestal (62) debido al potencial que tienen los árboles y arbustos para tomar y almacenar CO₂ atmosférico.

En general, los servicios agroforestales ofrecidos por los árboles impactan positivamente las propiedades del suelo, la abundancia de diversidad y funciones de la biota, su calidad y salud. Los árboles crean un microclima y modifican el suelo; por ejemplo, las hojas interceptan las gotas de lluvia y reducen su potencial erosivo, proveen sombra al cultivo y al suelo, agregan constantemente materia orgánica en forma de hojas y ramas incrementando sus nutrientes, entre otros. Estos procesos modifican, a su vez, la temperatura, humedad, contenido de nutrientes e influyen la vida en el suelo en forma de microorganismos (63).

3.4.3.3. Impacto de los servicios agroforestales sobre la calidad del suelo

El uso de árboles de sombra combinados con cultivos de café (SAF: sistema agroforestal) es una práctica ampliamente utilizada en el mundo debido a los beneficios y aportes al suelo, por lo que se ha experimentado con una larga lista de especies. En Costa Rica, específicamente, se emplea con mucha frecuencia las especies de árbol *Erythrina poeppigiana*, *Chloroleucon eurycyclum*, *Terminalia amazonia* (64), *Inga (edulis, densiflora, oerstediana, laurina)* (65), entre otros.

La regulación del microclima de los cafetales gracias a la acción de los árboles y su sombra es uno de los beneficios más importantes que brindan los sistemas agroforestales. El efecto regulador del dosel permite variar la cantidad y calidad de luz que ingresa al sistema, modifica la temperatura del aire y suelo (66) y protege el café de las grandes variaciones de temperatura (65). Por su parte, la velocidad del viento en el cultivo disminuye en presencia de árboles y la humedad se conserva en el suelo por más tiempo.

Lin (2009) (67), en una serie de investigaciones sobre la pérdida de agua del suelo en cultivos de café en México, demostró el impacto de la sombra de árboles en sistemas agroforestales sobre la reducción de la temperatura del suelo, resultando en menores cantidades de humedad o agua pérdida por evapotranspiración, es decir, por evaporación del suelo y transpiración del cultivo.

El reciclaje de nutrientes es otro de los aportes esenciales al suelo que brindan los servicios agroforestales ya que la materia orgánica en forma de hojas, ramas y residuos orgánicos en general que se adicionan al suelo, le aportan una serie de nutrientes que mejoran sus condiciones de calidad y fertilidad. Uno de los elementos que contiene dicha materia orgánica es el nitrógeno el cual se obtiene generalmente por la acción de los árboles, especialmente cuando estos tienen la capacidad de fijar este elemento (65).

Para que los cafetos puedan acceder y asimilar este nitrógeno, se llevan a cabo dos procesos naturales desarrollados por microorganismos en el suelo: el primero consiste en la mineralización que transforma el nitrógeno inorgánico en amonio (NH_4^+) y el segundo es la nitrificación que parte del amonio para obtener nitrato (NO_3^-). Este aporte de nitrógeno asimilable al suelo es muy importante si se considera que la producción de café representa un gasto muy importante de este elemento del suelo (66).

El carbono es otro de los elementos aportados por los árboles en SAF a partir de la materia orgánica. Ovalle (2016) (68), realizó una investigación en la que estudió diferencias entre las reservas de carbono almacenadas en suelos con cultivo de café a pleno sol y con SAF. En

general, demostró que los SAF con café en muchas de las zonas cafetaleras de Costa Rica, almacenan mayores contenidos de carbono que un sistema a pleno sol, haciendo hincapié en que la densidad, especie de árbol de sombra y las condiciones ambientales del sitio son determinantes en la cantidad de carbono que el sistema puede almacenar.

Por otra parte, la adición constante de materia orgánica al suelo por parte de los árboles y arbustos (en forma de hojas, ramas y desechos orgánicos en general) reduce los efectos de la erosión laminar al generar una capa “protectora” superficial que permite incrementar la infiltración del agua de lluvia y reducir su escorrentía.

Blanco y Aguilar (2015) (43) mencionan la importancia de los sistemas agroforestales aplicados como técnica de conservación en el sector cafetalero. Los cultivos de café expuestos directamente al sol generalmente tienen menor cobertura vegetal, por lo tanto, las tasas de erosión y escorrentía son mucho más altas comparadas con las que se dan en una plantación con sombra (69). La sombra que generan los árboles y arbustos, así como las hojas que desprenden, ayudan a conservar la humedad en el suelo y a aumentar su contenido de materia orgánica, dándole mayor protección ante procesos erosivos. Además, se menciona que los árboles de sombra, especialmente en cultivos en ladera, podrían evitar la erosión por movimiento de masa debido a que sus raíces cruzan los horizontes de deslizamiento (66).

3.5. Parámetros y consideraciones de diseño de obras de conservación

Aunque las acequias de ladera pueden considerarse “zanjas” o canales sencillos cuyo objetivo es guiar el agua ante un evento de precipitación, es importante recordar que este tipo

de obras, para que funcionen correctamente, deben diseñarse guiándose en una serie de parámetros ya establecidos para que puedan ser capaces de soportar adecuadamente el caudal “Q” de agua que se presenta en el lugar. El primer factor por considerar es la geometría del canal ya que de esta dependen otros elementos de diseño de las acequias de ladera. Generalmente, para este tipo de obras se suelen emplear formas trapezoidales, tales como las que se muestran en la **Figura 7**.

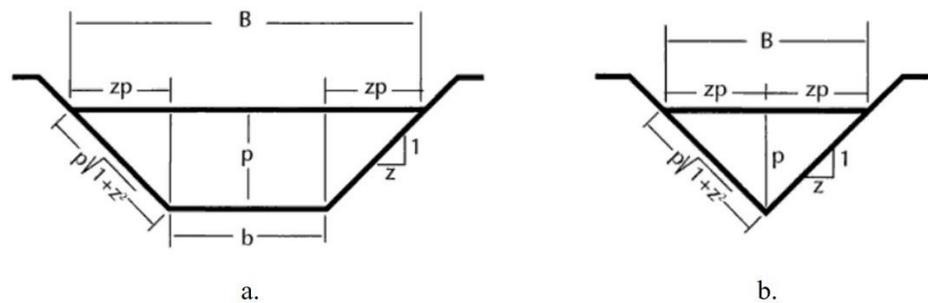


Figura 7. Sección a. trapezoidal y b. triangular utilizadas en el diseño de canales (75).

Como se puede observar, las dos secciones se pueden expresar en “medidas” o elementos similares, donde:

B: espejo de agua o superficie libre de agua.

p: tirante de agua o altura que el agua adquiere en la sección transversal.

b: base de fondo o ancho de solera.

z: inclinación del talud.

$p\sqrt{1+z^2}$: longitud de las paredes.

Ahora bien, Zúñiga (70) explica que el diseño de las acequias de ladera lo que pretende es establecer estos valores involucrados en la geometría de la acequia, es decir, la base de fondo del canal “b”, el tirante de agua “p” y la inclinación del talud “z”, con el fin de lograr que la obra tenga la capacidad suficiente de evacuar el caudal “Q”, en una pendiente “S”.

Lo primero que se debe calcular es el caudal de diseño “Q” que representa la máxima escorrentía presente en el terreno. Este caudal puede determinarse por varios métodos avalados para canales, aunque para obras de conservación como las acequias de ladera es común utilizar el método racional, en el que se supone que la máxima escorrentía ocasionada por una lluvia se produce cuando la duración de ésta es igual al tiempo de concentración (71).

$$Q = \frac{CIA}{360} (m^3/s) \quad (1)$$

Donde:

- Q: caudal máximo o descarga, en m³/s.
- C: coeficiente de escorrentía que depende del relieve, textura, cobertura vegetal.
- I_m: intensidad máxima de la lluvia producida en un tiempo determinado e igual al tiempo de concentración de la cuenca, se expresa en mm/h.
- A: área de recepción o drenaje, en ha.

Como se puede observar, esta fórmula está condicionada por tres variables que deben ser calculadas previamente; comenzando con la intensidad máxima de lluvia, la cual está depende de la duración de lluvia de diseño y un periodo de retorno que se escoge tomando

en consideración el tipo de obra a construir (en este caso, se recomienda que sea de 5 a 10 años). Luego, se calcula el tiempo de concentración por medio de una fórmula, ya sea la de Kirpich, California, Izzard, entre otras, las cuales dependen a su vez de la máxima longitud del cauce de drenaje y la diferencia de cotas entre los puntos extremos del cauce. Con el tiempo de concentración es posible ahora calcular el coeficiente de escorrentía, que puede obtenerse a partir de tablas en la literatura, según la cobertura y tipo de suelo y la pendiente del terreno.

Una vez determinado el caudal a evacuar, se establecen los valores de diseño de acuerdo a las condiciones de suelo: estructura, textura, permeabilidad o conductividad hidráulica, esto mediante la fórmula de Manning mostrada a continuación (70).

$$Q = \frac{1}{n} \cdot \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}} \cdot S^{1/2} \quad (2)$$

Donde:

Q: caudal a evacuar, (m³/s).

A: área hidráulica, (m²).

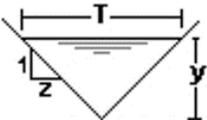
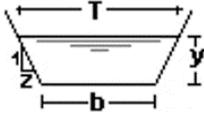
P: perímetro mojado, (m).

S: pendiente del fondo del canal.

n: coeficiente de rugosidad.

Para hacer uso de esta ecuación se debe primero establecer cuál será la geometría del canal para así determinar las fórmulas a emplear y luego, conocer los valores recomendados para la base y talud del canal, la pendiente según el tipo de suelo y el coeficiente de Manning.

Tabla 1. Relaciones geométricas de las secciones más utilizadas en canales agrícolas.

Sección	Área hidráulica "A" (m ²)	Perímetro mojado "P" (m)	Radio hidráulico "R _h " (m)	Espejo de agua "T" (m)
 Triangular	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+(2zy)$

Adaptado de: Marín, Menjívar y Zavaleta.

Al sustituir las fórmulas del área hidráulica y el perímetro mojado en "A" y "P" respectivamente en las variables de la ecuación (2), se puede despejar el tirante "y" y así conocer la profundidad total de la acequia de ladera.

El siguiente paso en el diseño de las acequias de ladera es el cálculo de la velocidad del agua que va a transitar por ellas; la velocidad de esta agua no debe ser erosiva, es decir, debe fluir sin causar erosión lateral (en los taludes) o en el fondo del canal (72). Para su cálculo, se utiliza la ecuación 3, que se relaciona con la fórmula de Manning (70).

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (3)$$

Donde:

V: velocidad del flujo del agua dentro del canal (m/s).

R: radio hidráulico, A/P, (m).

S: pendiente del fondo del canal.

n: coeficiente de rugosidad.

El resultado de velocidad obtenido con esta ecuación debe ser comparado con la velocidad máxima no erosiva permisible para estructuras de evacuación de aguas, con el fin de corroborar que no sobrepase los límites ya establecidos por la literatura para los diferentes tipos de canales existentes.

El último paso en el diseño es el distanciamiento entre acequias de ladera, el cual puede ser determinado por el método de Hudson, citado por Zúñiga (70), que descompone la distancia entre canales en un vector horizontal y uno vertical, para después relacionarlos en una tercer ecuación.

$$IV = (a \cdot P) + b \quad (4)$$

$$IH = \frac{IV}{P} \cdot 100 \quad (5)$$

$$D = \sqrt{IV^2 + IH^2} \quad (6)$$

Donde:

IV: intervalo vertical (m).

IH: intervalo horizontal (m).

D: distancia entre acequias (m).

a: factor de lluvia.

b: factor de suelo y cobertura.

P: pendiente del terreno (%).

3.6. Agricultura en la cuenca del Río Jesús María: cultivo de café

El suelo de la cuenca del Río Jesús María se caracteriza por ser utilizado por una lista de 10 actividades que se distribuyen desde la parte alta hasta la baja, dependiendo de las necesidades de la población. El CATIE, en su Plan de Manejo para esta cuenca (73) identificó diez usos de suelo en toda la cuenca, entre los que se encuentran:

1. Bosque secundario o regeneración natural.
2. Café.
3. Cultivos (agricultura tradicional de subsistencia como granos básicos, melón, sandía).
4. Frutales.
5. Charral (vegetación secundaria que crece luego de actividades agrícolas o ganaderas).
6. Pasturas (pasturas mejoradas sin árboles y con baja densidad de árboles).
7. Teca (cultivo de árboles maderables).
8. Manglar.

9. Urbano.

10. Agua.

El uso del suelo en la cuenca ha cambiado drásticamente, pues como en muchas zonas del país, ha pasado de tener paisajes ocupados por bosques, a otros utilizados para la explotación de actividades económicas. Faustino et al. (2011) (73) afirma que las distintas áreas de la cuenca RJM probablemente iniciaron su proceso de deforestación hace muchas décadas atrás y en la actualidad son paisajes altamente fragmentados.

Centrándose en la parte alta de la cuenca, en esa zona el cultivo de café se ha popularizado a tal punto que la mayoría de sus pobladores se dedican al desarrollo de este cultivo. Según información recabada por el programa COMDEKS de la iniciativa Satoyama en la cuenca RJM (2), la parte alta se encuentra ocupada, casi en su totalidad, por plantaciones pequeñas de café de pequeños agricultores.

En zonas ubicadas en la parte alta de la cuenca, específicamente en comunidades de San Ramón, se ha demostrado que la producción de café se ha desarrollado en terrenos de alta pendiente con suelos muy frágiles, empleando exceso de herbicidas debido a que el clima del lugar propicia el desarrollo de varias enfermedades del cultivo (74). Todo esto tiene como resultado una disminución de la calidad del suelo en términos fisicoquímicos, pobre presencia de materia orgánica y pérdida de suelo fértil, lo que se traduce en una disminución de la productividad de los cultivos.

Las consecuencias de la erosión del suelo por actividades agrícolas como la siembra de café no solo tienen impactos negativos en el sitio donde se da el problema de degradación, sino que también pueden provocar daños ambientales fuera de este. Ejemplo de problemas generados por la degradación del suelo en sitios cercanos son la sedimentación en ríos y embalses, detrimento de la calidad del agua y cambios en los patrones hidrológicos (75).

En el caso de esta cuenca, existe la hipótesis de que el sector cafetalero es uno de los causantes del problema recurrente de sedimentación que se da en la parte baja, específicamente en Puerto Caldera, ya que los procesos de erosión en la parte alta dan paso al arrastre de sedimentos que acaban en los ríos y por consiguiente en las desembocaduras. Dicho esto, es importante mencionar que no se puede atribuir completamente la responsabilidad a este sector ya que en la zona existen también otras actividades degradadoras del suelo que pueden tener parte en esta problemática como por ejemplo los caminos internos de fincas que no tienen buen manejo de esorrentía (2).

A continuación se resumen los dos tipos de sistemas de producción de café utilizados en la cuenca.

3.6.1. Cultivo a pleno sol (monocultivo)

El cultivo de café expuesto a plena exposición solar es una práctica muy común en todo el mundo debido a la popularidad de este producto en el mercado, lo que ha provocado el desarrollo de plantaciones en grandes extensiones de tierra de manera intensiva sin ningún tipo de sombra. Este tipo de manejo de cultivo no implementa dentro del área de siembra,

árboles, arbustos u otro tipo de vegetación de sombra, por lo que los cafetos y el suelo quedan expuestos a distintas condiciones ambientales. En el caso de la cuenca del RJM, este manejo de cultivo fue muy implementado hace muchos años, cuando aún la degradación de suelos no era un tema prioritario para los productores y el uso de prácticas de conservación no era común. Actualmente, todavía existen fincas en la parte alta de la cuenca donde no se implementan árboles dentro de la zona de siembra de café.

3.6.2. Cultivo bajo sombra (agroforestal)

La siembra de café combinada con el uso de diferentes tipos de árboles, arbustos y similares, se ha convertido en una práctica de conservación muy utilizada por los productores debido a sus aportes a las condiciones del cultivo en términos de salud y productividad, así como a la calidad del suelo. Este tipo de manejo de cultivo, llamado comúnmente “Sistema Agroforestal” (*SAF*) provee una serie de beneficios al cultivo de café que se derivan de la capacidad protectora que brindan los árboles o arbustos y su sombra. En la cuenca, desde que comenzó el proyecto de intervención de conservación, muchas fincas han seguido las recomendaciones de los expertos al sembrar árboles de sombra como roble (*Quercus robur*), corteza amarilla (*Tabebuia ochracea*), caoba (*Swietenia macrophylla*), guaba (*Inga edulis*), entre otros, notando los beneficios asociados a estos.

4. METODOLOGÍA

4.1. Área de estudio

El área de estudio del proyecto se ubica en la parte alta de la cuenca del Río Jesús María, específicamente en Llano Brenes, en el distrito de San Rafael de San Ramón, provincia de Alajuela, Costa Rica (2).

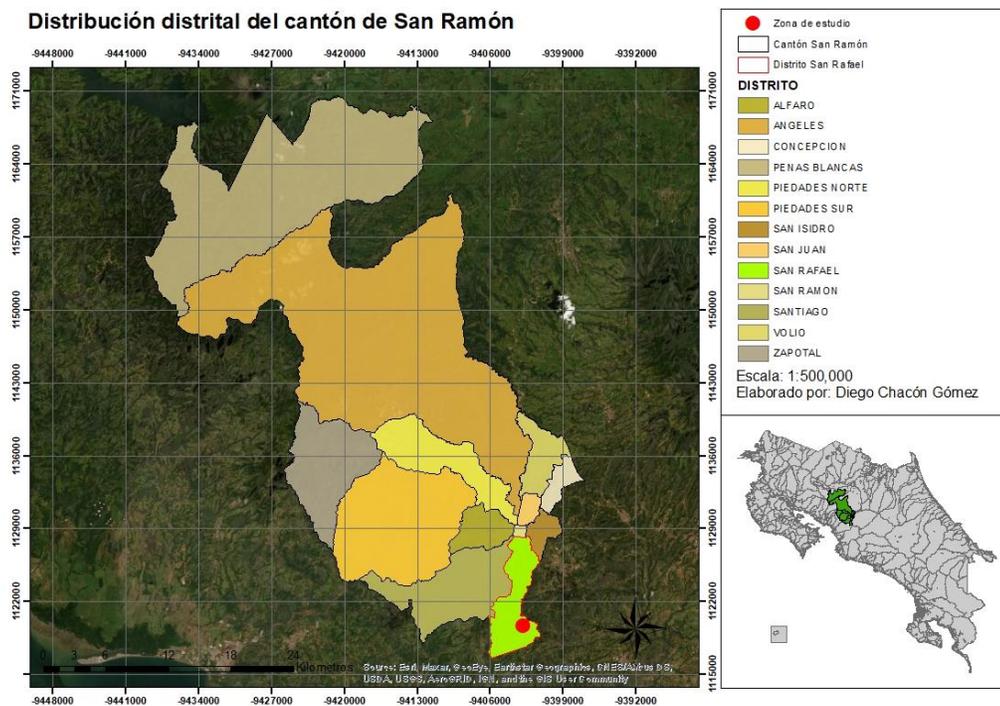


Figura 8. Distribución de los distritos que conforman el cantón de San Ramón, donde se ubica la zona de estudio. (Proyección CRTM05, Datum: WGS84).

Fuente: Elaboración propia con capas proporcionadas por Atlas (2014) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) (48).

Como se puede observar en la **Figura 8**, el distrito de San Rafael, donde se encuentra la zona de Llano Brenes, se ubica en la parte baja del cantón de San Ramón, en la fracción de este cantón que pertenece a la cuenca del Río Jesús María.

4.2. Selección de las fincas de estudio

Se seleccionaron dos fincas intervenidas por la Comisión Asesora sobre Degradación de Tierras (CADETI), con apoyo de agencias de extensión del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) en la zona de Llano Brenes de San Rafael de San Ramón. Dichas intervenciones consistieron en la construcción de estructuras de conservación de suelo y agua, específicamente acequias de ladera y gavetas de infiltración, como parte de un esfuerzo colectivo en la lucha contra la degradación del suelo de la zona.

Con el objetivo de estudiar el efecto de las intervenciones con estructuras de conservación en el suelo, se incluyó el estudio de dos modalidades de producción (o sistema de manejo de cultivo) comunes en la zona: café a pleno sol (monocultivo) y café bajo sombra (agroforestal con más de 15 años bajo sombra).

Ambas fincas han sido intervenidas por CADETI y el MAG, por lo que las medidas y prácticas de conservación aplicadas, en específico, estructuras de conservación de suelo y agua, han sido las mismas, así como el tiempo en que fueron ejecutadas dichas intervenciones. Las dos fincas cuentan con suelo de orden Entisol, variedad de café, e igual manejo agronómico y ambas, al momento del análisis, contaban con cinco años de haber sido intervenidas.

4.2.1. Selección de parcelas dentro de las fincas

Se seleccionaron para el estudio las parcelas demarcadas por el proyecto de tesis de doctorado del Programa de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con Énfasis en Suelos titulado “*Determinación de la relación entre la escorrentía, la erosión del suelo y la lluvia en una plantación de café bajo sombra en la cuenca alta del río Jesús María*”, el cual estudió el efecto de las obras de conservación de suelos y aguas implementadas en fincas de la zona sobre la escorrentía del agua y pérdida de suelo.

En la finca cafetalera bajo manejo agroforestal, se utilizaron 9 parcelas de 80 m² cada una (4 m x 20 m), divididas como sigue: 3 parcelas intervenidas con acequias de ladera (sombra + AC), 3 parcelas intervenidas con gavetas de infiltración (sombra + GV) y 3 parcelas no intervenidas utilizadas como control (sombra + CT). Del mismo modo, en la finca con producción de café a plena exposición solar (monocultivo), se seleccionaron de 9 parcelas de 80 m² cada una (4 m x 20 m), con el fin de obtener 3 parcelas intervenidas con acequias de ladera (sol + AC), 3 parcelas intervenidas con gavetas de infiltración (sol + GV) y 3 parcelas no intervenidas utilizadas como control (sol + CT).

4.3. Caracterización de las fincas seleccionadas para el estudio

Se realizó una caracterización individual de las dos fincas seleccionadas para el estudio (agroforestal y monocultivo), en la que se incluyó aspectos como su ubicación, tamaño, sistema productivo actual, tipo de suelo, tipos de árboles de sombra (si aplica), prácticas de manejo de cultivo y topografía. Los detalles y demás información referente a las prácticas

agrícolas y de manejo de la finca se obtuvieron mediante entrevistas con los dueños o trabajadores de la finca.

Como complemento, se caracterizó la topografía del entorno en donde se ubican estas fincas, por medio de un modelo digital de elevación (DEM *por sus siglas en ingles*) y un modelo de pendientes desarrollados en ArcGIS 10.8. Para generar dichos recursos, se extrajo la capa de curvas de nivel a cada 10 m para Costa Rica del servidor del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) y se modificó el contorno de la cuenca RJM obtenida de la capa de cuencas del ATLAS 2014 del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC).

4.4. Caracterización de las estructuras de conservación de suelo y agua implementadas en las fincas de estudio

Se realizó una entrevista al Ingeniero Donald Vásquez Pacheco (2021) (58), especialista en conservación de suelos e integrante de CADETI. Vásquez, ha estado involucrado en el proyecto de intervención con obras de conservación de la parte alta de la cuenca del RJM desde sus inicios en 2012, en su papel como asesor en la implementación y construcción de las acequias de ladera y gavetas de infiltración en las fincas productoras de café.

En la entrevista realizada, se obtuvo información referente a los pasos iniciales que fueron necesarios para dar comienzo al proyecto de intervención, criterios para la escogencia de las obras de conservación específicas utilizadas en la cuenca, dimensiones características de estas obras y su ubicación dentro de las fincas, uso de otras obras y prácticas de conservación

complementarias, manejo y mantenimiento de las obras, entre otros temas de interés relacionados a la caracterización de la intervención de conservación realizada.

4.5. Muestreo del suelo

En cada una de las parcelas de estudio se sustrajo una muestra de suelo a una profundidad de 30 cm, compuesta por 8 diferentes puntos aleatorios. Dichas muestras se tomaron en el suelo alrededor de las obras de conservación que se benefician de la implementación de estas en las parcelas. Las evaluaciones se realizaron en el mes de setiembre de 2019, luego de aproximadamente 5 años de intervención de las fincas con acequias de ladera y gavetas como medidas de conservación de suelo y agua.

4.6. Análisis de laboratorio

Las muestras de suelo fueron analizadas en el Laboratorio de Aguas, Suelos y Ambiente, e Investigaciones Varias de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas. Para cada uno de los parámetros de calidad de suelo estudiados se realizaron en el laboratorio cinco repeticiones de cada análisis por parcela. A continuación se detallan los procedimientos llevados a cabo en el laboratorio.

4.6.1. Contenido de humedad

Muestras de 50 g de suelo húmedo fueron colocadas en un horno a 105 °C durante 24 horas para eliminar por calor el agua contenida. Una vez finalizado este proceso, se pesó la masa de cada muestra en una balanza analítica para determinar el peso seco (la pérdida de peso debido al secado es considerada como el peso del agua) (76). Previo al pesaje, se permitió

que las muestras alcanzaran temperatura ambiente en un desecador. Con la ecuación (7), se determinó el contenido de humedad en porcentaje para cada muestra.

$$W(\%) = \frac{(PH - PS)}{PS} \cdot 100 \quad (7)$$

Donde:

W: contenido de humedad del suelo (%).

PH: peso húmedo del suelo (g).

PS: peso seco del suelo (g).

Los valores de contenido de humedad obtenidos a partir de esta metodología en laboratorio, corresponden a un solo muestreo realizado el mismo día, por lo que este indicador no se estudió a lo largo de un periodo de tiempo definido (es decir, considerando diferentes días de muestreo).

4.6.2. Densidad aparente

Se utilizó un cilindro de metal de volumen conocido (5 cm de diámetro x 5 cm altura) en el cual se recolectó la muestra de suelo; posteriormente, dicha muestra se secó a 105°C en el laboratorio durante 24 h en un horno. Una vez establecido el peso seco de la muestra en la balanza se calculó la densidad aparente dividiendo dicho peso entre el volumen del cilindro (39).

4.6.3. Porosidad

La porosidad (Φ) de cada muestra se determinó por medio de la relación existente entre la densidad aparente (ρ_a) y la densidad real del suelo (19), para los cual se empleó la ecuación (8). En este caso, se utilizó $2,65 \text{ g/cm}^3$ como la porosidad real (ρ_r) del suelo (18).

$$\Phi = 1 - (\rho_a/\rho_r) \quad (8)$$

4.6.4. Conductividad hidráulica

Las muestras de suelo se llevaron al laboratorio de suelos del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), donde se determinó la conductividad hidráulica con un permeámetro de carga constante.

4.6.5. Contenido de materia orgánica del suelo

Para calcular la cantidad de carbono orgánico en el suelo, se determinó primero el porcentaje de materia orgánica mediante el método de pérdida de peso por ignición, o e inglés Weight Loss On Ignition (WLOI). Para ello, se secó por 24 h en un horno a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ una alícuota de 50 g de suelo obtener el peso seco del suelo. Posteriormente, la muestra se calcinó en una mufla a 450°C por 24 h para obtener el peso calcinado. Previo al pesaje, se permitió que las muestras alcanzaran temperatura ambiente en un desecador. El contenido de materia orgánica (MO%) se determinó utilizando la siguiente ecuación (77).

$$MO(\%) = \frac{[PS(105^\circ \text{C}) - PC(450^\circ \text{C})]}{PS(105^\circ \text{C})} \cdot 100 \quad (9)$$

Donde:

PS (105 °C): peso seco del suelo (g).

PC (450 °C): peso calcinado del suelo (g).

4.6.6. Carbono orgánico del suelo

El cálculo de carbono orgánico en el suelo (COS) se realizó utilizando el porcentaje de materia orgánica y la ecuación (10) (77):

$$COS(Mg \cdot ha) = \frac{VS \cdot DA \cdot MO}{2} \quad (10)$$

Donde:

VS: volumen del suelo (profundidad de 30 cm) ($m^3 \cdot ha^{-1}$).

DA: densidad aparente del suelo ($Mg \cdot m^{-3}$).

MO: materia orgánica del suelo (%).

4.6.7. Fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo

Se utilizó el método descrito por Feller et al. (1991) (78), que explica que muestras de 50 g de suelo seco deben pesarse y se colocarse en frascos de polietileno de 250 cm^3 , a los que se añada 180 mL de agua destilada y 10 perlas de vidrio (6 mm de diámetro). Las botellas se colocaron en un agitador rotatorio con una frecuencia de 50 rpm durante 16 h; después, las muestras se tamizaron en húmedo utilizando tamices de acero inoxidable con aberturas de 53 y 212 micras. La materia que pasó por el tamiz de 53 micras se vertió en un recipiente y se dejó decantar por 24 h con una solución de CaCl_2 1M a razón de 2 mL por cada 200 mL

de solución. A partir de esto se obtuvieron las clases de tamaño de agregados: macro agregados (> 212 micras) de la que se separó la fracción liviana por flotación (hasta 2 mm), meso agregados (entre 212-53 micras) y micro agregados (< 53 micras). Todas las fracciones se secaron a 50 grados y por último se pesaron.

4.7. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante el software Minitab y utilizando como complemento InfoStat 2020, verificando inicialmente la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilk modificado. Se realizaron transformaciones matemáticas como recíproco, \log_2 y \log_{10} a los datos de los indicadores de calidad que lo requerían, con el fin de utilizar pruebas paramétricas que suponen normalidad de los datos.

Para determinar si el tipo de sistema productivo de café influía sobre los indicadores de calidad analizados, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías, empleando como factores el tipo de sistema productivo y el tratamiento (tipo de obra de conservación utilizada), y como variable de respuesta cada uno de los indicadores de calidad de suelo.

4.7.1. Comparaciones múltiples entre tratamientos para cada sistema productivo

Para determinar si existían diferencias significativas entre el suelo intervenido con acequias de ladera y el control y entre el suelo intervenido con gavetas y el control, para cada sistema productivo, se realizaron análisis de varianza de una vía (ANOVA) acompañadas de la prueba Post Hoc de “Dunnett” de comparación múltiple por pares.

Se extrajeron los valores residuales de las pruebas de ANOVA para analizar el cumplimiento de los supuestos del modelo, es decir, la normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk modificado y homogeneidad de varianzas (homocedasticidad) con la prueba de Levene. Con esto, fue posible determinar que dicha prueba era una buena opción para los datos de cada indicador de calidad. Las pruebas se realizaron bajo un nivel de significancia del 95%.

4.7.2. Comparaciones entre sistemas productivos

Se utilizó la prueba paramétrica “T de Student” para comparar los indicadores de calidad de los dos sistemas productivos, con un nivel de significancia del 95%.

5. RESULTADOS

5.1. Caracterización de la zona de estudio

5.1.1. Cuenca del Río Jesús María

Se generó un Modelo Digital de Elevación (*DEM por sus siglas en inglés*) a partir de las curvas de nivel a cada 10 m proporcionadas por el servidor del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT).

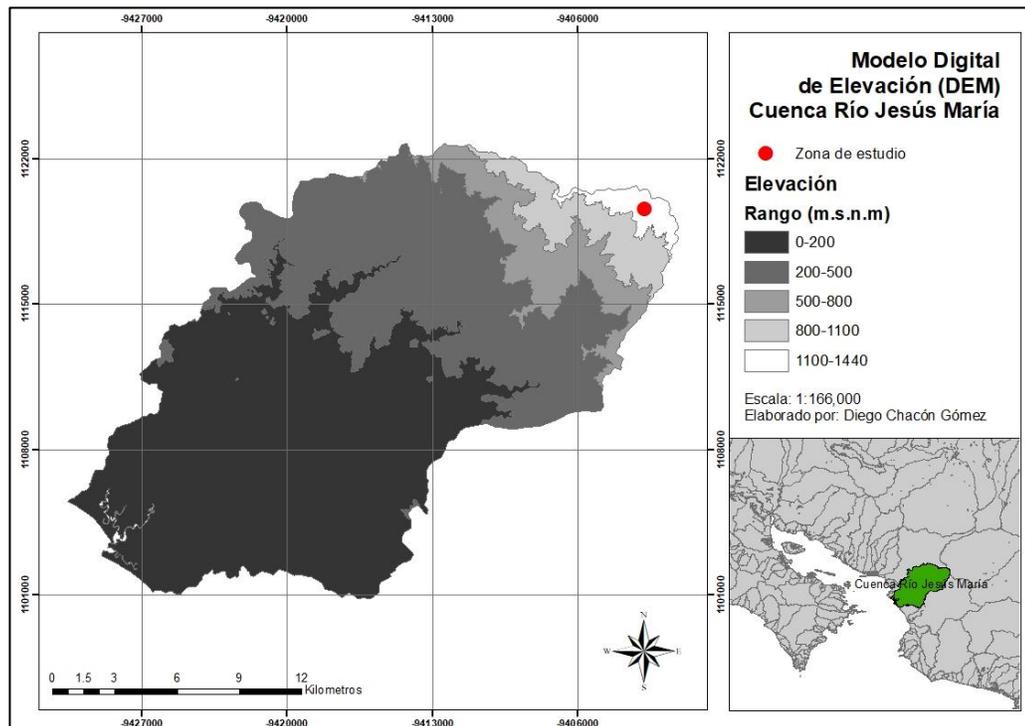


Figura 9. Modelo digital de elevación (DEM) de la cuenca del Río Jesús María.

(Proyección CRTM05, Datum: WGS84).

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por SNIT y Atlas (2014) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) (48).

Por otra parte, en la **Figura 10** se presenta un modelo de las pendientes de la cuenca RJM generado a partir del DEM y clasificado según las categorías de pendiente en función del relieve incluidas en la *Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras Agrológicas de Costa Rica* (49).

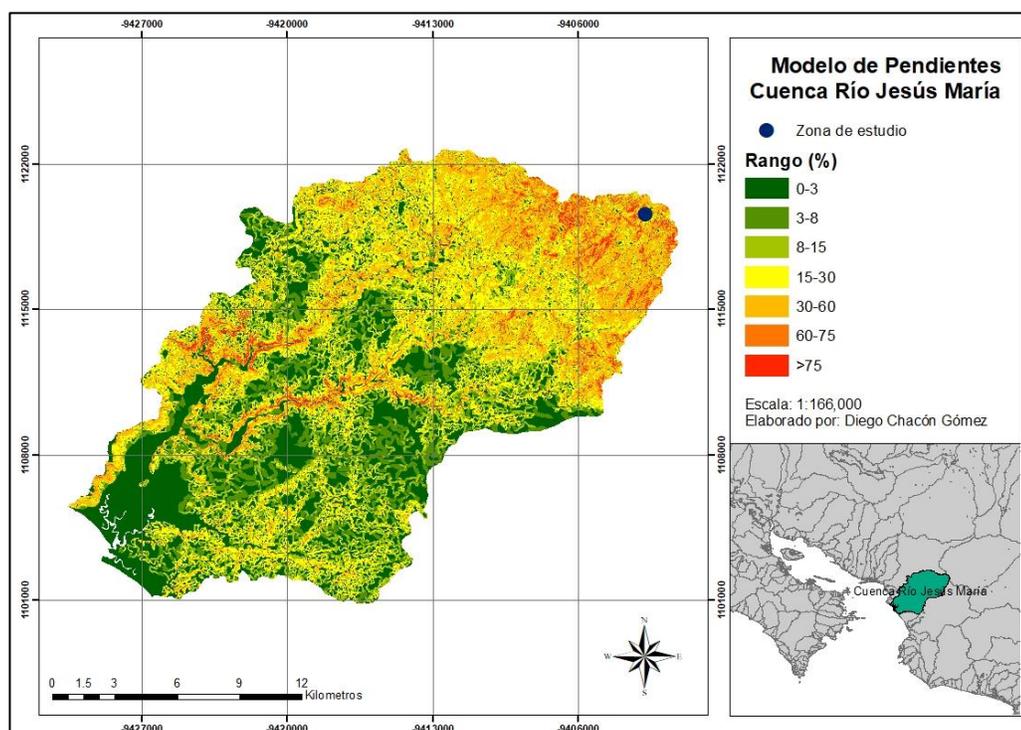


Figura 10. Modelo de pendientes del terreno de la cuenca del Río Jesús María.
(Proyección CRTM05, Datum: WGS84).

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por SNIT y Atlas (2014) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) (48).

Como se puede observar en la **Figura 9**, el rango de elevaciones en la cuenca va desde los 10 m.s.n.m en la parte más baja y cercana a la costa, hasta los 1440 m.s.n.m cerca del cantón de San Ramón. De la parte más baja hasta aproximadamente la mitad de la cuenca (zona

media), las elevaciones no superan los 200 m.s.n.m, mientras que de este punto hasta llegar a la zona más alta, se dan incrementos importantes de altitud.

Las fincas seleccionadas para el estudio se ubican una a la par de la otra en la parte alta, a una elevación de 1345 m.s.n.m, la cual se cataloga como una de las más altas de la cuenca. Debido al incremento en la elevación conforme se moviliza de la parte media a la alta, las pendientes que se encuentran en dicha sección tienden a aumentar, por lo que los terrenos utilizados para llevar a cabo prácticas agrícolas tienden a presentar un relieve irregular con declives considerables. En las fincas de estudio, predominan mayoritariamente terrenos con pendientes entre 25% a 30%.

En la parte alta de la cuenca, un estudio muestra que existen terrenos con susceptibilidad de deslizamiento moderada (46).

5.2. Caracterización de las fincas seleccionadas para el estudio

5.2.1. Finca: sistema bajo sombra (SAF)

La finca con manejo de cultivo bajo sombra (SAF) seleccionada para el estudio es una plantación de café con más de 35 años de existencia, propiedad del señor José Joaquín Jiménez. En la **Tabla 2** resumen algunas de las características de la finca.

Tabla 2. Características generales de la finca bajo sistema productivo de café sombreado (SAF).

Coordenadas geográficas	10,006279 N 84,466413 O	Tipo de relieve	Ondulado
Área total	5771 m ²	Régimen humedad del suelo	Ústico
Altitud estimada	1345 m.s.n.m	Condición agronómica	Café sombreado (20% sombra, con árboles separados a 20 m).
Pendiente	30%	Manejo de erosión	Acequias de ladera y gavetas
Dirección de pendiente	220 grados azimut		

En la finca se ha sembrado café de distintas variedades, tales como Villa Sarchí, Caturra y Catuaí a una densidad de siembra de 2 m x 1.5 m y se ha implementado la siembra de árboles para proveer sombra al cultivo. Algunas de las especies sembradas son el aguacate (*Persea americana*), laurel falso (*Litsea glaucescens*), poró (*Erythrina* sp.) y guayaba (*Psidium* sp) (ver **Figura 11**).



Figura 11. Sistema de producción de café con manejo agroforestal en la parte alta de la cuenca RJM.

La finca se encuentra ubicada en la parte alta de la cuenca, a una altitud de 1345 m.s.n.m y presenta un relieve catalogado como “fuertemente ondulado” lo que concuerda con la información proporcionada por el modelo de pendientes generado (*Figura 10*). Como sucede en muchos de los terrenos de la zona, la pendiente de esta finca es pronunciada (30 %), por lo que la degradación por erosión hídrica producto del potencial erosivo del agua de escorrentía ante eventos de precipitación, es latente.

Con respecto al tipo de suelo de la finca, el Mapa Digital de Suelos de Costa Rica del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica indica que la zona en la que se ubica presenta un suelo de orden de los Entisoles (79), subgrupo Typic Ustorthents con textura franco-arcillosa a una profundidad de 25 cm (80).

5.2.2. Finca: sistema a pleno sol (monocultivo)

La finca bajo sol se ubica en la parte de la finca agroforestal a una altitud de 1345 m.s.n.m y presenta un relieve catalogado como “fuertemente ondulado” lo que concuerda (al igual que la finca agroforestal) con la información proporcionada por el modelo de pendientes generado (*Figura 10*). La pendiente promedio de esta finca es pronunciada, de alrededor de 30 %.



Figura 12. Sistema de producción de café con manejo a pleno sol en la parte alta de la cuenca RJM.

En la *Tabla 3* se resumen algunas de las características de esta finca (80).

Tabla 3. Características generales de la finca bajo sistema productivo de café a pleno sol.

Coordenadas geográficas	10,006279 N 84,466413 O	Tipo de relieve	Ondulado
Área total	4690 m ²	Régimen humedad del suelo	Ústico
Altitud estimada	1345 m.s.n.m	Condición agronómica	Café a pleno sol (sin sombra)
Pendiente	30 %	Manejo de erosión	Acequias de ladera y gavetas
Dirección de pendiente	220 grados azimut		

5.3. Intervención con obras de conservación en la cuenca RJM en las fincas de estudio

5.3.1. Antecedentes y planeación del proyecto de intervención

De acuerdo a la entrevista realizada al Ingeniero Agrícola y colaborador de CADETI, Donald Vásquez Pacheco, la intervención de las fincas en la cuenca se debió a la expansión descontrolada de la agricultura en la cuenca y el uso de prácticas inadecuadas de manejo de cultivos. Dicha problemática se hizo visible en el 2004 por el Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Degradación de la Tierra y Sequía (PAN) desarrollado por CADETI, cuando realizó un estudio que identificó a esta cuenca como la más degradada del país (58).

Según indica Vásquez, la intervención con acequias de ladera y gavetas de infiltración en la parte alta de la cuenca comenzó con la selección de los productores de café dispuestos a colaborar con el proyecto, accediendo a implementar dichas obras en sus fincas. En total, se seleccionaron a 30 productores en cada uno de los sectores que conforman la parte alta (por

ejemplo, Llano Brenes, Pata de Gallo, Berlín, entre otros). Este proyecto a escala era manejado por la Asociación de Desarrollo de cada lugar con la fiscalización de CADETI como ente guía (58).

Vásquez (2021) (58), también menciona que CADETI realizó un diagnóstico individual en cada finca seleccionada para el proyecto que incluía una valoración de la topografía y relieve (pendiente), tipo de suelo, sistema de producción de café y cobertura vegetal del suelo. Debido a la inversión económica que representan los análisis de laboratorio, se decidió realizar un estudio de contenido de carbono y nitrógeno en 10 de las fincas seleccionadas como muestra representativa, con el fin de obtener valores de referencia para cuantificar y comparar los efectos de la intervención en el tiempo, desde el inicio del proyecto en adelante. Dichos valores no están disponibles al momento de esta investigación.

Con respecto a la selección de las acequias de ladera y gavetas de infiltración como obras de conservación a utilizar en la cuenca, Vásquez (2021) (58) explica que estas se han utilizado desde hace más de 20 años en diferentes sectores y latitudes como estructuras para la retención de suelo, disminución de la degradación por erosión hídrica y como herramienta para la captación e infiltración del agua en el suelo.

Es por esto que los encargados de la planeación del proyecto de intervención decidieron escoger a estas obras como las idóneas para aplicar a esta zona, pues según menciona Vásquez (2021) (58), recomendables para lugares donde la precipitación supera los 2000 mm/año, con terrenos con pendientes que alcanzan hasta el 50%; características que

coinciden con las de la cuenca RJM. Por lo tanto, es posible decir que el uso de estas obras en la cuenca se basa en experiencias positivas en otras zonas del país y a nivel internacional, donde han generado un impacto positivo en el suelo y en el combate de la degradación de este.

5.3.2. Construcción de las obras de conservación

Según Vásquez (2021) (58), al inicio del proyecto, se empleó una metodología en la que se involucraba a los expertos de CADETI y a los productores de café para la construcción de las obras de conservación. Los trazos de las acequias de ladera se realizaron utilizando el codal bajo su guía como experto en el tema y la mano de obra requerida para desarrollar las estructuras de conservación estaba a cargo del productor. Para esto, se hacía una pequeña demostración de seis metros para explicar a los productores la forma correcta de construir las obras y como forma de fiscalización, se realizaban visitas constantes para asegurar la continuidad y correcta implementación del proyecto en las fincas (58).

Es importante mencionar que como la mano de obra corría por cuenta de los productores, CADETI les proveía herramientas y equipos como palas, cuchillos, moto guadañas y bombas de atomizar, además plantas de café para sembrar. La cantidad de estos beneficios dependía de los metros de obras de conservación (acequias de ladera y gavetas) que el productor construyera en su finca (58).

5.3.3. Caracterización de las obras de conservación implementadas

5.3.3.1. Acequias de ladera

Según Vásquez (2021) (58), el diseño de las acequias utilizadas en la cuenca se basó en dimensiones ya establecidas y estudiadas desde hace varios años, que nacen a partir de experiencias en otras zonas cafetaleras en laderas con pendientes y condiciones climáticas (precipitación anual) similares a las que se encuentran en la parte alta de la cuenca.

Además de las acequias de ladera, se construyeron canales de guardia como obras complementarias para la captación del agua que no se infiltra en las acequias y la que proviene de caminos y fincas aledañas. En las fincas, tanto las acequias como los canales de guardia se construyeron con geometría trapezoidal. En la **Tabla 4** se resumen las dimensiones utilizadas por los productores para construir estas dos obras, por recomendación de CADETI y MAG desde el inicio del proyecto y que se mantienen como norma en la actualidad.

Tabla 4. Dimensiones características de las acequias de ladera y canales de guardia implementados en fincas cafetaleras de la parte alta de la cuenca RJM.

Obra de conservación	Geometría	Base (m)	Altura (m)	Talud
Acequia de ladera	Trapezoidal	0,40	0,20	1:1 (45°)
Canal de guardia	Trapezoidal	0,50	0,40	1:1 (45°)

Como se puede observar en la **Tabla 4**, ambas obras de conservación se construyen con un talud de 45° y como estas se posicionan de forma transversal a la pendiente, su talud superior

es de mayor longitud que el inferior. Esto provoca que la altura medida desde la base en el talud inferior, sea menor que la que existe desde la base en el talud superior.

La única diferencia que existe entre la intervención de las fincas es el distanciamiento entre acequias, ya que esta depende de la pendiente; entre más pronunciada, más cerca se construyen las obras entre sí y viceversa. Según Vásquez (2021) (58), la distancia horizontal promedio entre acequias de ladea en la parte alta de la cuenca es de 14 metros.

Las acequias de ladera no se utilizan en terrenos con pendientes muy pronunciadas (de 50% en adelante) ya que por su conformación, el talud superior sería considerablemente grande y la estabilidad de la obra se vería comprometida. En general, este tipo de obra de conservación ha sido bien aceptada, pues Vásquez (2021) (58) menciona que ha colaborado con su trazado en más de 500 ha dentro de la cuenca.

5.3.3.2. Gavetas de infiltración

Las gavetas de infiltración son utilizadas para retener sedimentos del suelo arrastrados por la escorrentía y a su vez, infiltrar dicha agua, lo cual ayuda a aumentar el contenido de humedad del suelo. Según Vásquez (2021) (58), para intervenir las laderas se generó primero una línea de contorno sobre la que se construyeron las gavetas de infiltración. Una vez generada esta guía, se excavaron las gavetas distribuyéndolas en forma de "pata de gallo", a fin de generar discontinuidad entre hileras. Con esto, se generó una matriz de gavetas separadas cada 2 metros en las fincas.

La geometría de las gavetas es rectangular y las dimensiones establecidas por el proyecto de intervención fueron las que se resumen en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Dimensiones características de las gavetas de infiltración implementados en fincas cafetaleras de la parte alta de la cuenca RJM.

Obra de conservación	Geometría	Ancho (m)	Longitud (m)	Profundidad (m)
Gaveta de infiltración	Rectangular	0,50	2,0	0,10

Considerando diferentes experiencias en fincas de la parte alta de la cuenca, Vásquez (2021) (58) explica que con estas dimensiones y siguiendo la distribución de las gavetas mencionada, en total se pueden tener 50 gavetas/ha.

Vásquez (2021) (58) también menciona que algunos productores también construyen gavetas de un metro cúbico (1 m^3) distribuidas en puntos específicos de su terreno. Estas, al ser de mayor capacidad que las convencionales, pueden recolectar más agua y sedimentos. Además, indica que en algunas fincas de la cuenca alta se construyen gavetas dentro de las acequias de ladera para aumentar la retención de suelo y potenciar la infiltración del agua.

5.3.4. Mantenimiento de las obras de conservación

Una vez implementadas las obras de conservación en las fincas, es de vital importancia generar un plan de mantenimiento correctivo constante con el fin de mantenerlas en óptimas condiciones para que así poder obtener los beneficios asociados a su uso. Vásquez (2021)

(58) indica que el mantenimiento de dichas obras está a cargo de cada productor dentro de su finca, con supervisión periódica de las respectivas agencias del MAG.

En el caso de las acequias de ladera y los canales de guardia, Vázquez (2021) (58) menciona que se les ha dado a los productores la pauta de que estas deben limpiarse al menos dos veces al año e idealmente una vez al mes, ya que se debe recordar que parte de los sedimentos que arrastra el agua de escorrentía que estas obras interceptan, se acumulan con el tiempo en su base, por lo que se deben remover y reubicar en otros puntos del terreno donde se puedan aprovechar. Esta tarea permite mantener la estructura inicial de la obra de conservación, lo cual permite su funcionamiento adecuado.

5.3.5. Capacitación a productores y seguimiento del proyecto

Según indica Vázquez (2021) (58), la capacitación ofrecida por los expertos de MAG y CADETI cuando inició el proyecto, fue la base sobre la cual los productores comenzaron a entender la importancia de la implementación de obras, sistemas y prácticas de conservación en sus fincas. Desde el inicio del plan, dentro de la capacitación se acordaron varias pautas importantes a seguir como parte del esfuerzo para revertir los efectos de la degradación del suelo en la parte alta de la cuenca:

- Reducir el uso o no utilizar herbicidas o químicos similares con el fin de promover el uso de cobertura vegetal en la superficie del suelo.
- No remover la cobertura vegetal del suelo por medio de “chapias” y realizar podas constantemente para incrementar el porcentaje de cobertura muerta sobre el suelo.

- Utilizar sombra en los cafetales cada 20 metros como herramienta para la protección del suelo y el cultivo.

Los agentes del MAG son los encargados de velar porque estas recomendaciones se estén desarrollando en las fincas de la parte alta de la cuenca, además de dar apoyo técnico en la implementación, uso y correcto mantenimiento de las acequias de ladera, canales de guardia y gavetas de infiltración. Para esto, se realizan visitas a las fincas para dar un seguimiento adecuado y para fiscalizar que las obras se están desarrollando correctamente y que está cumpliendo su función.

5.3.6. Estado de las fincas en estudio

Las fincas estudiadas se encuentran intervenidas en un 90 % del área de terreno en promedio, tanto con acequias de ladera como con gavetas de infiltración. En la **Figura 13** se ilustra una acequia de ladera promedio en la finca agroforestal.



Figura 13. Acequia de ladera en finca bajo manejo de cultivo agroforestal.

En la **Figura 14** se presenta una imagen de una gaveta de infiltración construida en un sistema de producción de café con manejo agroforestal.



Figura 14. Gaveta de infiltración en finca bajo manejo de cultivo agroforestal.

Por otra parte, en la **Figura 15** se presenta una imagen de una acequia de ladera promedio en la finca cafetalera con manejo de cultivo a pleno sol.



Figura 15. Acequia de ladera en finca bajo manejo de cultivo a pleno sol.

No se logró obtener información acerca de un estudio individual por finca para planificar la intervención, como indicó Vásquez (2021) (58) se trabajaron las mismas estructuras y

dimensiones para todas las fincas. Lo indicado por Vásquez (2021) (58) fue que los únicos parámetros medidos en 10 fincas fueron carbono orgánico y nitrógeno en el suelo, sin embargo se tuvo inicialmente la participación de 30 productores. No fue posible localizar la información de cuales fincas fueron muestreadas y los valores de esas mediciones.

Según indica Vásquez (2021) (58), el diseño de estas dos obras, que incluye la geometría, salud, base y altura, se determinó a partir de otras experiencias con estas obras en lugares con condiciones climáticas y de topografía similares a las que presenta la cuenca.

Las obras de conservación en ambas fincas se caracterizaron por un bajo mantenimiento. Se logró observar acequias de ladera y gavetas con importante contenido de sedimentos dentro de ellas. Este fue el comportamiento general observado en las fincas bajo estudio y es importante mencionar que no se observó colapso de estructuras en ninguna finca.

Los resultados obtenidos por Molina (2015) (50) en cuanto a la erosión en esta zona son importantes para este estudio. En su investigación, Molina realizó una clasificación de la capacidad de uso de tierras, concluyendo que las fincas analizadas (entre ellas, la finca agroforestal del presente estudio) entran dentro de la Clase VII, que según el MAG, posee importantes limitaciones para el desarrollo de actividades como lo es la producción agropecuaria, por lo que sólo deberían utilizarse como zonas de manejo forestal. Esto indica que dichas fincas no son aptas para la actividad cafetalera y deberían ser utilizadas solamente para actividades de reforestación. Molina (50) explica que las limitaciones asociadas a estos

terrenos son las altas pendientes, erosión, baja profundidad del suelo, alta pedregosidad y baja fertilidad.

Molina (2015) (50) también indica en su investigación que estas fincas presentan un notorio proceso de degradación y que presentan un poco desarrollo de estructura, además de que poseen características poco deseadas como la pérdida de nutrimentos, materia orgánica, pérdida gradual del horizonte A por erosión y por consiguiente, baja productividad.

5.4. Parámetros evaluados por tratamiento para cada sistema productivo

5.4.1. Sistema productivo bajo sombra (SAF)

Los resultados obtenidos a partir del análisis estadístico de comparaciones múltiples de los indicadores de calidad estudiados para el sistema productivo bajo sombra se muestran en la **Tabla 6** junto con los promedios y desviaciones estándar correspondientes a cada uno de estos. Los parámetros evaluados fueron: contenido de humedad, densidad aparente, porosidad total, conductividad hidráulica, contenido de materia orgánica, contenido de carbono orgánico, fraccionamiento físico (fracción liviana y pesada de la materia orgánica).

Tabla 6. Resultados de prueba ANOVA de dos factores para determinar influencia del tratamiento, sistema productivo y combinación de estos sobre los indicadores de calidad como variables de respuesta.

Indicador de calidad	Valor <i>p</i> por factor		
	Tratamiento	Sistema productivo	Tratamiento* Sistema productivo
Propiedades físicas			
Contenido humedad (%)			
Densidad aparente (g/cm ³)			
Porosidad (%)	<0,001	<0,001	<0,001
Conductividad hidráulica (cm/h)			
Materia orgánica			
Cont. materia orgánica (%)			
Cont. carbono orgánico (Mg C ha ⁻¹)	<0,001	<0,001	<0,001
Fraccionamiento físico			
Fracción liviana (g kgss ⁻¹)			
Fracción pesada (g kgss ⁻¹)	<0,001	<0,001	<0,001

Tabla 7. Resultados de comparación múltiple de los indicadores de calidad del suelo evaluados en el sistema productivo bajo sombra (SAF), utilizando la prueba estadística ANOVA.

Indicador de calidad	Tratamiento		
	Sombra + AC	Sombra + GV	Sombra + CT
Propiedades físicas			
Contenido humedad (%)	28,9 ± 1,00	25,8 ± 0,60	24,5 ± 0,46 a
Densidad aparente (g/cm ³)	0,85 ± 0,01	0,99 ± 0,02 a	0,99 ± 0,02 a
Porosidad (%)	67,9 ± 0,37	62,7 ± 0,83 a	62,5 ± 0,68 a
Conductividad hidráulica (cm/h)	10,5 ± 0,27	9,06 ± 0,04 a	9,04 ± 0,03 a
Materia orgánica			
Cont. materia orgánica (%)	4,37 ± 0,08	3,46 ± 0,19 a	3,42 ± 0,13 a
Cont. carbono orgánico (Mg C ha ⁻¹)	55,8 ± 1,25	51,2 ± 1,91 a	50,9 ± 1,61 a
Fraccionamiento físico			
Fracción liviana (g kgss ⁻¹)	4,18 ± 0,07	3,19 ± 0,06 a	3,12 ± 0,25 a
Fracción pesada (g kgss ⁻¹)	34,6 ± 0,30	36,6 ± 0,20 a	37,1 ± 0,24 a

* Las medias no etiquetadas con la letra **a** son significativamente diferentes a la media del nivel de control.

** Sombra + AC: suelo con acequias de ladera, Sombra + GV: suelo con gavetas, Sombra + CT: control.

*** Muestras extraídas del suelo de la finca cafetalera con manejo de cultivo bajo sombra (SAF) en el mes de setiembre, 2019, empleando 15 observaciones por tratamiento en cada indicador de calidad para obtener promedio y desviación estándar.

5.4.2. Sistema productivo a pleno sol (monocultivo)

Los resultados obtenidos a partir del análisis estadístico de múltiples de los indicadores de calidad estudiados para el sistema productivo a pleno sol se muestran en la **Tabla 8**, junto

con los promedios y desviaciones estándar correspondientes a cada uno de estos. Los parámetros evaluados fueron: contenido de humedad, densidad aparente, porosidad total, conductividad hidráulica, contenido de materia orgánica, contenido de carbono orgánico, fraccionamiento físico (fracción liviana y pesada de la materia orgánica).

Tabla 8. Resultados de comparación múltiple de los indicadores de calidad del suelo evaluados en el sistema productivo a pleno sol (monocultivo), utilizando la prueba estadística ANOVA.

Indicador de calidad	Tratamiento		
	Sol + AC	Sol + GV	Sol + CT
Propiedades físicas			
Contenido humedad (%)	21,3 ± 0,75 a	21,2 ± 0,69 a	20,9 ± 0,62 a
Densidad aparente (g/cm ³)	1,15 ± 0,04 a	1,18 ± 0,04 a	1,18 ± 0,05 a
Porosidad (%)	56,8 ± 1,56 a	55,4 ± 1,47 a	55,6 ± 1,93 a
Cond. hidráulica (cm/h)	8,34 ± 0,59	7,58 ± 0,42 a	7,54 ± 0,39 a
Materia orgánica			
Cont. materia orgánica (%)	2,28 ± 0,07 a	2,25 ± 0,03 a	2,24 ± 0,04 a
Cont. carbono orgánico (Mg C ha ⁻¹)	37,7 ± 2,09 a	36,9 ± 1,07 a	37,8 ± 1,73 a
Fraccionamiento físico			
Fracción liviana (g kgss ⁻¹)	3,06 ± 0,09 a	3,05 ± 0,09 a	3,02 ± 0,08 a
Fracción pesada (g kgss ⁻¹)	38,1 ± 0,35 a	38,2 ± 0,20 a	38,9 ± 0,15 a

* Las medias no etiquetadas con la letra **a** son significativamente diferentes a la media del nivel de control.

** Sol + AC: suelo con acequias de ladera, Sol + GV: suelo con gavetas, Sol + CT: control.

**** Muestras extraídas del suelo de la finca cafetalera con manejo de cultivo a pleno sol (monocultivo) en el mes de setiembre, 2019, empleando 15 observaciones por tratamiento en cada indicador de calidad para obtener promedio y desviación estándar.*

5.5. Comparaciones entre sistemas productivos

Los resultados obtenidos a partir del análisis estadístico de comparación de los indicadores de calidad del suelo estudiadas del sistema de café bajo sombra y a pleno sol se muestran en las **Tabla 9** y **Tabla 10** para el suelo intervenido con obras de conservación y para el suelo no intervenido, respectivamente.

Tabla 9. Resultados de comparación de los indicadores de calidad del suelo evaluados en el sistema productivo bajo sombra y a pleno sol para las parcelas intervenidas, utilizando la prueba estadística T-Student.

Indicador de calidad	Acequias de ladera		Gavetas de infiltración	
	Sombra	Sol	Sombra	Sol
Propiedades físicas				
Contenido humedad (%)	28,9 ± 1,00	21,3 ± 0,75	25,8 ± 0,60	21,2 ± 0,69
Densidad aparente (g/cm ³)	0,85 ± 0,01	1,15 ± 0,04	0,99 ± 0,02	1,18 ± 0,04
Porosidad (%)	67,9 ± 0,37	56,8 ± 1,56	62,7 ± 0,83	55,4 ± 1,47
Conductividad hidráulica (cm/h)	10,5 ± 0,27	8,34 ± 0,59	9,06 ± 0,04	7,58 ± 0,42
Materia orgánica				
Cont. materia orgánica (%)	4,37 ± 0,08	2,28 ± 0,07	3,46 ± 0,19	2,25 ± 0,03
Cont. carbono orgánico (Mg C ha ⁻¹)	55,8 ± 1,25	37,7 ± 2,09	51,2 ± 1,91	36,9 ± 1,07
Fraccionamiento físico				
Fracción liviana (g kgss ⁻¹)	4,18 ± 0,07	3,06 ± 0,09	3,19 ± 0,06	3,05 ± 0,09
Fracción pesada (g kgss ⁻¹)	34,6 ± 0,30	38,1 ± 0,35	36,6 ± 0,20	38,2 ± 0,20

Tabla 10. Resultados de comparación de los indicadores de calidad del suelo evaluados en el sistema productivo bajo sombra y a pleno sol para las parcelas no intervenidas, utilizando la prueba estadística T-Student.

Indicador de calidad	Sombra	Sol
Propiedades físicas		
Contenido humedad (%)	24,5 ± 0,46	20,9 ± 0,62
Densidad aparente (g/cm ³)	0,99 ± 0,02	1,18 ± 0,05
Porosidad (%)	62,5 ± 0,68	55,6 ± 1,93
Conductividad hidráulica (cm/h)	9,04 ± 0,03	7,54 ± 0,39
Materia orgánica		
Cont. materia orgánica (%)	3,42 ± 0,13	2,24 ± 0,04
Cont. carbono orgánico (Mg C ha ⁻¹)	50,9 ± 1,61	37,8 ± 1,73
Fraccionamiento físico		
Fracción liviana (g kgss ⁻¹)	3,12 ± 0,25 a	3,02 ± 0,08 a
Fracción pesada (g kgss ⁻¹)	37,1 ± 0,24 a	38,9 ± 0,15 a

* Las medias no etiquetadas con la letra **a** son significativamente diferentes.

6. DISCUSIÓN

6.1. Caracterización de las fincas intervenidas

A partir de la caracterización de las fincas estudiadas se puede inferir que la zona en la que se ubican presenta una topografía quebrada con pendientes promedio de 30 %. En general, los cultivos de café en esta parte de la cuenca presentan condiciones similares en cuanto a relieve, con suelos propensos a ser afectados por la erosión hídrica debido al aumento del potencial degradativo del agua. Es importante recordar que conforme aumenta la longitud de la ladera cultivada, se incrementa la superficie de captación de escorrentía, generando como resultado que los caudales de agua se concentren, aumenten su velocidad y por lo tanto, incrementen su capacidad degradativa (36).

Estas condiciones topográficas no han frenado a los productores de cultivar café en fincas con suelo susceptibles a degradación. Desde hace muchos años y en especial, antes de la intervención con obras de conservación, la producción de café en la parte alta no consideraba el efecto de la ladera y el agua ante eventos de precipitación. De acuerdo a la *Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras Agrológicas de Costa Rica* (49), terrenos con características de este tipo deben utilizar medidas intensivas de conservación del suelo, o bien, no ser cultivadas.

Ahora bien, la finca bajo sombra tiene una mayor área que la finca a pleno sol, aunque esta es una de las pocas diferencias entre ellas, pues ambas cuentan con un relieve fuertemente ondulado característico de esta parte de la cuenca. Al estar ubicadas una al lado de la otra,

también comparten el orden de suelo Entisol y régimen de humedad ústico, según lo encontrado por Molina (2015) (50) en su investigación en esta zona.

Las dos fincas, sin hacer diferenciación del tipo de manejo de cultivo (agroforestal o monocultivo) han sido expuestas a prácticas agrícolas inadecuadas que han incrementado las posibilidades de degradación del suelo, pues hay que considerar que estos terrenos no son aptos para el desarrollo de cultivos como el café y que deberían ser utilizados solamente para actividades de reforestación, o utilizar cultivos anuales con medidas intensivas de conservación de suelos. Las fincas estudiadas tienen en promedio más de 25 años de ser cultivadas, sin embargo, fueron intervenidas con obras básicas de conservación hasta el año 2014, luego que se indicara que la cuenca RJM es una de las más degradadas del país (73).

En general, ambas fincas poseen características topográficas similares con las mismas obras de conservación, pero con una marcada diferencia en la productividad; la finca bajo sombra presenta productividad de 7,74 t/ha (30 fanegas/ha); mientras la finca a pleno sol de 5,16 t/ha (20 fanegas/ha). Es importante mencionar que esta diferencia en productividad entre fincas no debe atribuirse únicamente al uso y funcionamiento de las obras de conservación, o bien, a la presencia de árboles en el caso de la finca agroforestal, pues los productores han tenido que variar sus planes de fertilización en cada finca y esto tiene relación directa con la productividad del suelo.

El componente agroforestal de la finca bajo sombra es una característica importante de este sistema. Los árboles crean un microclima que provee sombra al cultivo y al suelo, agregan

constantemente materia orgánica en forma de hojas y ramas incrementando sus nutrientes, entre otros beneficios. Estos procesos modifican, a su vez, la temperatura, humedad, contenido de nutrientes e influyen la vida en el suelo en forma de microorganismos (63).

Por otra parte, como resultado de la inspección visual se encontró que las dos fincas se caracterizan por un bajo mantenimiento de sus obras de conservación, lo cual puede afectar directamente el correcto funcionamiento de estas. Vásquez (58) indica que se ha hecho la indicación a los productores de realizar limpiezas de mantenimiento de las obras periódicamente para evitar la acumulación excesiva de sedimentos en su base; pauta que no se sigue y que debe mejorarse tanto por los productores como por los entes encargados de la vigilancia del proyecto como el MAG.

6.2. Intervención de las fincas estudiadas con obras de conservación

A partir de los resultados obtenidos, es posible decir que aunque el Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Degradación de Tierras en Costa Rica (PAN) (1), en el que se basa este plan de conservación, hace referencia a estudios de erosión generales en la cuenca del RJM, no se especifica que antes de realizar la intervención en las fincas se haya hecho un estudio de tasa de erosión individual por finca o al menos por sectores con similares pendientes, información importante para entender más a fondo el panorama de la degradación en cada terreno.

Con respecto al diseño de las obras de conservación, Vásquez (58) indicó que el diseño de las acequias de ladera y gavetas de infiltración, que incluye la geometría, talud, base y altura,

se determinó a partir de otras experiencias con estas obras en lugares con condiciones climáticas y de topografía similares a las que presenta la cuenca RJM. Se debe considerar que este tipo de obras mecánicas de conservación requieren de un diseño que toma en cuenta parámetros climáticos como precipitación, caudales, topografía de las fincas, entre otros elementos que deben ser calculados con el fin de asegurar su correcto funcionamiento y de que el caudal de agua de escorrentía que baja por la pendiente pueda ser frenado, canalizado, infiltrado y movilizado a zonas más estables donde no genere erosión.

Basándose en la información proporcionada por Vásquez (58), se deduce que dichos parámetros de diseño se consideraron solo parcialmente y se hizo uso de valores preestablecidos para escoger las dimensiones de las acequias y gavetas.

Otros aspectos que se incluyen en la *Metodología para la Determinación de la Capacidad de Uso de las Tierras de Costa Rica* y que según el PAN (1), se consideraron solamente para determinar la degradación general de varias cuencas en el país, son las siguientes (49):

- Erosión en las fincas.
- Profundidad efectiva.
- Textura del suelo.
- Pedregosidad y rocosidad.
- Fertilidad del suelo.
- Toxicidad y salinidad.
- Drenaje del suelo.
- Anegamiento o inundación.

Con estos parámetros, se establece la subclase de capacidad de uso, que indica el factor o los factores específicos que limitan su utilización en actividades agropecuarias y forestales y

consecuentemente, dictan si el terreno requiere prácticas intensivas de manejo y conservación de suelos y agua (49).

Por tal motivo, en un plan de conservación de suelos y agua a nivel de cuenca, estos parámetros enumerados (o la mayoría de estos) deben ser analizados individualmente en cada finca y sus terrenos, con el fin de obtener datos e información precisa de la situación actual en la que estos se encuentran y poder asignar una clasificación que se ajuste a sus condiciones. Es decir, con el análisis de estos parámetros en el suelo de cada finca, se tendría suficiente información para tomar decisiones con respecto al tipo de obra de conservación a utilizar, geometría, distanciamiento y distribución en el terreno considerando las diferentes pendientes, entre otros aspectos importantes, pues no todas las fincas poseen las mismas características y condiciones.

6.3. Análisis de dos factores sobre indicadores de calidad estudiados

A partir del análisis estadístico con ANOVAS de dos factores, se determinó que existe influencia del tipo de sistema productivo, bajo sombra o a pleno sol, sobre las variables de respuesta que en este caso corresponden a todos los parámetros de calidad estudiados. La interacción que existe entre el tipo de sistema productivo y los tratamientos no se puede rechazar; todo esto apunta a que ambos sistemas productivos deben ser analizados por separado.

6.4. Comparaciones múltiples entre tratamientos para cada sistema productivo

6.4.1. Sistema productivo bajo sombra (SAF)

Tal como se muestra en la *Tabla 7*, tanto el contenido de humedad del tratamiento “sombra + AC” como el del tratamiento “sombra + GV”, presentaron diferencias estadísticas significativas con respecto al control ($p < 0,001$). Esto indica que las dos obras (acequias de ladera y gavetas) son capaces de infiltrar una fracción del agua de escorrentía producto de la lluvia en esta finca. Estos resultados hacen ver que la implementación de las acequias y gavetas pudo promover la infiltración de parte del agua y mantenimiento de la humedad hasta 30 cm de profundidad evaluada.

Se debe recordar que la función principal de las acequias de ladera y gavetas es la recolección de sedimentos y agua y la posterior infiltración de esta en el suelo, con el objetivo de aprovechar una fracción de este recurso y así conservar la humedad en el suelo en la parcela, lo cual favorece a su vez al cultivo brindando el agua requerida para sostener sus ciclos (56).

Con respecto a la densidad aparente, el suelo con acequias de ladera (sombra + AC) es estadísticamente diferente al suelo con gavetas y sin intervención (control) con un $p < 0,001$ y por otro lado, no existen diferencias estadísticas significativas entre el suelo con gavetas y el suelo sin intervenir ($p > 0,05$). Estos resultados indican que las acequias de ladera han tenido un efecto positivo sobre la densidad aparente. Este comportamiento puede estar asociado a que dicha obra logra encauzar parte importante del agua de escorrentía superficial antes de que adquiriera velocidad erosiva y provoque degradación por el desprendimiento de

sedimentos del suelo. Se debe recordar que la degradación por erosión afecta directamente la estructura del suelo, porcentaje de partículas menores y su contenido de materia orgánica, lo cual aumenta consecuentemente la compactación y densidad aparente (81).

Por su parte, la densidad aparente del suelo intervenido con gavetas de infiltración no ha mejorado si se compara al del suelo no intervenido ya que la función principal de esta obra de conservación es frenar el agua de escorrentía y retener sólidos producidos por la erosión en puntos específicos donde estén ubicadas, pero no tiene un efecto directo sobre las condiciones de esta propiedad física en el suelo.

Las gavetas, a diferencia de las acequias de ladera, tienen una capacidad de retención de agua limitada y no pueden movilizar dicha agua a una zona más estable, por lo que ante eventos de precipitación prolongados o fuertes, la escorrentía puede moverse a lo largo de la pendiente sin dificultad, ganando velocidad y provocando desprendimiento de suelo, lo que se traduce en degradación y por lo tanto, en un aumento de la densidad aparente. Es posible decir, entonces, que por sí solo el sistema de gavetas no funciona para una adecuada conservación del suelo.

Según la literatura, la densidad aparente en suelos bajo sistemas agroforestales en café (bajo sombra) ronda los $0,83 \text{ g cm}^{-3}$ aproximadamente (82) y (83). A nivel nacional, González et al. (2017) (84) reportaron un valor promedio de este parámetro para sistemas agroforestales con café en Pérez Zeledón de $0,81 \text{ g cm}^{-3}$, utilizando árboles de sombra como poró (*E. poeppigiana*), guama (*I. spectabilis*), laurel (*C. alliodora*) y musáceas (bananos y plátanos),

mientras que el promedio reportado por Hergoualc'h et al. (2017) (85) para SAF-café con *I. densiflora* fue de $0,91 \text{ g cm}^{-3}$. Aunque estos valores no se pueden comparar con los encontrados en el presente estudio ya que el orden de suelo de las fincas no es el mismo, se puede notar que los encontrados en otras investigaciones son más bajos que los encontrados en el presente estudio (entre menor densidad aparente, mayor porosidad en el suelo).

Estos valores apuntan a que en cafetales con manejo agroforestal (independientemente del tipo de suelo y sombra utilizada), la densidad aparente del suelo es generalmente menor a $0,9 \text{ g cm}^{-3}$. En el caso de esta finca bajo sombra, se puede observar en la **Tabla 7** que las únicas parcelas cuya densidad aparente promedio es menor a ese valor son las intervenidas con acequias de ladera, lo que reafirma la idea de que la presencia de gavetas en el terreno no provoca un efecto directo sobre esta propiedad física.

Por otro lado, la porosidad total al estar ligada directamente a la densidad aparente del suelo, mostró el mismo comportamiento que este parámetro. Las comparaciones arrojaron que entre el tratamiento “sombra + AC” y el control sí existen diferencias estadísticas significativas con un $p < 0,001$, mientras que para el caso del tratamiento “sombra + GV” y el control, no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$). Al estar estos dos parámetros relacionados, es decir, un aumento de la porosidad total disminuye la densidad aparente y viceversa, los efectos degradativos asociados a actividades agrícolas afectan a los dos por igual

En el caso de la conductividad hidráulica, el análisis realizado demostró que el suelo con acequias de ladera es estadísticamente diferente al del suelo control ($p < 0,001$). Por su parte, la comparación realizada entre el tratamiento con gavetas y el control arrojó un valor $p > 0,05$ que indica que no existen diferencias estadísticas entre ellos.

Dado que la conductividad hidráulica (CH) se ve afectada por las condiciones en las que se encuentren otras propiedades físicas del suelo como la densidad aparente y porosidad, hace sentido que el suelo de “sombra + AC” sea el que mayor conductividad hidráulica tenga en esta finca, ya que el análisis demuestra que para el caso de esas propiedades físicas, dicho suelo es el único que presenta diferencias significativas con respecto al suelo no intervenido.

Se debe recordar que la facilidad con la que el agua se mueve por la matriz del suelo depende en gran medida del espacio poroso (y tamaño de poros) que tenga disponible; a menor densidad aparente, mayor será la porosidad total, lo que contribuye a una mayor conductividad, infiltración y almacenamiento de agua en el suelo por más tiempo.

Utilizando la clasificación de conductividad hidráulica por clases según la rapidez de movimiento citada por Villón (71), es posible catalogar este parámetro del suelo con acequias de ladera como “moderadamente rápida” (rango de 6-12 cm h^{-1}) pues según los resultados de laboratorio su valor promedio es de $10,5 \pm 0,27 \text{ cm h}^{-1}$. Dentro de esta misma clasificación entra la CH del suelo con gavetas de infiltración y la del sistema control, pues para estos se reportaron valores de $9,06 \pm 0,04 \text{ cm h}^{-1}$ y $9,04 \pm 0,03 \text{ cm h}^{-1}$ respectivamente. Esta

clasificación indica que el suelo, en los tres tratamientos analizados para esta finca, poseen un buen drenaje.

Ahora bien, con respecto al contenido de materia orgánica del suelo (MOS), se puede observar en la **Tabla 7** que la MOS en el tratamiento “sombra + AC” fue significativamente mayor que la del control ($p < 0,001$), mientras que la MOS del tratamiento “sombra + GV” no mostró diferencias estadísticas significativas con respecto al control ($p > 0,05$).

Porras (2006) (86) menciona que el rango óptimo de contenido de materia orgánica (MO) en suelos cultivados es de 5 % a 10 %; en el caso de este estudio se puede observar en la **Tabla 7** que ninguno de los tratamientos se encuentra en dicho rango, lo que quiere decir que en esta finca, para todos los casos, el contenido de MO es menor al mínimo aceptable, lo cual afirma la degradación en el tiempo que han sufrido estos suelos (50) y que las obras realizadas en control de erosión parecen no ser suficientes para mejorar la calidad del suelo con respecto al contenido de MOS.

Las acequias de ladera captan de una parte importante del agua de lluvia que se moviliza ladera abajo en forma de escorrentía, disminuye la pérdida de suelo que incluye partículas finas y un porcentaje de materia orgánica. Ludwing (2000) (87), demostró en una investigación relacionada al uso de acequias de ladera en El Salvador, que la implementación de acequias de ladera en un terreno con pendiente resultó en una pérdida de suelo de $83 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, mientras que en un sistema convencional con las mismas condiciones de terreno pero

sin ningún tipo de intervención conservativa de este tipo, la pérdida de suelo fue de $105 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, significando una diferencia de $22 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

En el caso de la MOS, las gavetas de infiltración no han tenido un efecto significativo sobre su cantidad. Se debe recordar que la función de la gaveta es frenar el agua de escorrentía y recoger parte de los sedimentos que se desprenden de la superficie (incluidas partículas de MO), evitando que se pierdan pendiente abajo, pero por sí sola no puede mejorar las condiciones de calidad del suelo. Este estudio expone que dicha obra no repercute directamente en el mejoramiento del contenido de MOS.

En este contexto, se debe considerar que la restauración del nivel de MOS en un suelo suele tardar bastante tiempo; por ejemplo, se dice que del 20 % al 30 % de la MOS total se pierde en sólo 2 años de cultivo intensivo, mientras que la regeneración o restauración de esta materia puede tomar 35 años o más (21). Por esto, es necesaria la implementación de obras de conservación intensivas como la siembra en contorno, uso de terrazas y barreas vivas y muertas, así como técnicas de restauración de suelos degradados utilizadas como complemento del sistema de conservación, como por ejemplo la incorporación de más árboles de sombra para el aumento de residuos orgánicos en el suelo. La adición de enmiendas orgánicas es otra opción que puede ser utilizada para incrementar el contenido de materia orgánica y actividad microbiana, lo cual está ligado a un aumento de la fertilidad del suelo (88).

Con respecto al contenido de carbono orgánico en el suelo (COS), se presentó la misma situación que en el caso del contenido de materia orgánica, pues si se encontraron diferencias estadísticas significativas entre el suelo intervenido con acequias (sombra + AC) y el control ($p < 0,001$), pero no se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento “sombra + GV” y el control ($p > 0,05$) (lo cual es de esperar ya que el COS está ligado o es proporcional a la cantidad de MOS).

Aunque los tres tratamientos presentan un ingreso similar de materia orgánica en forma de residuos de los árboles de sombra, se cree que las acequias de ladera han logrado mantener dicha capa por más tiempo sobre el suelo debido a su capacidad de captación del agua de escorrentía, la cual reduce el potencial erosivo del agua y por consiguiente, evita una dispersión y pérdida considerable de suelo y MO o COS pendiente abajo.

Al permanecer por más tiempo la materia orgánica sobre el suelo y por lo tanto, comenzar a acumularse, se posibilita su descomposición y se permite la transferencia de carbono orgánico a las siguientes capas del suelo. Es necesario considerar que este proceso de almacenamiento de carbono orgánico en el suelo conlleva varios años, de ahí la importancia del ingreso constante y permanencia de la MO sobre la superficie para potenciar la cantidad de carbono suministrado por la vegetación.

A nivel nacional, se han reportado valores mayores a los encontrados en este estudio; por ejemplo, Ávila et al. (2001) (89), realizaron una investigación en las regiones de Grecia y Naranjo, Alajuela en SAF con café, donde encontraron que el contenido de carbono del suelo

a una profundidad de 25 cm es de 108,6 Mg C ha⁻¹ utilizando árboles de eucalipto (*E. globulus*) durante 8 años y 184,4 Mg C ha⁻¹ empleando árboles de poró (*E. poeppigiana*) por más de 10 años. Por otro lado, Mena et al. (2011) (90) reportó un almacenamiento promedio de carbono orgánico de suelo en SAF-café en Turrialba a una profundidad de 30 cm utilizando laurel (*C. alliodora*) como sombra de 85 Mg C ha⁻¹ y de 108 Mg C ha⁻¹ para SAF-café con poró (*E. poeppigiana*).

En Barva, Heredia, se determinó que el suelo de un SAF con café con sombra de (*I. densiflora*) contiene aproximadamente 86,6 Mg C ha⁻¹ en los primeros 30 cm de profundidad (85), mientras que Corral et al. (2006) (91) encontraron un contenido de carbono orgánico a la misma profundidad en El Empalme (Ecuador), de 72 Mg C ha⁻¹ para SAF-café con árbol de guaba y 78,7 Mg C ha⁻¹ para SAF-café con árbol de laurel.

Aunque estos valores no se pueden comparar directamente con los encontrados para esta finca debido a que se debe considerar las diferencias en orden de suelo, se puede observar que estos últimos son particularmente más bajos que los reportados para diferentes sistemas agroforestales en Costa Rica, cuyo rango normal inicia en 80 Mg C ha⁻¹ aproximadamente. Esto refleja los efectos de la degradación por erosión que ha afectado a la cuenca alta desde hace mucho tiempo.

Es importante recordar que estas reservas de carbono en el suelo pueden tardar muchos años en regenerarse y que en este caso, el periodo de tiempo que ha pasado desde que se comenzó a intervenir esta parte de la cuenca no ha sido suficiente para mejorar las condiciones de este

parámetro. La incorporación de enmiendas orgánicas al suelo puede ser una opción para favorecer el contenido de MOS y por lo tanto, el contenido de COS.

Con respecto a la fracción liviana (FL) de la materia orgánica del suelo del tratamiento “sombra + AC” es estadísticamente diferente a la del suelo con gavetas y sin intervención ($p < 0,001$); estos dos últimos no presentaron diferencias significativas entre ellos ($p > 0,05$).

Es importante mencionar que a diferencia de la fracción pesada, la cual se considera muy estable y transformada, la fracción liviana tiene periodos cortos de permanencia en el suelo de aproximadamente 1 a 10 años, lo que permite identificar cambios en dicho parámetro debido a prácticas de manejo del suelo (21). La fracción liviana está ligada a la MOS y por tanto es fuente de nutrientes.

Se sugiere que las acequias de ladera, al captar el agua de escorrentía antes de que alcance velocidad erosiva, evitan la remoción constante de parte de los residuos vegetales orgánicos aportados por los árboles de sombra, generando que dicha materia orgánica permanezca por más tiempo en el suelo y de esta manera pueda acumularse en sus primeros centímetros.

Zagal et al. (2002) (30) indica que cuando un suelo no es disturbado constantemente (en el caso de este estudio, por flujos de agua), se permite una mayor acumulación de los componentes de la fracción liviana. Esta puede ser la causa del porqué este parámetro del suelo con acequias de ladera es diferente al del suelo control, más no así en el caso del suelo intervenido con gavetas (sombra + GV), las cuales no logran evitar el movimiento de la escorrentía por la pendiente una vez que exceden su capacidad de almacenamiento.

Con respecto a la fracción pesada, esta presentó el mismo comportamiento que la fracción liviana, lo cual es de esperar considerando que la fracción pesada es el complemento de la fracción liviana.

En resumen, para la finca con sistema de manejo de cultivo de café con sombra se determinó que para todos los parámetros de calidad estudiados, excepto el contenido de humedad, las únicas parcelas cuyo suelo presentaron diferencias significativas con respecto al control fueron aquellas que se encuentran intervenidas con acequias de ladera.

Las acequias de ladera presentan una composición estructural muy similar a un canal o “zanja” y están construidas a través de la pendiente del terreno, características que les permite la captación progresiva del agua que posteriormente infiltran al suelo y transportan el remanente de escorrentía a zonas más estable en el terreno, evitando la erosión por escorrentía, y por ende detrimento de la calidad del suelo.

6.4.2. Sistema productivo a pleno sol (monocultivo)

Como se puede observar en la **Tabla 8**, los dos tratamientos evaluados no se presentaron diferencias significativas con respecto al control en todos los parámetros medidos: contenido de humedad, densidad aparente, porosidad, MOS, COS, fracción liviana y fracción pesada. El único parámetro que presentó diferencias significativas fue la conductividad hidráulica, indicando diferencias significativas entre el suelo intervenido con acequias de ladera y el suelo sin intervenir. Esto indica que de manera general, en esta finca el uso de obras de

conservación (acequias de ladera, gavetas), luego de 5 años de intervención, no ha funcionado para mejorar la calidad de los parámetros estudiados.

Un sistema de cultivo de café a plena exposición solar carece de la adición continua de material orgánico que pueden proveer árboles de sombra, arbustos o cualquier otro tipo de vegetación. Esto quiere decir que en esta finca no se tiende a almacenar materia orgánica fresca en el suelo que pueda mejorar su estructura, densidad aparente y porosidad relacionados a la infiltración del suelo, entre otros.

Por ejemplo, se dice que la presencia de sombra y residuos orgánicos sobre la superficie pueden mantener una temperatura baja en el suelo durante el día, aislándolo parcialmente de la radiación del sol y, por lo tanto, conservando por más tiempo su humedad (92). Esto hace sentido si se considera que el proceso de evaporación de agua en el suelo se ve afectado por variables atmosféricas de este tipo.

Otro factor que debe tomarse en consideración en cafetales en monocultivo es el incremento de la susceptibilidad del suelo ante la escorrentía superficial, al no contar con una capa de materia vegetal suficientemente fuerte que lo recubra y proteja del desprendimiento de sedimentos por acción de las corrientes de agua. La ausencia de dicha vegetación le permite al agua que escurre por el terreno adquirir mayor velocidad debido a la pendiente y evita, de cierta manera, que el suelo absorba progresivamente el agua (44). Por otra parte, al no haber árboles de sombra, hay menos intercepción de lluvia y por lo tanto, mayor lámina de agua en el suelo, comparado con sistemas SAF.

Además, se debe considerar que el suelo de fincas con producción de café a pleno sol (monocultivo) generalmente no posee una capa de vegetación en el suelo lo bastante fuerte o extensa que lo proteja ante eventos erosivos, por lo que el agua de escorrentía superficial tiene mayor posibilidad de desprender partículas conforme avanza por la pendiente. Esto genera una destrucción progresiva de la estructura del suelo y provoca una redistribución de las partículas, provocando procesos de compactación, por ende aumento de la densidad aparente y disminución de la porosidad (93).

En investigaciones relacionadas a la calidad del suelo en sistemas de café a plena exposición solar, se han encontrado valores de densidad aparente cercanos a $0,90 \text{ g cm}^{-3}$ (83) en Tolima, Colombia, mientras que en el mismo país en cafetales a pleno sol con más de 10 años de existencia, Cardona y Sadeghian (2005) (82) reportaron un valor de densidad aparente de $0,96 \text{ g cm}^{-3}$. En el caso de Costa Rica, Hergoualc'h et al. (2012) (85) determinaron que en cafetales en monocultivo (pleno sol) en el Valle Central, la densidad aparente en los primeros 30 cm fue de $0,91 \text{ g cm}^{-3}$.

Aunque estos valores promedio no se pueden comparar directamente con los encontrados en este estudio debido a la diferencia en el orden de suelo, pueden servir como referencia para inferir que en plantaciones de café a pleno sol, el suelo tiende a presentar valores de densidad aparente que superan los $0,90 \text{ g cm}^{-3}$ (valores mayores a los encontrados en sistemas de café agroforestales). En el caso de la finca en estudio, tanto en el suelo intervenido con acequias de ladera como en el que lo está con gavetas, el valor promedio supera $1,0 \text{ g cm}^{-3}$.

En investigaciones similares, se han reportado valores de porosidad en suelos bajo sistema de manejo de café a pleno sol en Colombia de aproximadamente 62 % (82); similar al encontrado por Cannavo et al. (2011) (94) en Barva de Heredia (Costa Rica), pues determinó que la porosidad del suelo en cafetales a plena exposición solar a una profundidad de 30 cm, es también de 62 %. Estos valores, aunque se hayan extraído de suelos con diferente orden, dan a entender que en sistemas de café a pleno sol, la porosidad es generalmente más baja que la reportada en sistemas agroforestales, comportamiento que concuerda con el encontrado en esta finca.

En cuanto a la conductividad hidráulica, el análisis realizado demostró que el suelo con acequias de ladera es estadísticamente diferente al del control ($p < 0,001$); mientras que el suelo con gavetas no presentó diferencias estadísticas significativas con respecto al control ($p > 0,05$).

Según la clasificación de conductividad hidráulica delimitada por la rapidez de movimiento (71), el valor promedio de $8,34 \pm 0,59 \text{ cm h}^{-1}$ encontrado en el suelo con uso de acequias de ladera, gavetas y sin intervención de esta finca se considera como “moderadamente rápido” (rango de $6\text{-}12 \text{ cm h}^{-1}$). Esta clasificación indica que el suelo, en los tres casos analizados para esta finca, poseen un buen drenaje.

Aunque la conductividad hidráulica en todos los casos se clasifique como “moderadamente rápida” (lo que hace que teóricamente se tenga un buen drenaje), esto no asegura que el suelo vaya a infiltrar toda el agua ante eventos de precipitación pues en este proceso están

involucradas otras propiedades como la densidad aparente y porosidad que si no se encuentran en óptimas condiciones de calidad, pueden afectar el ingreso de agua a la matriz.

Con respecto al COS, en investigaciones relacionadas a la calidad de suelos con manejo de producción de café en monocultivo a pleno sol, se han reportado valores que difieren a los encontrados en este estudio. Por ejemplo, Ávila et al. (2001) (89), determinaron que el suelo de un cultivo de café a plena exposición solar en Naranjo y Grecia contiene $153,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ de COS en los primeros 25 cm de profundidad, mientras que Hergoualc'h et al. (2012) (85) encontraron en un sistema similar en Barva, Heredia, un valor promedio de COS en los primeros 30 cm del suelo de $86,1 \text{ Mg C ha}^{-1}$. En esta misma zona de Barva, Cannavo et al. (2011) (94) reportaron para un sistema de café a pleno sol un contenido de COS de $73,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$ a 30 cm de profundidad.

Estos valores indican que en Costa Rica, sin hacer distinción por orden de suelo, el COS en los primeros centímetros puede ser mayor a 80 Mg C ha^{-1} e incluso llegar a valores mayores a 150 Mg C ha^{-1} . En el caso de esta finca, los valores promedio de COS se encuentran por debajo de los 38 Mg C ha^{-1} , lo que revela bajos contenidos de este elemento en el suelo.

6.5. Comparación entre sistemas productivos

6.5.1. Suelo intervenido con obras de conservación

Los resultados estadísticos presentados en la *Tabla 9* muestran que existen diferencias estadísticas significativas ($p < 0,001$) entre el suelo de la finca bajo sombra intervenido con acequias de ladera y el suelo de la finca a pleno sol intervenido con la misma obra, para todos

los indicadores de calidad evaluados. Este mismo comportamiento se da en el caso del suelo intervenido con gavetas, pues también se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,001$) entre el suelo de la finca agroforestal con gavetas y el suelo de la finca en monocultivo intervenida con dicha obra de conservación.

Aunque estos resultados sugieran que el suelo intervenido con acequias de ladera y el intervenido con gavetas del sistema agroforestal es superior al de sus homólogos de la finca a pleno sol, se debe recordar que producto de las comparaciones múltiples realizadas para cada sistema productivo (bajo sombra y pleno sol), se determinó que la intervención con obras de conservación ha presentado efectos sobre la calidad del suelo en el sistema de café agroforestal, mas no así en el sistema a pleno sol, ya que de todas las pruebas estadísticas individuales realizadas para cada sistema, sólo las parcelas intervenidas con acequias de ladera del sistema bajo sombra presentaron diferencias significativas con respecto al control. Entonces, las diferencias encontradas entre el suelo de las dos fincas intervenidas con gavetas de infiltración, por ejemplo, no se debe necesariamente a la presencia de esta obra en las fincas, si no que podría atribuirse al componente agroforestal del sistema bajo sombra, única característica diferente a las del sistema a pleno sol.

6.5.2. Suelo no intervenido

Al comparar el suelo no intervenido de las dos fincas estudiadas, se puede analizar el efecto del componente agroforestal en la finca bajo sombra con respecto a la finca a pleno sol. En este caso de estudio, al comparar las parcelas sin ningún tipo de intervención de conservación

de los dos sistemas productivos (bajo sombra versus pleno sol), se elimina la variable “obra de conservación” y es posible determinar si en este caso, los árboles de sombra han tenido algún efecto sobre la calidad del suelo (ver **Tabla 10**).

Comenzando con el indicador “contenido de humedad”, se encontró información suficiente para afirmar que este parámetro del suelo bajo manejo agroforestal es estadísticamente diferente al del suelo con cultivo a pleno sol ($p < 0,001$). El suelo de la finca bajo sombra presentó un contenido de humedad de $24,47 \pm 0,46$ % mientras que el de la finca a pleno sol fue de $20,9 \pm 0,62$ %.

Lin (2010) (67), menciona que los cafetales con árboles son capaces de retener mayor cantidad de humedad en comparación a los cultivos de café a pleno sol, debido a que el dosel arbóreo permite controlar la temperatura en la zona de cultivo, disminuyendo así la evaporación del suelo y la transpiración de los cafetos.

En este caso, se puede decir también que la constante adición de materia orgánica de los árboles, además de ayudar con un menor incremento de la tasa de escorrentía a lo largo de la pendiente, mejora considerablemente la infiltración del agua en el suelo, la cual está relacionada a otras propiedades físicas como la densidad aparente y porosidad total que también se ven afectadas por el contenido de MO.

Con respecto a la densidad aparente, a partir del análisis estadístico se determinó que este parámetro en el cultivo bajo sombra (SAF) es significativamente menor al del suelo con cultivo a plena exposición solar ($p < 0,001$). En el caso del suelo de la finca bajo sombra, la

densidad aparente encontrada es de $0,99 \pm 0,02 \text{ g cm}^{-3}$, mientras que la del suelo de la finca a pleno sol es de $1,18 \pm 0,05 \text{ g cm}^{-3}$.

Este comportamiento es similar al encontrado por Cardona y Sadghian (2005) (82), pues en su investigación relacionada a suelos cafetaleros con sombra encontraron una densidad aparente promedio de $0,83 \text{ g/cm}^3$ promedio para este tipo de sistema productivo, y para sistemas de café a pleno sol un valor más alto a este, de $0,96 \text{ g cm}^{-3}$, lo que indica una mayor compactación de suelo en este último.

La porosidad presentó el mismo comportamiento encontrado para el caso de la densidad aparente, es decir, estadísticamente la porosidad total del suelo del sistema bajo sombra es significativamente diferente al del sistema productivo a pleno sol ($p < 0,001$); la porosidad del suelo de la finca agroforestal es de $62,5 \pm 0,68 \%$ y la del suelo de la finca en monocultivo es menor, de $55,6 \pm 1,93 \%$.

Esta diferencia entre sistemas productivos se presentó también en dos investigaciones realizadas por Cardona y Sadeghian (2005) (82) y (95), en donde encontraron promedios mayores de porosidad en cafetales bajo sombra, al compararlos con cafetales a pleno sol. Carvalho et al. (2004) (96) encontraron resultados similares al comparar la calidad de un suelo cultivado en un sistema SAF y uno de tipo convencional (a plena exposición solar), presentando una porosidad total promedio de $64,7 \%$ en el sistema bajo sombra y $54,4 \%$ en el sistema a pleno sol; valores y comportamiento similares a los encontrados en el presente estudio.

Los mejores resultados para este parámetro físico del suelo se dieron en el sistema bajo sombra debido a que al generarse una adición constante de desechos orgánicos al suelo, se da un incremento del contenido de materia orgánica, la cual ejerce influencia positiva sobre propiedades como la porosidad y consecuentemente la densidad aparente (81). El mejoramiento de la calidad del suelo a partir del incremento de la porosidad total, conlleva también a mayores tasas de infiltración y retención del agua al existir más espacio poroso en la matriz del suelo, lo cual representa una reducción de la posibilidad de erosión hídrica por escorrentía del suelo, cuya importancia en este caso es alta debido a la pendiente pronunciada de los terrenos.

En cuanto a la conductividad hidráulica, se determinó que el suelo con manejo de cultivo bajo sombra es estadísticamente diferente al del suelo con sistema de cultivo a pleno sol ($p < 0,001$). Según los resultados, la conductividad hidráulica promedio del suelo de la finca bajo sombra es de $9,04 \pm 0,03 \text{ cm h}^{-1}$, mientras que la del suelo con cultivo a pleno sol es de $7,54 \pm 0,39 \text{ cm h}^{-1}$.

El suelo del sistema de café bajo sombra presentó la conductividad hidráulica promedio mayor debido a que es muy probable que el componente agroforestal mejoró sus condiciones indirectamente al presentarse un aumento de la porosidad total y reducción de la densidad aparente, propiedades físicas del suelo que tienen una relación estrecha con la conductividad hidráulica y que en este caso, también presentaron los mejores valores promedio (en términos de calidad) en el sistema bajo sombra.

Con respecto al contenido de materia orgánica (MOS); se encontraron diferencias significativas entre el MOS reportado para el sistema productivo bajo sombra y el encontrado en el sistema productivo a pleno sol ($p < 0,001$), con un promedio de $3,42 \pm 0,13$ % para el primero y $3,17 \pm 0,07$ % para el segundo.

Por otra parte, la comparación del parámetro “contenido de carbono orgánico” presentó el mismo resultado que para el caso de la MOS, encontrándose diferencias estadísticas significativas entre ellos ($p < 0,001$). La diferencia que existe entre el COS en los primeros 30 cm de suelo en estas dos fincas se debe a la mayor cantidad de materia orgánica que presenta el suelo del cultivo bajo sombra, lo que se traduce en una mayor acumulación de carbono (aunque ambos suelos siguen siendo categorizados como degradados).

Los desechos de los árboles, ya sea ramas, hojarasca o cualquier otro tipo de materia orgánica que se pueda incorporar al suelo, tienen un efecto directo sobre muchas de las propiedades físicas del suelo. Relacionado a esto, Paz y Sánchez (2007) (97) demostraron que en Popayán, Colombia, los suelos con sistema productivo de café bajo sombra analizados en su estudio presentaron una mayor densidad de materia orgánica, con una mejor capacidad de retención de humedad, comparado con suelos de cafetales a pleno sol, debido presuntamente a la presencia de árboles en el cultivo.

Otra investigación en ese mismo país concluyó que el uso de sombra de guamo en diferentes fincas cafetaleras resultó en un incremento de contenido de materia orgánica, lo que se traduce en una mayor humedad, porosidad total y por lo tanto, menores valores de

compactación y densidad aparente, lo que favorece al cultivo. Dichos resultados, fueron más notorios en las capas superficiales del suelo (82).

Alcántara y Ferreira (2001) (98) determinaron en una investigación relacionada a calidad de suelo, que propiedades como la densidad aparente, porosidad total, estabilidad de agregados y contenido de humedad del suelo, se relacionan directamente con el contenido de materia orgánica presente. Es decir, el contenido de MO representa una fuente importante de beneficios para el suelo, al potenciar el mejoramiento de otras propiedades físicas y químicas que definen su calidad y fertilidad.

Con respecto al fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo, la comparación entre la fracción liviana (FL) del suelo bajo sistema agroforestal dio como resultado que no existen diferencias significativas con respecto al suelo con sistema a plena exposición solar ($p < 0,001$), con un valor promedio de FL para el suelo de la finca con SAF de $3,12 \pm 0,25 \text{ g kg}^{-1}$ y de 3,02 para la finca con sistema de cultivo a pleno sol.

Considerando que de las dos fracciones analizadas, la fracción liviana es la fracción de la materia orgánica ligada a los desechos orgánicos frescos y cuyos cambios (presencia o ausencia debida a degradación) son los más notorios en el corto plazo, puede decirse que aunque los árboles de sombra de la finca cafetalera con SAF proveen constantemente de dicha materia al suelo, la erosión hídrica no permite una acumulación óptima, lo que explica por qué la fracción liviana de esta es similar a la del suelo de la finca sin implementación de árboles de sombra. Esto demuestra la importancia del uso de estructuras de conservación

para encauzar e infiltrar el agua de lluvia antes de que adquiriera velocidad erosiva y tenga la capacidad de remover pendiente abajo el suelo y la materia orgánica ligada a este.

Al identificar las diferencias estadísticas de calidad entre el suelo no intervenido de los dos sistemas productivos de café estudiados, es posible decir que el componente “sombra” característico de la finca agroforestal está muy relacionado con el mejoramiento de la mayoría de las propiedades de su suelo, pues todos los indicadores analizados presentaron las mejores condiciones en este tipo de sistema de manejo de cultivo de café.

Es importante recalcar que el suelo control de ambos sistemas productivos representa un “antes”, es decir, son una fracción de las fincas que no se han intervenido con obras de conservación, por lo que al compararlos se determinó el efecto de los árboles de sombra sobre la calidad del suelo y cómo ha mejorado. Dicho esto, es posible decir que el sistemas agroforestal, al menos en este caso, propicia un ambiente más adecuado en la zona de cultivo que beneficia al suelo a través de la adición continua de materia orgánica proveniente de los árboles de sombra, la cual modifica y mejora características y propiedades del suelo como su contenido de humedad, provoca una mayor porosidad y menor densidad aparente, mejora su conductividad del agua y en general, propicia una mayor sostenibilidad ambiental del cultivo de café.

La implementación de árboles de sombra en la zona de cultivo de café es la primera práctica de conservación que debería instaurarse en esta parte de la cuenca, incluso antes de construir obras de conservación como acequias de ladera y gavetas de infiltración en los terrenos. Los

beneficios asociados a la presencia y protección de los árboles al suelo pueden utilizarse como una herramienta eficaz que con el tiempo puede llegar a convertirse en una de las principales formas para combatir la degradación (principalmente en forma de erosión hídrica) que ha afectado a esta zona y que sigue afectándola debido a las características topográficas y de relieve de los terrenos utilizados para la producción de café.

7. CONCLUSIONES

Se concluye que la intervención con obras de conservación, específicamente el uso de acequias de ladera, ha presentado efectos positivos sobre la calidad del suelo en el sistema de café con sombra (agroforestal), mas no así en el sistema a pleno sol (monocultivo). Además, las gavetas no deben utilizarse como única obra para mitigar los efectos de la degradación en esta parte de la cuenca, pues por sí solas no son obras de conservación que mejoren la calidad del suelo en laderas cafetaleras como las que en este estudio se analizaron.

Analizando los valores promedio encontrados en las fincas estudiadas, se concluye que estos suelos siguen siendo considerados como degradados, pues al comparar estos valores con otros encontrados en la literatura para sistemas productivos de café similares, se observó que los de las fincas de este estudio tienden a ser más bajos.

Se concluye que las condiciones presentadas en el sistema productivo de café bajo sombra propician el funcionamiento y efecto de las acequias de ladera sobre el suelo de esta finca, a diferencia de las características encontradas en el sistema a plena exposición solar, que no permiten diferenciar o identificar los posibles aportes que pueden dar las estructuras de conservación a su suelo.

Con los resultados de laboratorio obtenidos se concluye que los árboles en el cafetal-SAF tienen un efecto importante sobre las condiciones de calidad del suelo, reflejadas en la mejoría de los parámetros estudiados. Se determinó que los árboles de sombra confieren

características más adecuadas al suelo para que las acequias de ladera cumplan con su función hasta cierto grado de efectividad.

Por otra parte, se concluye que el sistema a plena exposición solar no cuenta con características o condiciones de este tipo que les permitan a las obras de conservación ser suficientes por sí solas para afrontar la erosión hídrica y degradación en general que afecta al suelo en este lugar. Es posible decir que los cafetales en monocultivo, sin ningún tipo de protección ante diferentes condiciones ambientales demuestran no ser, al menos en este caso de estudio, el sistema productivo más adecuado considerando las condiciones y características de esta zona de la cuenca.

Por último, se concluye que solo las fracciones liviana y pesada de la materia orgánica del suelo intervenido con acequias de ladera de la finca agroforestal presentaron diferencias significativas con respecto al control, debido a que esta obra de conservación reduce el movimiento y concentración de masas importantes de agua de escorrentía sobre la superficie del suelo (con una capa vegetal más robusta en comparación con la de la finca a pleno sol), lo que permite una mayor acumulación de los componentes de dichas fracciones, es especial la liviana, la cual es la fracción de la materia orgánica ligada a los desechos orgánicos frescos y cuyos cambios son los más notorios en el corto plazo; mientras que las gavetas de infiltración no cuentan con la misma capacidad, pues están diseñadas principalmente para frenar el agua que baja por la pendiente de las laderas.

8. RECOMENDACIONES

Con respecto a la intervención con acequias y gavetas en la parte alta de la cuenca RJM, se recomienda que además del uso de estas, se implementen paralelamente otras técnicas de restauración de suelos degradados, como por ejemplo incorporación de más árboles de sombra, enmiendas orgánicas, uso de bio carbón, entre otros, en fincas cafetaleras con sistema de cultivo a pleno sol. Por otra parte, se recomienda que el diseño de las acequias de ladera no debe ser el mismo para todas las fincas o tipos de manejo de cultivo. Las características de diseño de las acequias de ladera deben variar dependiendo del sistema productivo de café en el que se implementen (agroforestal o monocultivo), pues cada uno presenta condiciones diferentes que afectan directamente el funcionamiento y rendimiento de dichas obras.

Se recomienda que en futuras investigaciones relacionadas a la calidad del suelo, se analice el efecto de diferentes densidades y porcentajes de sombra en sistemas productivos de café, con el fin de determinar el nivel de influencia del componente agroforestal en suelos intervenidos con acequias de ladera y gavetas de infiltración en fincas de la parte alta de esta cuenca. En este contexto, sería beneficioso estudiar más a fondo los beneficios asociados a la implementación de árboles de sombra en cultivos de café.

Por otra parte, se recomienda abarcar en futuras investigaciones el efecto del uso de estas obras de conservación sobre las aguas subterráneas y recarga de acuíferos, pues la

conformación y estructura de las acequias de ladera y gavetas de infiltración les permite la infiltración de una fracción del agua de escorrentía ante eventos de precipitación; relación que sería importante estudiar.

Además, se podría considerar importante para futuros proyectos e investigaciones relacionadas, realizar una descripción hidrológica e hidráulica de las fincas de estudio, que incluya el uso de curvas de nivel a una escala más precisa que puedan ser empleadas para hacer un análisis integral de los terrenos, su topografía y el diseño de las obras de conservación implementadas.

Con estas curvas, se podrían identificar las áreas de aporte de escorrentía y concentración de agua. Si bien, existen curvas de nivel para Costa Rica cada 10 m, se requieren curvas de nivel más detalladas para que el levantamiento sea más específico y apegado a la realidad de los terrenos.

También, un estudio de tasa de erosión individual por finca podría ser desarrollado en otros proyectos de investigación en esta zona, pues esto generaría información importante para entender más a fondo con métodos cuantitativos el panorama de la degradación en cada terreno.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Comisión Asesora sobre Degradación de Tierras (CADETI). Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Degradación de Tierras en Costa Rica. San José, Costa Rica: MINAE, CADETI; 2004.
2. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Facilitación del proceso evaluación de línea base y elaboración de una estrategia de paisaje del programa país COMDEKS de la iniciativa Satoyama en la cuenca del Río Jesús María - Informe Final [Internet]. 2014. Disponible en: <https://comdeksproject.files.wordpress.com/2014/04/estrategia-iniciativa-satoyama-informe-final.pdf>
3. Forouzangohar M, Crossman ND, Macewan R, Wallace DD, Bennett L. Ecosystem services in agricultural landscapes: A spatially explicit approach to support sustainable soil management. *The Scientific World Journal* [Internet]. 2014;2014(1):1–13. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2014/483298>
4. Espinoza C. Proyecto COMDEKS Costa Rica: Suelo fértil para los productores de la cuenca del Río Jesús María. Costa Rica: Pericutina Producciones (Video); 2016.
5. Schoonover J, Crim J. An Introduction to Soil Concepts and the Role of Soils in Watershed Management. *Journal of Contemporary Water Research & Education* [Internet]. 2015;154(1):21–47. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.04.001>
6. Comerford N, Franzluebbbers A, Stromberger M, Morris L, Markewitz D, Moore R. Assessment and Evaluation of Soil Ecosystem Services. *Soil Horizons* [Internet]. 2013;54(3):1–14. Disponible en: <https://doi.org/10.2136/sh12-10-0028>
7. Zhu Y guan, Meharg AA. Protecting global soil resources for ecosystem services. *Ecosystem Health and Sustainability* [Internet]. 2015;1(3):1–4. Disponible en: <https://doi.org/10.1890/EHS15-0010.1>
8. Burbano H. El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas* [Internet]. 2016;33(2):117–24. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58>

9. Trujillo J, Mahecha J, Torres M. El Recurso Suelo: Un Análisis de sus Funciones, Capacidad de Uso e Indicadores de Calidad. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* [Internet]. 2018;9(2):30–7. Disponible en: <https://doi.org/10.22490/21456453.2095>
10. Ghaemi M, Astaraei A, Emami H, Nassiri Mahalati M, Sanaeinejad S. Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component analysis of Astan Quds- east of Mashhad- Iran. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* [Internet]. 2014;14(4):987–1004. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162014005000077>
11. Askari M, Holden N. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. *Geoderma* [Internet]. 2014;230–231(2014):131–42. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.019>
12. Estrada I, Hidalgo C, Guzmán R, Almaraz J, Navarro H, Etchevers J. Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia* [Internet]. 2017;51(8):813–31. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2691/269125071001.pdf>
13. Villarreal J, Pla I, Agudo L, Villaláz J, Rosales F, Pocasangre L. Índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá. *Agronomía Mesoamericana* [Internet]. 2013;24(2):301–15. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10669/17880>
14. Bünemann E, Bongiorno G, Bai Z, Creamer R, de Deyn G, de Goede R, et al. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* [Internet]. 2018;120(2018):105–25. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
15. Navarrete A, Vela G, López J, Rodríguez MDL. Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *Contactos* [Internet]. 2011;80(2011):29–37. Disponible en: <http://www2.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n80ne/suelo.pdf>
16. AL-Shammary A, Kouzani A, Kayna A, Khoo S, Norton M, Gates W. Soil Bulk Density Estimation Methods: A Review. *Pedosphere* [Internet]. 2018;28(4):581–96. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60034-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60034-7)
17. Keller T, Håkansson I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma* [Internet]. 2010;154(3–4):398–406. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.013>

18. Gonzáles J, Gonzáles G, Sánchez I, López A, Valenzuela L. Caracterización de la porosidad edáfica como indicador de la calidad física del suelo. *Terra Latinoamericana* [Internet]. 2011;29(4):369–77. Disponible en: <http://doi.org/10.13140/2.1.1262.4002>
19. González-Barrios J, González G, Chávez E. Soil porosity for three typical surfaces in the Nazas River upper watershed. *Tecnología y Ciencias del Agua* [Internet]. 2012;3(1):21–32. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7357643>
20. Marín B, Geissert D, Negrete S, Gómez A. Spatial distribution of hydraulic conductivity in soils of secondary tropical montane cloud forests and shade coffee agroecosystems. *Geoderma* [Internet]. 2016;283(2016):57–67. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.002>
21. Galantini J, Céspedes C, Millas P. Fraccionamiento de la materia orgánica del suelo [Internet]. 2014. Disponible en: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR40198.pdf>
22. Espinoza M, do Vale J, Evangelista E, Queiroz C, Gervasio M. Chemical and physical fractions of soil organic matter under various management regimes in Roraima, Brazil. *Semina: Ciências Agrárias* [Internet]. 2017;38(4):2419–32. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n4Sup1p2419>
23. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Mapa de carbono orgánico del suelo [Internet]. Roma, Italia: FAO; 2017. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i8195es/I8195ES.pdf>
24. Castillo L, Bojórquez J, Hernández A, García D. Contenidos de Carbono Orgánico en Suelos Bajo Diferentes Coberturas Vegetales y de Cultivo. *Cultivos Tropicales* [Internet]. 2016;37(3):72–8. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2035.4805%0D>
25. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Estado Mundial del Recurso Suelo - Resumen Técnico [Internet]. Roma, Italia: FAO, ITPS; 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
26. Burbano H. El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas* [Internet]. 2018;35(1):82. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.85>

27. Dlamini P, Chivenge P, Manson A, Chaplot V. Land degradation impact on soil organic carbon and nitrogen stocks of sub-tropical humid grasslands in South Africa. *Geoderma* [Internet]. 2014;235–236(2014):372–81. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.016>
28. Liu S, Schleuss PM, Kuzyakov Y. Carbon and Nitrogen Losses from Soil Depend on Degradation of Tibetan Kobresia Pastures. *Land Degradation and Development* [Internet]. 2017;28(4):1253–62. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/ldr.2522>
29. Hiltbrunner D, Schulze S, Hagedorn F, Schmidt M, Zimmermann S. Cattle trampling alters soil properties and changes soil microbial communities in a Swiss sub-alpine pasture. *Geoderma* [Internet]. 2012;170(2012):369–77. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.11.026>
30. Zagal E, Rodríguez N, Vidal I, Flores A. Soil light organic matter fraction of a volcanic soil under different agronomic management as an indicator of changes in labile organic matter. *Agric Téc* [Internet]. 2002;62(2):284–96. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072002000200011>
31. J Galantini, L Suñer. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia*. 2008;XXV(1):41–55.
32. Lozano Z, Bravo C, Hernández R. Fracciones de la materia orgánica del suelo bajo sistemas de siembra directa y cultivos de cobertura. *Rev Fac Agron (LUZ)* [Internet]. 2011;28(1):35–56. Disponible en: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5057.1685>
33. Figuera K, Lozano Z, Rivero C. Caracterización de diferentes fracciones de la materia orgánica de tres suelos agrícolas venezolanos. *Venesuelos* [Internet]. 2011;13(1):34–46. Disponible en: http://190.169.30.98/ojs/index.php/rev_venes/article/view/977
34. Organización de las Naciones Unidas. *Perspectiva global de la tierra* [Internet]. 2017. Disponible en: www.unccd.int
35. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). *El suelo es un recurso no renovable, su conservación es esencial para la seguridad alimentaria y nuestro futuro sostenible* [Internet]. Roma, Italia; 2015. Disponible en: fao.org/soils-2015
36. Alba S, Alcázar M, Cermeño F, Barbero F. Erosión y Manejo del Suelo. Importancia del Laboreo Ante los Procesos Erosivos Naturales y Antrópicos. In: *Agricultura*

- ecológica en seco: soluciones sostenibles en ambientes mediterráneos [Internet]. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa; 2011. p. 13–38. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/60833>
37. Barboza C. Conferencia: conservación de suelos y agua en la cuenca del Río Jesús María. 2021.
 38. Nawaz M, Bourrié G, Trolard F. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development* [Internet]. 2013;33(2):291–309. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
 39. Rojas I. Erosión hídrica bajo tres estadios de sucesión de bosque dentro del Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* [Internet]. 2017;15(36):65–75. Disponible en: <https://doi.org/10.18845/rfmk.v15i36.3425>
 40. Diaz C. Alternatives for erosion control by using conventional coverage, non- using conventional coverage, nonconventional coverage and revegetation. *Ingeniería e Investigación* [Internet]. 2011;31(3):80–90. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/28645/>
 41. Angulo M, Beguería S. Análisis de la erosividad de la lluvia: Procesos, índices y fronteras de conocimiento. *Cuaternario y Geomorfología* [Internet]. 2013;27(1–2):53–69. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/82876>
 42. Camargo C, Pacheco C, López R. Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación cartográfica: una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica. *Gestión y Ambiente* [Internet]. 2017;20(2):265–80. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/ga.v20n2.63917>
 43. Blanco R, Aguilar A. Soil erosion and erosion thresholds in an agroforestry system of coffee (*Coffea arabica*) and mixed shade trees (*Inga* spp and *Musa* spp) in Northern Nicaragua. *Agriculture, Ecosystems and Environment* [Internet]. 2015;210(2015):25–35. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.04.032>
 44. Huerta J, Mota J, Gutiérrez R, Berber J, Menes M, García O, et al. Effect of plant cover of four crops on soil erosion. *IDESIA* [Internet]. 2018;36(2):153–62. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018005000701>

45. Comisión Asesora sobre Degradación de Tierras (CADETI). Porcentaje de erosión en Costa Rica - Conferencia Manos al suelo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo; 2015.
46. Rojas N. Estudio de las cuencas hidrográficas de Costa Rica. Análisis biofísico, climatológico y socioeconómico [Internet]. San José, Costa Rica: MINAET-IMN; 2011. Disponible en: <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/EstudioCuencas/EstudioCuencasHidrograficasCR.pdf>
47. Bonilla J, Rojas A. Hourly Variation in the Flow Measurements in the Jesus Maria Watershed with the Cup-type Current Meter Method. *Tropical Journal of Environmental Sciences* [Internet]. 2017;52(1):110–28. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15359/rca.52-1.6>
48. Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Atlas de Costa Rica 2014 [Internet]. 2014. Disponible en: <https://hdl.handle.net/2238/6749>
49. MAG-MINAE. Metodología para la Determinación de la Capacidad de Uso de las Tierras Agroecológicas de Costa Rica”, Decreto Ejecutivo N°41960-MAG-MINAE - La Gaceta- N°215 [Internet]. San José, Costa Rica: La Gaceta N 23; 2019. Disponible en: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=90001&nValor3=118346&strTipM=TC
50. Molina C. Determinación y cuantificación de la tasa de erosión en cafetales ubicados en la cuenca del Río Jesús María. Tesis de grado. 2015.
51. Bashagaluke J, Logah V, Opoku A, Sarkodie-Addo J, Quansah C. Soil nutrient loss through erosion: Impact of different cropping systems and soil amendments in Ghana. *PLOS ONE* [Internet]. 2018;13(12):1–17. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208250>
52. Dumanski J, Peiretti R. Modern concepts of soil conservation. *International Soil and Water Conservation Research* [Internet]. 2013;1(1):19–23. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30046-0](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30046-0)
53. Prins C, Vega D, Watler W, Mata E, Barboza C, Zúñiga P, et al. Acciones conjuntas y buenas prácticas para la implementación de actividades de restauración, manejo de cuencas y resiliencia de fincas y paisajes ante el cambio climático. Policy Brief:

- Síntesis para decisores [Internet]. 2017;PB 24(1):1–6. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11554/8540>
54. Comisión Asesora sobre Degradación de Tierras (CADETI), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Manual de herramientas sobre tecnologías de producción agropecuaria [Internet]. San José; 2015. Disponible en: <http://www.pequenasdonacionescr.org/documentacion/manual-de-herramientas-sobre-tecnologias-de-produccion-agropecuaria>
 55. Natural Resources Conservation Service - USDA. Conservation Practice Standard: Hillside Ditch (Code 423) [Internet]. 2013. Disponible en: https://www.blogs.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/16/stelprdb1244988.pdf
 56. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Obras de conservación de suelos y agua en laderas. Proyecto Red SICTA del IICA/Cooperación Suiza en América Central [Internet]. 2012. Disponible en: <http://repiica.iica.int/docs/b3470e/b3470e.pdf>
 57. Cubero D. Acequia de ladera y gavetas de infiltración [Internet]. 2019. Disponible en: http://www.platicar.go.cr/images/buscador/fichas-tecnicas/SUELOS/01_ACEQUIA_DE_LADERA.pdf
 58. Vásquez D. Entrevista virtual sobre intervención con obras de conservación de suelo y agua en parte alta de la cuenca de Río Jesús María. 2021.
 59. Mulyono A, Suriadikusumah A, Harriyanto R, Djuwansah M. Soil quality under agroforestry trees pattern in upper Citarum watershed, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering* [Internet]. 2019;20(1):203–13. Disponible en: <https://doi.org/10.12911/22998993/93942>
 60. Pinho R, Miller R, Alfaia S. Agroforestry and the improvement of soil fertility: A view from Amazonia. *Applied and Environmental Soil Science* [Internet]. 2012;2012(1):1–11. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2012/616383>
 61. Casanova F, Petit J, Solorio J. Los Sistemas Agroforestales Como Alternativa a la Captura de Carbono en el Trópico Mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* [Internet]. 2011;17(1):133–43. Disponible en: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.047>

62. de Stefano A, Jacobson M. Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis [Internet]. *Agroforestry Systems*. Springer Netherlands; Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0147-9>
63. Barrios E, Sileshi G, Shepherd K, Sinclair F. *Agroforestry and Soil Health: Linking Trees, Soil Biota, and Ecosystem Services*. In: *Soil Ecology and Ecosystem Services*. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press; 2012.
64. Rossi E, Montagnini F, Virginio E. Effects of management practices on coffee productivity and herbaceous species diversity in agroforestry systems in Costa Rica. In: *Agroforestry as a tool for landscape restoration*. Nueva York, Estados Unidos: Nova Science Publishers; 2011. p. 115–32.
65. Villarreyna R. Efecto de los árboles de sombra sobre el suelo, en sistemas agroforestales con café, incluyendo la fenología y fisiología de los cafetos [Internet]. 2016. Disponible en: [https://agritrop.cirad.fr/581648/1/Reporte_Sombra y fertilidad del suelo_Rev_Karel_BR_JA_BV_RV.pdf](https://agritrop.cirad.fr/581648/1/Reporte_Sombra_y_fertilidad_del_suelo_Rev_Karel_BR_JA_BV_RV.pdf)
66. Villarreyna R, Avelino J, Cerda R. Adaptación basada en ecosistemas: efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales. *Agronomía Mesoamericana* [Internet]. 2020;31(2):499–516. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15517/am.v31i2.37591>.
67. Lin B. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* [Internet]. 2010;150(4):510–8. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.010>
68. Ovalle O. Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales con café en Costa Rica. Centro Internacional de Agricultura Tropical [Internet]. 2016; Disponible en: <https://hdl.handle.net/10568/92854>
69. Gomez F, Roupsard O, le Maire G, Taugourdeau S, Perez A, van Oijen M, et al. Modelling the hydrological behavior of a coffee agroforestry basin in Costa Rica. *Hydrol Earth Syst Sci* [Internet]. 2011;15(2011):369–92. Disponible en: [doi:10.5194/hess-15-369-2011](https://doi.org/10.5194/hess-15-369-2011)
70. Zúñiga J. Diseño de obras de conservación de suelos para el manejo de aguas superficiales y control de cárcavas en el cultivo de piña. Tesis de grado. 2011.

71. Villón M. Drenaje. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica; 2007.
72. Núñez J. Manejo y conservación de suelos. San José, Costa Rica: EUNED; 2001.
73. Faustino J, Benegas L, Gómez M, Watler W, Ríos J, Rivera J, et al. Plan de Manejo para la cuenca del Río Jesús María. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) [Internet]. 2011. Disponible en: http://www.fonafifo.go.cr/documentacion/biblioteca/consultorias_investigaciones/ce_psa_006.pdf
74. Programa de Pequeñas Donaciones del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (PPN). Proyecto: Fomento de prácticas agro-conservacionistas en los sistemas de producción de la comunidad de Berlín de San Ramón como alternativa que contribuye a mitigar la degradación de suelos [Internet]. 2016. Disponible en: <http://www.pequenasdonacionescr.org/bases-de-datos-de-proyectos/fomento-de-practic-as-agro-conservacionistas-en-los-sistemas-de>
75. Hincapié E, Salazar L. Impacto de la erosión sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y la producción de café. Revista Cenicafé [Internet]. 2011;62(2):79–89. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10778/490>
76. Noelia Chavarría, Ana Tapia, Gabriela Soto EV. Efecto de diferentes sistemas de manejo sobre la calidad del suelo, en fincas cafetaleras de la zona de Turrialba y Orosi. Revista Intersedes Vol XIV N [Internet]. 2012;13(26):85–105. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/intersedes/article/view/2991>
77. Eyherabide M, Sainz H, Barbieri P, Echeverria H. Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. Ciencia del suelo [Internet]. 2014;32(1):13–9. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/25777>
78. Feller C, Burtin G, Gerald B, Balesdent J. Utilisation des résines sodiques et des ultrasons dans le fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Intérêt et limites. Science du sol [Internet]. 1991;29(2):77–93. Disponible en: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=FR2021081861>
79. Mata R, Sandoval D. Mapa Digital de Suelos [Internet]. San José, Costa Rica: Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica; 2016. Disponible en: http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139

80. Mata R. Proyecto B8196 “Valoración económica del uso de acequias de ladera y gavetas en cuenca alta del río Jesús María”. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica; 2017.
81. Salamanca A, Siavosh Sadeghian. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetalera colombiana. *Cenicafé* [Internet]. 2005;56(4):381–97. Disponible en: <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc056%2804%29381-397.pdf>
82. Cardona D, Sadeghian S. Beneficios del sombrío de guamo en suelos cafeteros. *Avances Técnicos - Cenicafé* [Internet]. 2005;335. Disponible en: <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/411>
83. Andrade H, Alvarado J, Segura M. Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio del Líbano, Tolima, Colombia. *Colombia Forestal* [Internet]. 2013;16(1):21–31. Disponible en: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a02>
84. González M, Murillo R, Virginio EDM, Ávila C. Influencia de factores biofísicos y de manejo en el crecimiento de *Cedrela odorata* L. en asocio con café en Pérez Zeledón, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* [Internet]. 2017;15(36):46–58. Disponible en: <https://doi.org/10.18845/rfmk.v15i36.3420>
85. Hergoualc’h K, Blanchart E, Skiba U, Hénault C, Harmand JM. Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* [Internet]. 2012;148(2012):102–10. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.018>
86. Porras C. Efecto de los sistemas agroforestales de café orgánico y convencional sobre las características de suelos en el Corredor Biológico Turrialba-Jiménez, Costa Rica [Internet]. Tesis de maestría. 2006. Disponible en: http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/4881/Efecto_de_los_sistemas_agroforestales_de_cafe_organico.pdf;jsessionid=C3DE29B1033C0C4502C0FA08C605FACC?sequence=1
87. Ludwing O. Valoración de la acequia de ladera como alternativa tecnológica para el uso sostenible de los suelos en El Salvador [Internet]. Tesis de maestría. 2000. Disponible en: <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0336e/A0336e.pdf>

88. Grupo Carlos Garcia C-C. Reciclado en suelos de enmiendas orgánicas de calidad, basadas en residuos orgánicos: manejo para un suelo sostenible y estrategias contra la degradación y erosión de los suelos. Zaragoza: ECODES-Fundación Ecología y Desarrollo; 2019.
89. Ávila G, Jiménez F, Beer J, Gómez M, Ibrahim M. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* [Internet]. 2001;8(30):32–5. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/nonfao/lead/x6349s/x6349s00.pdf>
90. Mena V, Andrade H, Navarro C. Biomasa y carbono almacenado en sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios en un gradiente altitudinal en Costa Rica. *Agroforestería Neotropical* [Internet]. 2011;1(1):2–20. Disponible en: <http://repository.ut.edu.co/handle/001/1278>
91. Corral R, Duicela L, Maza H. Fijación y Almacenamiento de Carbono en Sistemas Agroforestales con Café Arábigo y Cacao, en dos Zonas Agroecológicas del Litoral Ecuatoriano [Internet]. X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. 2006. Disponible en: <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/15.-Fijacion-y-Almacenamiento.pdf>
92. FAO. Factores ambientales [Internet]. 2020. Disponible en: <http://www.fao.org/3/x8234s/x8234s08.htm>
93. Mólgora A. Efecto del manejo de la cobertura vegetal sobre la erosión hídrica en cafetales de sombra [Internet]. Vol. 51, Tesis de maestría. 2013. Disponible en: https://inecol.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1005/63/1/6571_2013-10701.pdf
94. Cannavo P, Sansoulet J, Harmand J, Siles P, Dreyer E, Vaast P. Agroforestry associating coffee and *Inga densiflora* results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* [Internet]. 2011;140(1–2):1–13. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2010.11.005>
95. Cardona D, Sadeghian S. Caracterización de la fertilidad del suelo en monocultivos de café (*Coffea arabica*) y bajo sombrío de guamo (*Inga spp*). *Revista Colombiana Forestal* [Internet]. 2005;9(18):87–97. Disponible en: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2005.1.a07>

96. Carvalho R, Goedert W, Armando M. Physical features of soil quality under an agroforestry system. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* [Internet]. 2004;39(11):1153–5. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2004001100015>
97. Paz I, Sánchez M. Relación entre dos sistemas de sombrío de café y algunas propiedades físicas del suelo en la meseta de Popayán. 2007;5(2):39–43. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169920333001>
98. Alcántara E, M F. Efeitos de metodos de controle de plantas daninhas na cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) sobre a qualidade fisica do solo. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* [Internet]. 2001;24(4):711–21. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000400003>

10.ANEXOS

Anexo 1.

Entrevista: Intervención con obras de conservación en la parte alta de la cuenca del Río Jesús María

Ing. Agr. Donald Vásquez Pacheco.

1. Antes de implementar el plan de conservación ¿se hicieron estudios técnicos previos para escoger el tipo de obras de conservación que más se adecuan al lugar dadas sus condiciones y características (relieve, topografía, tipos de cultivo producidos...)?
2. ¿Cuáles fueron los criterios iniciales para la escogencia de las acequias de ladera y gavetas de infiltración como obras de conservación de suelos y agua en la parte alta de la cuenca? ¿Por qué estas obras?
3. ¿Antes de la implementación del plan de conservación los productores ya utilizaban obras de conservación de este tipo? ¿Cómo fue la aceptación de los productores ante la recomendación de implementar acequias y gavetas?
4. ¿Podría indicar las dimensiones características de las acequias de ladera? ¿Estas dimensiones se utilizan para las acequias de ladera en toda la parte alta de la cuenca o varían de una finca a otra, o entre productores?
5. ¿Cuáles fueron los criterios empleados para determinar que esas dimensiones de acequias son las correctas para implementarlas en esta zona? ¿Se hicieron cálculos considerando caudales (escorrentía), intensidad máxima, tiempo de concentración, áreas de aporte y

demás factores relacionados al diseño de canales (geometría...), o se basaron en experiencias en otras zonas?

6. ¿Cuál es el distanciamiento entre acequias de ladera que se utiliza en las fincas? ¿Este valor varía entre fincas, sistemas productivos, productores?
7. ¿Se construyeron canales de guardia para recolectar el exceso de agua que canalizan las acequias de ladera? Si es así ¿cuáles son las características de este (dimensiones, entre otros)?

¿Podría indicar las dimensiones características de las gavetas de infiltración? ¿Estas dimensiones varían dependiendo de la finca, sistemas productivos, productor?
8. ¿Cuáles fueron los criterios empleados para determinar las dimensiones de las gavetas?

¿Se hicieron cálculos considerando caudales de escorrentía para determinar si la capacidad de las gavetas es suficiente para el tipo de terreno y topografía (ladera) donde se siembra café?
9. ¿Cuál es el criterio para decidir donde se construyen las gavetas dentro del terreno, o bien, la separación entre ellas?
10. ¿Cuál es el plan de mantenimiento que se le da a estas obras de conservación? ¿Cada cuanto se realiza (desenterramiento, entre otros)?
11. ¿Cuáles otros tipos de obras o prácticas de conservación se implementan en las fincas de la parte alta de la cuenca junto con las acequias y gavetas?
12. Luego de que se brinda apoyo técnico a los productores para la construcción de las obras de conservación en sus fincas ¿qué tipo de seguimiento dan los diferentes entes MAG,

CADETI, entre otros, para asegurar que dichas obras están cumpliendo su función correctamente?

13. ¿Cómo ha sido la aceptación de los productores de la parte alta de la cuenca ante el programa de implementación de estas obras de conservación? ¿Se ha notado un cambio en cuanto a la opinión de los productores respecto a la importancia de la conservación de suelos en sistemas productivos?
14. ¿Existe información que respalde que las acequias de ladera y las gavetas han tenido algún tipo de influencia sobre la tasa de erosión y pérdida de suelo en fincas productoras de café en laderas? ¿Se ha notado un cambio importante o no?