

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ciencias Sociales
Escuela de Geografía

Trabajo Final de Graduación bajo la modalidad de Tesis para optar por el grado de
Licenciatura en Geografía.

ESTIMACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS TASAS DE EROSIÓN Y ACUMULACIÓN
DEL SUELO MEDIANTE EL TRAZADOR RADIOISOTÓPICO ^{137}CS EN LA MICROCUENCA
DE RÍO SAN LORENCITO, SAN RAMÓN, COSTA RICA.

2017-2018

Postulante:

Bach. Katherine Vargas Arias

B26942

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

Año 2019

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras.....	
Índice de gráficos.....	
Índice de cuadros.....	
Índice de tablas	
1.1. Introducción.....	14
1.2. Área de estudio.....	15
1.3. Problema de investigación	0
1.4. Objetivos.....	1
1.4.1 Objetivo General	1
1.4.2. Objetivos Específicos	1
1.5. Antecedentes.....	1
1.6. Justificación	6
1.7. Marco conceptual	8
1.7.1. Abordaje geográfico de los procesos erosivos	8
1.7.2 Fundamentos Radioisotópicos: Caso ¹³⁷ Cs	10
1.8. Metodología	12
1.8.1 Algunas especificaciones metodológicas	12
1.8.2. Recolección y tratamiento de muestras de suelo para la obtención de los datos de concentración del ¹³⁷ Cs.....	13
1.8.3. Estimación de la concentración de ¹³⁷ Cs en el suelo	14
1.8.4. Determinación de factores biogeofísicos.....	15
1.8.5. Modelo matemático para determinar tasas de erosión y acumulación.....	16
6. Bibliografía.....	5
7. Anexos	

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación ampliada de la Microcuenca	10
Figura 2. Dinámica de la difusión de ^{137}Cs	22
Figura 3. Flujo metodológico del proyecto de investigación	30
Figura 4. Distribución de las muestras individuales y perfiles de referencia	31
Figura 5. Distribución de los puntos de muestreo de suelo (Ladera 1 y 2)	32
Figura 6. Distribución de los puntos de muestreo: a) Ladera 1 b) Ladera 2	34
Figura 7. Distribución espacial de los resultados del inventario en Ladera 1 e inventario en Ladera 2.....	44
Figura 8. Factores biogeográficos determinantes de la dinámica erosiva en la cuenca.....	50
Figura 9. Matriz de correlación con los factores biogeofísicos para los puntos de (a) acumulación y (b) erosión.....	52

Índice de gráficos

Gráfico 1. Distribución granulométrica de perfil de referencia Ladera 1.....	36
Gráfico 2. Distribución granulométrica de perfil de referencia Ladera 2.....	37
Gráfico 3. Distribución granulométrica de las muestras Ladera 1.....	37
Gráfico 4. Distribución granulométrica de las muestras Ladera 2.....	38
Gráfico 5. Concentración de ^{137}Cs en perfil de referencia 1.....	40
Gráfico 6. Concentración de ^{137}Cs en perfil de referencia 2.....	41
Gráfico 7. Concentración de ^{137}Cs en puntos de muestreo.....	41
Gráfico 8. Datos de inventario (Bq/m^2) para cada aumento de profundidad para el perfil de referencia 1.....	54
Gráfico 9. Datos de inventario (Bq/m^2) para cada aumento de profundidad para el perfil de referencia 2.....	55
Gráfico 10. Datos acumulativos de inventario (Bq/m^2) para el perfil de referencia 1.....	55
Gráfico 11. Datos acumulativos de inventario (Bq/m^2) para el perfil de referencia 2.....	56

Índice de cuadros

Cuadro 1. Descripción general de los puntos de muestreo, tanto de referencia como individuales.....	33
Cuadro 2. Concentración de ^{137}Cs en perfiles de referencia a) Perfil de referencia Ladera 1. b) Perfil de referencia Ladera 2.....	39
Cuadro 3. Resultados de la concentración de ^{137}Cs por muestras (Bq/Kg) y resultados del inventario del Isótopo ^{137}Cs para los puntos de muestreo en porcentaje (%) (Los valores negativos rojos de indican erosión, mientras que los valores positivos verdes indican depositación).....	42

Resumen

Los paisajes volcánicos tropicales se caracterizan por transformaciones a corto plazo debido al volcanismo y la actividad sísmica, deslizamientos de tierra y otros movimientos de masas frecuentes. Estos procesos de formación del paisaje se ven amplificados por las altas tasas de precipitación anual, temperaturas y tormentas intensas. Esto último puede resultar en una escorrentía superficial significativa y erosión del suelo, incluso bajo una cubierta de selva tropical prístina. Sin embargo, el conocimiento sobre las fuentes de sedimentos y la cuantificación de las tasas de erosión y acumulación sigue siendo limitado.

Este estudio utilizó ^{137}Cs como trazador radioisotópico para llenar ese vacío de conocimiento en una cuenca de bosque tropical húmedo y prístino en el norte de Costa Rica (3.2 km² de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes, ReBAMB). Se extrajeron dos perfiles de referencia de suelo para el muestreo de suelo cada 3 cm en ambas laderas de la empinada cuenca del valle en forma de V, para las cuales se analizó la concentración del trazador radioisotópico con un espectrómetro de rayos gamma HPGe Canberra (modelo GC2520) de alta resolución. Posteriormente se analizaron muestras de suelo superficial recogidas (17) y la radiactividad resultante se relacionó con el perfil de referencia.

En los resultados se encontraron diferencias entre ambas laderas, con las muestras recogidas en las laderas más bajas y una mayor densidad de vegetación que muestran evidencia de erosión y acumulación, mientras que las muestras de la ladera más empinada con vegetación menos densa y más suelos arenosos indicaron

principalmente erosión cuesta arriba. El modelo de difusión y migración se utilizó para estimar una distribución espacial de las tasas de erosión y acumulación.

Los resultados generalmente mostraron que hay una redistribución significativa de materiales en una cuenca virgen de la selva tropical que debe tomarse como datos de referencia para estudios de transporte de sedimentos más abajo y una escala de tiempo más completa de los procesos de formación de paisajes en regiones volcánicas y tropicales.

1. Capítulo primero: Marco introductorio

1.1. Introducción

El estudio de la distribución del suelo en términos de remoción de material superficial se ha convertido en un proceso de gran importancia para la Geografía, ya que el conocer de la dinámica espacial en un área en específico permite tomar decisiones para el desarrollo de estudios de ordenamiento y manejo de cuencas hidrológicas.

El suelo es el lugar donde se desarrolla gran parte de la vida terrestre. Por lo que, junto con el agua y el aire, es uno de los recursos naturales y limitados más importantes para la actividad humana. El suelo está sujeto a pérdidas por erosión y debe ser estudiado y analizado para una posible conservación o bien, restauración del mismo.

Para una estimación de erosión de suelo se han establecido diferentes metodologías, pero la cuantificación es compleja debido a la gran heterogeneidad espacial y los métodos limitados de medición directa del proceso erosivo. Recientemente, la utilización y aplicación de isótopos radiactivos como trazadores, han sido muy útiles para comprender procesos hidrológicos proporcionando nuevos conocimientos en temas de la hidrogeomorfología cuantitativa los cuales son poco estudiados en el país.

El presente estudio tiene como objetivo principal determinar la distribución espacial de las tasas de erosión y acumulación del suelo en la microcuenca del río San Lorencito, estudiando la concentración del isótopo radiactivo ^{137}Cs . La concentración se determinó con la teoría de espectrometría gamma de alta resolución. Los datos

obtenidos permiten cuantificar la erosión del suelo con el ajuste y aplicación de un modelo matemático y la relación con los factores biogeofísicos determinantes en la dinámica del suelo en este espacio geográfico.

La adaptación y utilización del modelo de la erosión en una cuenca hidrográfica en estado casi natural, desde el punto de vista de la ciencia geográfica se vinculan tres de sus amplias ramas, como lo son la geomorfología, entendiéndose como “el estudio de las formas del relieve terrestre y sus procesos de formación” (Gutiérrez, 2004); y la hidrología la cual se define como “la ciencia que trata de las aguas terrestres, de sus maneras de aparecer, de su circulación y distribución en el globo, de sus propiedades físicas y químicas y sus interacciones con el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos” (SAGARPA, s.f) y la pedología. Este estudio se realizó dentro del marco del proyecto de investigación B7082 Estudios Cronológicos y de Sedimentación con Radioisótopos en la Microcuenca del Río San Lorencito en San Ramón del Centro de Investigación en Ciencias Atómicas, Nucleares y Moleculares (CICANUM), en conjunto con la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica.

1.2. Área de estudio

La microcuenca del río San Lorencito se encuentra dentro del área que abarca la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes, la cual se encuentra al noreste del país en el Área de Conservación Cordillera Volcánica Central. Esta está ubicada según la división administrativa del país en los cantones de San Ramón y Montes de Oro, los cuales pertenecen a las provincias de Alajuela y Puntarenas respectivamente. Mayoritariamente se encuentra en el distrito Los Ángeles de San Ramón de Alajuela (**Figura 1**), tiene un área total de aproximadamente 3,2 km². Según el Sistema

Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) en su página web, se ubica en la parte sureste de la Sierra Minera de Tilarán.

Según Artavia (2005) esta Reserva fue fundada en 1975, pero no fue hasta 1991 que se implementó su actual categoría de manejo y es administrada por la Universidad de Costa Rica a través de su sede regional de Occidente, con supervisión del Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET).

Solano & Granados (2017) mencionan citan la Ley 7354 (1993) en su artículo 4 la cual indica que el acceso y la acciones que se pueden llevar a cabo dentro de la Reserva Biológica son muy limitadas, siendo meramente para investigación, docencia y conservación.

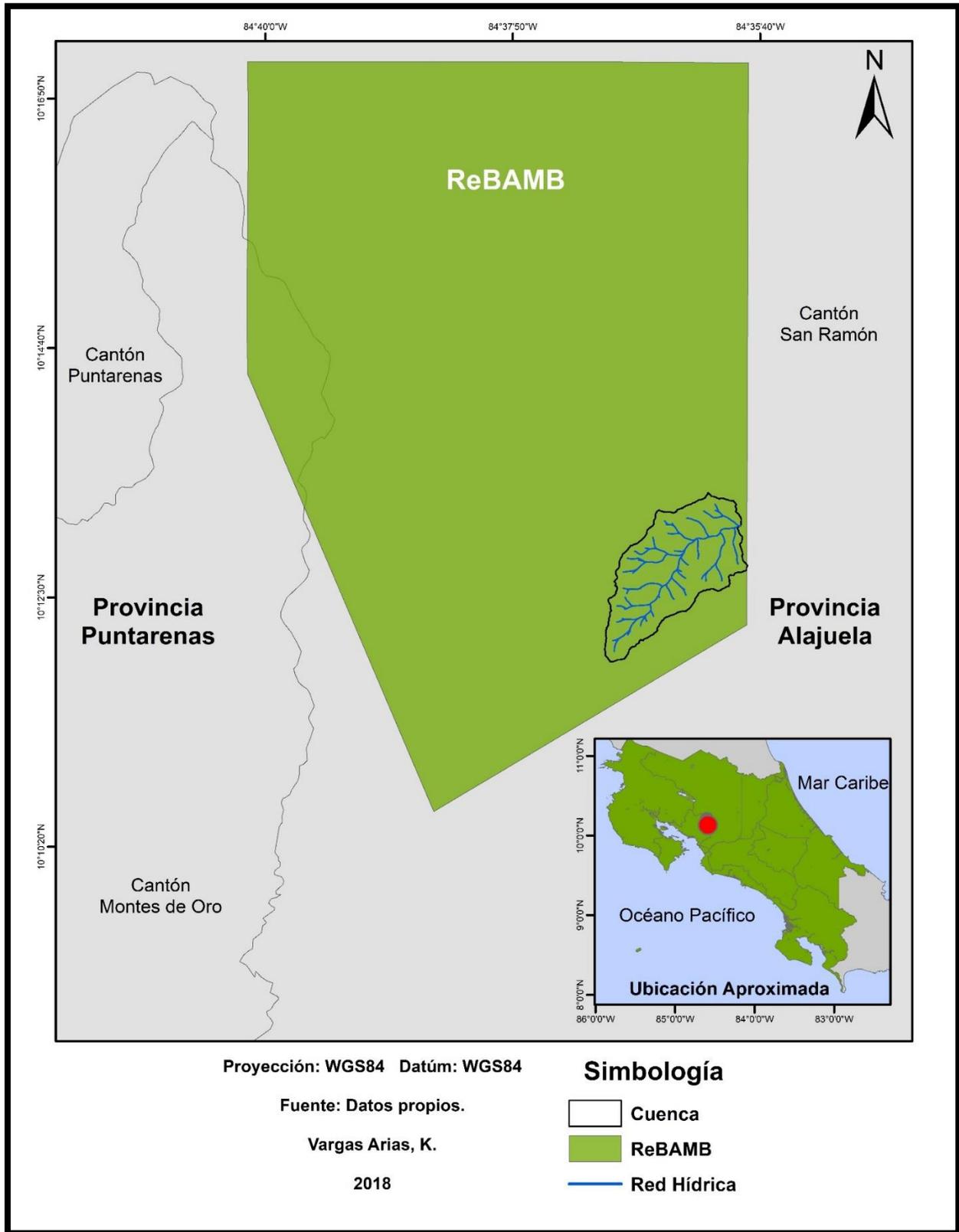


Figura 1. Ubicación ampliada de la Microcuenca

1.3. Problema de investigación

Según López (2002), el problema de la pérdida de suelo es tan antiguo como la historia de la humanidad, de hecho, científicos e investigadores comparten la hipótesis de señalar los procesos erosivos desmedidos como causante principal de la caída y desaparición de grandes civilizaciones en el pasado. Actualmente las tasas anuales y mundiales de erosión hídrica rondan las 7,4 toneladas por hectárea y las tasas de erosión eólica anuales las 6,2 toneladas por hectárea (FAO, 2016).

La pérdida excesiva o degradación del suelo trae como resultado un impacto irreversible en el bienestar de la sociedad y ambiente, donde en el mundo actual se alcanza proporciones alarmantes de la erosión de los suelos.

El estudio de la erosión y distribución espacial del suelo es fundamental para entender los riesgos de los ecosistemas, debido principalmente a cambios ambientales. En esta investigación específica se implementan nuevas técnicas para lograr evaluar esta dinámica en el suelo. Es importante mencionar que el estudio se realizó en un área con bosque prístino con el fin de someter a prueba la eficacia de la metodología en un espacio sin intervención donde la erosión forma parte de la dinámica natural del sistema que brinda recurso hídrico para usuarios río abajo como empresas hidroeléctricas, agua para riego y uso doméstico. Ante ello, se plantea la necesidad de investigar ¿qué tan efectiva es la aplicación de la metodología isotópica y modelado para analizar las tasas de erosión y acumulación del suelo y cómo interviene las diferentes características en los resultados obtenidos?

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Analizar la distribución espacial de tasas de erosión y acumulación del suelo mediante la concentración del isótopo radiactivo ^{137}Cs en el suelo con el método de Espectrometría Gamma de Alta Resolución en la microcuenca del río San Lorencito en la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes en San Ramón, Alajuela.

1.4.2. Objetivos Específicos

- I. Determinar la concentración del isótopo radiactivo ^{137}Cs en muestras de suelo, mediante la técnica de espectrometría gamma de alta resolución.
- II. Determinar los factores biogeofísicos que ejercen una mayor influencia en la erosión en ambientes tropicales con cobertura boscosa en condiciones naturales y con geología volcánica.
- III. Aplicar y ajustar un modelo matemático para determinar la tasa de erosión y acumulación del suelo y su distribución espacial en la microcuenca de estudio a través de los trazadores radioisotópicos.

1.5. Antecedentes

El estudio de los sistemas hidrográficos, en particular de las cuencas hídricas, permite el conocimiento adecuado de las características y procesos que integran estos sistemas. En conjunto con la geomorfología, se desarrolla un enfoque llamado *hidrogeomorfología* el cual viene a estudiar los caracteres hidrológicos que son determinados por los diferentes fenómenos geomorfológicos, como por ejemplo los

procesos y formas que se desarrollan con la dinámica hídrica, la erosión y acumulación de sedimentos.

Los análisis utilizados para la determinación de estas dinámicas hidrogeomorfológicas son, por ejemplo, el estudio realizado por Walling and He (1999), en su estudio *Modelos mejorados para estimar las tasas de erosión del suelo a partir de mediciones de Cesio 137*, donde se utilizan modelos para estimación de tasas de redistribución y erosión hídrica del suelo a partir de las mediciones del decaimiento del ^{137}Cs en el perfil de suelo, donde se toman en cuenta la entrada de precipitación dependiente del tiempo, distribución inicial dentro de la capa superficial, redistribución post-deposición resultante de los procesos mecánicos, físicos, químicos y biológicos que operan en el sistema del suelo y la selectividad del tamaño de grano asociada con la erosión del suelo y los procesos de transporte de sedimentos.

Otras aproximaciones realizadas para analizar la relación entre redistribución de Radionucleidos en el suelo y procesos de erosión fue llevada a cabo por Menzel en 1960, al estudiar la pérdida de ^{90}Sr desde parcelas de erosión. En los años 1965 y 1970, Rogowski y Tamura investigan el “comportamiento erosional” del ^{137}Cs al adicionarlo como trazador al suelo. Durante la década del 70, Ritchie y McHenry confirman el potencial del uso de ^{137}Cs en estudios de erosión y sedimentación del suelo al establecer una relación exponencial entre la pérdida de suelo y la de ^{137}Cs (Zapata et al., 2002).

A partir de estas primeras investigaciones, se amplía el uso de radionucleidos ambientales al reconocerlos como herramientas útiles tanto en la cuantificación de

tasas de erosión del suelo como en modelos de sedimentación en cursos de agua. Algunos de ellos son: ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^7Be , $^{239-240}\text{Pu}$, ^{14}C , ^{32}Si , ^{26}Al y otros. (Zapata, 2003).

El estudio de Plomo (^{210}Pb) que es un elemento de origen natural se utiliza para cuantificar tasas de erosión desde los primeros años de la década de los 70 del siglo anterior. Este estudio cronológico se puede utilizar para una posterior determinación de las tasas de erosión y sedimentación del suelo, con la búsqueda de técnicas confiables que permitan cuantificar las concentraciones de los diferentes isotopos radiactivos en términos de trazadores de erosión.

Para el 2016, Meusbürger, K et al desarrollan un artículo en *Science of The Total Environment* denominado como *Enfoque Multi-radionucleido para evaluar la idoneidad de $^{239} + ^{240} \text{Pu}$ como trazador de erosión del suelo*. Este estudio se efectuó en la cuenca de captación del Lago Soyang en Corea del Sur, donde se realizó una comparación de los radioisótopos de Plutonio con los ya establecidos de Cesio 137 y el Plomo 210. Los resultados establecieron altas tasas de erosión en la zona de estudio para los tres radioisótopos.

Las técnicas de radiotrazadores de erosión del suelo han sido poco estudiadas, donde se han desarrollado es principalmente en las zonas templadas del planeta, como por ejemplo en los países de Inglaterra y España, en el caso de las zonas tropicales se han realizado pocos estudios, lo cual da relevancia a investigación.

Para el año 2003, Navas, A et, al realizan una investigación de *Trazadores Radioisotópicos de la Redistribución del suelo: Su aplicación en las Laderas*

Mediterráneas, el estudio se realiza en la cuenca del río Ebro, donde se han presentado altos riesgos de desertificación por erosión hídrica que ocasionan serios efectos ambientales y pérdidas económicas. En este estudio se utilizó la técnica radiométrica con radioisótopos comunes como lo son el Cesio 137 (^{137}Cs) y el plomo 210 (^{210}Pb), los cuales son los más eficaces para determinar la erosión y sedimentación del suelo. Este análisis de concentración radioisotópica fue realizado con la técnica de espectrometría Gamma de alta resolución mediante un detector coaxial de germanio hiperpuro, donde se establece un conteo de emisiones gamma de los radioisótopos que contiene el suelo.

Por otra parte, para el año 2012 Alberto Fernández García, realizó en su tesis de maestría en la Universidad de Cantabria, España, la cual se tituló *Datación de Sedimentos y evaluación de sedimentación mediante el análisis de isótopos radiactivos de origen natural y artificial usados como trazadores*, el cual formó parte de un programa de radiocronología de estuarios en el norte de España, en este caso de Ría de Vigo en Galicia, España. Esta investigación consistió en la utilización igualmente del Cesio137 (^{137}Cs) y el Plomo210 (^{210}Pb) como trazadores de procesos ambientales, esto mediante el proceso de espectroscopia Gamma y una aplicación de un modelo matemático utilizado en este campo como lo es el CRS (Constant Rate of Supply). Después del análisis correspondiente se establece una concentración del Cesio, pero con niveles no nocivos para la población, en el caso del Plomo se integra al suelo por vía húmeda de la atmósfera. Estos resultados arrojan mediante el modelo utilizado que existe una disminución tanto de la tasa másica, como de las tasas de acumulación sedimentaria.

Otro estudio fue realizado en 1999 por Castillo et al, donde se estableció la *Utilización de ^{137}Cs en cuantificación de erosión y sedimentación en un Palehumult*

de la XI Región, esto en Chile. La metodología establecida es de igual manera la adaptación de tres modelos matemáticos para la tasa media de erosión, sedimentación y distribución espacial del ^{137}Cs , donde se determinaron resultados más altos de erosión en zonas de alta pendiente y de mayor sedimentación en las bases de éstas, lo cual garantiza el uso de las técnicas de radioisótopos para la determinación de las tasas seleccionadas.

Por otra parte, para el caso de la adaptación de estas metodologías a zonas tropicales se ha encontrado un estudio realizado en el 2014, donde Bonotto, D & García, R presentan un artículo denominado *Evaluación Comparativa de los modelos CS y CRS en estudios cronológicos de ^{210}Pb aplicados a cuencas hidrográficas en Brasil*, donde se muestrearon cuatro sistemas ribereños como lo son los ríos Curumbataí, Atibaia, dos Bagres y Amazonas. Este estudio se basó en la utilización de espectrometría alfa, luego se estableció que para el caso de las tasas de sedimentación es el modelo más apto y fiable es el CRS, pero para términos cronológicos el modelo CS predijo valores por encima de los 150 años, mientras que el CS correspondió a 117 años que es un tiempo compatible con el tiempo de restricción para la datación del $\text{Pb}210$.

Para el año 2018 Velasco et al publican el artículo *Adaptación de la técnica del ^{137}Cs para documentar tasa de redistribución de suelo asociadas a prácticas de cultivo tradicional en Haití*, el cual se puede tomar como el antecedente regional más cercano a Costa Rica. Este se basó en establecer las tasas de redistribución del suelo en un suelo cultivado, mediante la técnica de espectrometría gamma, utilizando el ^{137}Cs como trazador en suelos cultivados.

Para el caso de Costa Rica es importante mencionar que este tipo de metodología para estimar la datación del suelo y la tasa de erosión, no se ha realizado a fondo. En el 2017 Vargas, K realizó una investigación previa donde se establecieron algunos puntos de muestreo para determinar la dinámica de la erosión y acumulación del suelo en la microcuenca de estudio, esto con el fin de comprobar en primer momento la funcionalidad de la metodología.

Analizando los antecedentes hallados relacionados al tema de estudio, queda en evidencia la escasa información existente de estudios en el país. Por otra parte, es importante mencionar que el contexto geográfico en los cuales se desarrollaron los estudios relacionados, son completamente distintos a los del área de estudio, originalmente son utilizados en medios templados y estas técnicas se pretenden implementar en un medio tropical, tanto así, un carácter pionero y experimental a la investigación en el país.

1.6. Justificación

El suelo es el lugar donde se desarrolla una gran parte de la vida terrestre y es uno de los recursos naturales y no renovables más importantes para la actividad humana. Sin embargo, el suelo está sujeto a procesos de erosión natural y por medio de intervención entrópica. Se estima que a nivel global se pierden anualmente 7 ton/ha de suelo promedio por malas prácticas agrícolas (FAO, 2016). Esta estimación de pérdida de suelo se deriva de una multitud de estudios en ambientes agrícolas y zonas del medio templado. No obstante, hay una pérdida de suelos en ambientes naturales que es la expresión de la variabilidad climática y características

geomorfológicas y de los suelos sobre todo en los trópicos. Dicha erosión que forma parte de una dinámica natural no se ha estudiado con rigor en Costa Rica.

Adicionalmente, se trata de un fenómeno complicado de medir directamente y a su vez, de explicar mediante un modelado. La técnica de espectrometría gamma de alta resolución para el análisis de la concentración de isótopos radiactivos (Cesio 137 específicamente) en el suelo se posiciona como herramienta novedosa para facilitar la cuantificación de tasas de erosión a partir de una datación cronológica y provisiona un dato necesario para anclar modelos que permiten llevar la medición puntual a escala cuenca.

La aplicación del método de radioisótopos en combinación con modelos matemáticos para el análisis de procesos ambientales como la erosión de suelos, se convierte en el desarrollo de ciencia novedosa que puede llegar a beneficiar a la sociedad mediante la facilitación de los análisis que se lleven a cabo. Como parte de los beneficios a los poblados que se encuentran aguas abajo de la microcuenca, por ejemplo, los proyectos hidroeléctricos que pueden utilizar la estimación de la tasa de erosión para un mejor manejo y mantenimiento de sus proyectos. Así mismo, este estudio puede utilizarse como base para investigaciones posteriores que incluyan el impacto en la salud por agua potable generado por sustancias tóxicas transportadas a través de complejos orgánicos en el material suspendido en los ríos.

Por último, la aplicación de esta técnica novedosa en Costa Rica de concentración de isótopos radiactivos (caso específico del ^{137}Cs) para la distribución espacial y determinación de las tasas de erosión y acumulación del suelo, permite establecer la dinámica de una microcuenca en condiciones más naturales, para luego

modelar, estudiar y gestionar el comportamiento de cuencas afectadas por un cambio ambiental como la conversión de usos de suelo de bosque a pasto, entre otras. Es necesario tomar en cuenta que, al implementarse la metodología en un área no alterada, para aplicarla en áreas alteradas es necesario que se identifiquen las diferentes características que influyen en el lugar y se ajuste la metodología a la misma.

Esta investigación parte desde la disciplina geográfica, estudiando procesos geomorfológicos de erosión y acumulación del suelo, pero con la utilización de una metodología con fundamentos físicos que van a reforzar y ayudan a explicar el comportamiento de este tipo de procesos geográficos.

1.7. Marco conceptual

La estimación de la erosión del suelo mediante diferentes métodos y técnicas aplicadas es un pilar en Geomorfología, permitiendo establecer diferentes procesos para dar respuesta a un problema en específico como la movilización de partículas del sustrato pedológico en un sistema específico. La metodología de estudio para esta investigación utiliza los isótopos ambientales radiactivos como un tema central como base para una Geomorfología cuantitativa. Para la aplicación y posterior determinación de los procesos erosivos, se deben tomar en cuenta algunos aspectos que son de suma importancia.

1.7.1. Abordaje geográfico de los procesos erosivos

La erosión se refiere al desgaste de la superficie terrestre bajo la acción de los agentes erosivos, siendo los principales el agua y el viento (Chevesich & García, 2015).

Por otro lado, Faustino, J (1986) lo define como el proceso de desprendimiento y movimientos de partículas llamado también “acción de desgaste”, que se origina fundamentalmente por la acción del agua o del viento (este último no se considera en este estudio).

La erosión se puede ver desde dos puntos importantes, como un fenómeno natural modificador de la superficie terrestre o como un fenómeno generado principalmente por la acción del ser humano; siendo la primera la generadora de la erosión en este tema de investigación.

En el caso de la erosión natural o geológica se puede entender como el desgaste natural de la superficie de la tierra sin intervención del hombre. Los factores que actúan en este tipo de erosión son: el agua de lluvia, las corrientes fluviales, el mar, el viento, la tectónica, la temperatura, factores biogeoquímicos originando la meteorización de rocas y la gravedad. Es un proceso que tiende a buscar una estabilidad de la superficie en equilibrio entre el suelo, la vegetación, los animales y el agua, y que aún continúa en muchas regiones jóvenes de la tierra.

La dinámica de la erosión de los suelos está determinada por diferentes factores que impactan con regularidad el sustrato edáfico, así como en su formación, como por ejemplo el material parental, climas, topografía y actividad biológica. El factor principal viene a ser el tiempo, ya que este es el responsable de los paisajes terrestres con el paso de los años.

Este proceso está comprendido por tres fases, las dos primeras son el **desprendimiento** y el **transporte** del suelo y el tercero ocurre cuando no exista una fuerza de transporte se da la **depositación** de las partículas desprendidas (García, P.

2004). Los agentes principales desarrolladores de erosión son el agua, el viento, el hielo y la gravedad. Para este caso en específico se desarrollará la erosión por el agua o bien, erosión hídrica.

Este tipo de erosión son los que degradan uniformemente la superficie del suelo. Este es un fenómeno espacial y temporal, en el primer caso ésta se distribuye sobre la superficie donde quieran que impacten las gotas de lluvia. Por otro lado, es un proceso que puede ser caracterizado en fases secuenciales (Ureña, 1999), estas son las anteriormente mencionadas (desprendimiento, transporte y sedimentación) y las cuales se dan al mismo tiempo sobre la superficie expuesta.

A nivel de cuenca, la erosión del suelo puede tener muchos impactos que son estrechamente vinculados a los problemas desertificación, tales como sedimentación en los embalses, los problemas de las inundaciones, la pérdida de zonas fértiles y llanuras de inundación, la pérdida de nutrientes, la eutrofización y la destrucción de los hábitats ecológicos (Vanmaercke et al., 2011).

1.7.2 Fundamentos Radioisotópicos: Caso ^{137}Cs

La radioactividad es un fenómeno natural por el cual ciertos átomos cambian su estructura, además, provee métodos de datación, trazadores, evaluación de información y las huellas digitales de los procesos químicos en casi todos los entornos. La comprensión de este fenómeno ha permitido su aplicación en diferentes actividades. En condiciones naturales la mayor proporción de la radiación a la que estamos expuestos provienen de fuentes naturales por ejemplo del espacio, rocas, suelo, agua y hasta de nuestro propio cuerpo

En el caso específico del radionucleido en estudio que es el Cesio-137 (^{137}Cs) es un radionucleido emisor gamma que produce un fotón de 661,6 keV de energía y tiene un periodo de semidesintegración de 30,02 años. El ^{137}Cs es un isótopo artificial, procedente de la fisión en la reacción nuclear de los neutrones con el uranio. (Alomoro, et Al, 2013) Su presencia y distribución en el medio ambiente se debe a las pruebas de armamento nuclear y accidentes asociados, llevados a cabo desde la década de los cincuenta hasta la década de los ochentas, lo cual ocasionó que se depositara en estratos atmosféricos. (Figura 2)

Debido a este depósito se fue reincorporando lentamente a toda la superficie terrestre por medio de los fenómenos atmosféricos como la lluvia (depósito húmedo) o por depósito seco debido a su interacción con las partículas existentes (Walling y He, 1998). El peso radiactivo es mayor en el hemisferio Norte que en el hemisferio Sur, debido a que se realizaron un mayor número de ensayos con armamento nuclear en dicho hemisferio (Larsen, 1985). La concentración de actividad de ^{137}Cs existente en el suelo depende de varios factores: composición del suelo, tipo de suelo, precipitación anual, vegetación, orografía (Alomoro, et Al, 2013).

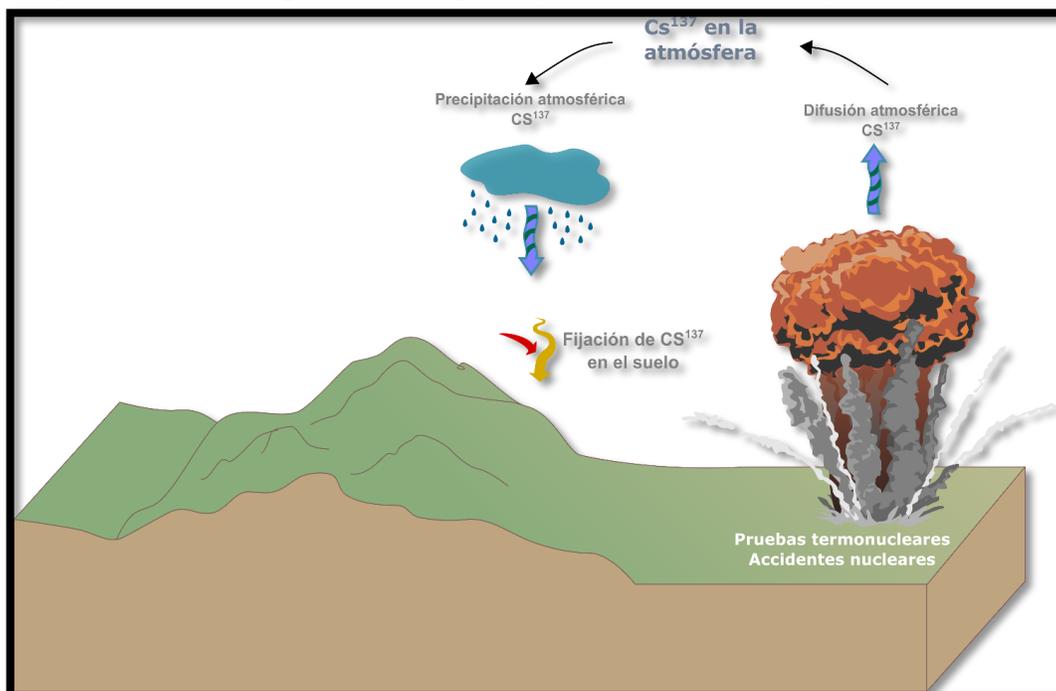


Figura 2. Dinámica de la difusión de ^{137}Cs

Una vez fijado, la redistribución y transporte del cesio se produce principalmente por procesos físicos como la erosión y la sedimentación. Estas características hacen de este isótopo un valioso trazador de los procesos de redistribución de suelo en los últimos 100 años (tanto de erosión como de sedimentación) (Alomoro, et Al, 2013)

Aunque la distribución de ^{137}Cs entre ambos hemisferios del planeta es heterogénea, los estudios de erosión se basan en la hipótesis de que su distribución a nivel local es uniforme y en establecer un inventario “característico” en un sondeo de suelo que se considere no alterado y conserve la totalidad del depósito de ^{137}Cs (Walling y He, 1998), posteriormente los valores de inventario de ^{137}Cs obtenidos en los puntos de muestreo, se comparan con un valor referencia que permitirá reconocer áreas erosionadas o con depósito de material. Los radionucleidos de origen artificial una vez depositados en el suelo se asocian a los diversos componentes, siendo imprescindible el conocimiento de la naturaleza de los componentes del suelo donde se depositan para abordar el estudio de la erosión.

1.8. Metodología

1.8.1 Algunas especificaciones metodológicas

Este trabajo se define como una investigación aplicada y corresponde a un estudio tanto cuantitativo, pues su orientación principal es establecer datos de tasa de erosión y acumulación del suelo y, además, realiza un análisis geográfico con los resultados obtenidos mediante la relación con datos biogeofísicos del lugar.

A su vez, se define como una investigación experimental y exploratoria, ya que la aplicación de la metodología, detallada más adelante es novedosa en el país y se intenta proporcionar nueva información necesaria para generar un conocimiento que permita un incremento en las investigaciones en el tema (Muñoz, D. 2006: 46)

1.8.2. Recolección y tratamiento de muestras de suelo para la obtención de los datos de concentración del ^{137}Cs

Para la medición eficiente de las concentraciones de isótopos radiactivos se involucra, como primer punto del proceso, el muestreo de dos perfiles de suelo que corresponden los perfiles de referencia, posteriormente se realizó en cada uno de estos una calicata de alrededor 1x1x1 metro de donde se extrajeron los perfiles de suelo, es importante mencionar que para cada perfil se toman 7 u 8 muestras a una profundidad de 15 cm ya que a partir de esta el ^{137}Cs no es tan significativo para el análisis debido a que este se empieza a desintegrar en el suelo. Este perfil se ubica en una zona donde no muestre visiblemente pérdida o acumulación del suelo, es decir, que sea en un área plana, además que no haya mucha presencia de raíces grandes ya que esto podría haber afectado el resultado de la concentración de ^{137}Cs en el perfil. El resultado de la concentración en ambos perfiles se utilizó para la comparación de las muestras individuales.

Posteriormente, se extrajeron 17 muestras en lugares distribuidos en la parte media-baja, en ambas laderas de la microcuenca y con condiciones de pendiente y altitud diferente, debido a que el resto del área es de difícil acceso no se pueden realizar muestras en la parte alta de la microcuenca. El muestreo pretendió que los sitios seleccionados traten de cubrir el mayor rango posible de elevación en ambas laderas, además, con presencia de diversidad de erosión percibida o posible

acumulación, que sirvió para una primera evaluación del inventario. Es importante mencionar que, de las 17 muestras planteadas, nueve fueron tomadas de trabajo previo realizado mencionado en los antecedentes, las cuales cuentan con los mismos criterios de muestro anteriormente detallados.

La extracción de todas las muestras mixtas se realizó desde la superficie (removiendo hojarasca) hasta una profundidad de 15cm (al igual que los perfiles de referencia debido a la desintegración del ^{137}Cs), con un cilindro de 10 x 3 cm y seguidamente se llevan al laboratorio de CICANUM para su posterior análisis.

Posteriormente las muestras recolectadas se pesaron húmedas y luego se pesaron debidamente secas. Esto con el fin de determinar la humedad que contiene el suelo. Se sometieron a procesos de granulometría por tamizado (0,063. 2 mm) para la determinación del tamaño de las partículas del suelo, ya que se necesitaron la distribución de las partículas con mayor y menor tamaño de 2mm para la aplicación del modelo matemático donde se determinan las tasas de erosión y acumulación.

1.8.3. Estimación de la concentración de ^{137}Cs en el suelo

El tratamiento de las muestras para la estimación de la concentración de isótopos radiactivos se lleva a cabo en el Centro de Investigación en Ciencias Atómicas, Nucleares y Moleculares (CICANUM) de la Universidad de Costa Rica, donde se sometieron las muestras a una moladora de ágata con el fin de homogeneizar la muestra y que la medición sea eficaz, seguidamente se tamizó (0,5 mm) y se introdujo en un recipiente apto para la medición, en este caso es un beaker marinelli con una geometría de 500 ml, el cual es un recipiente de polipropileno químicamente resistente para los análisis de espectrometría gamma. Una vez preparada la muestra

se colocó sobre el detector de Germanio Hiperpuro que está rodeado de un blindaje de plomo para evitar la radiación externa existente. Finalmente, se estimó la concentración del radionucleido en el suelo mediante un espectro que arroja los datos obtenidos.

1.8.4. Determinación de factores biogeofísicos

Es esta sección se realizó una serie de datos geográficos derivados de una caracterización de la microcuenca y posterior inventario de los resultados, la cual incluye principalmente **factores hidrológicos** tales como líneas de flujo acumulado e índices de acumulación de humedad, además, **factores topográficos** como pendiente, elevación y orientación, y por último, **factores biológicos** como densidad de vegetación, altura del dosel del bosque y presencia de hojarasca, los cuales tiene influencia directa en la dinámica de la erosión. A partir de estos datos se realizó una matriz de correlación con la cual se determinaron cuales factores influyen en mayor medida con los resultados de ^{137}Cs en el suelo, esto con el fin de interpretar e interpolar espacialmente explícitos los datos obtenidos en el contexto de la microcuenca con datos del monitoreo continuo e in-situ, como se mencionó anteriormente. Partiendo de estos datos obtenidos, se elaboró cartografía para mostrar los resultados de los procesos erosivos de una manera espacialmente distribuida y un análisis geográfico de la dinámica erosiva con los resultados obtenidos con la metodología aplicada.

1.8.5. Inventario de cambio y Modelo matemático para determinar tasas de erosión y acumulación.

Una vez analizadas las muestras de suelo con la técnica de espectrometría Gamma se realiza una introducción al modelo matemático donde, las actividades de masa resultantes para cada muestra (Bq/Kg) se convierten en actividades de área (Bq/m²) también llamados inventarios. La cuantificación de la magnitud de la redistribución del suelo comúnmente basado en la comparación de inventarios de las muestras individuales contra el inventario de cada uno de los perfiles de referencia. La fórmula para el cálculo de los inventarios es la siguiente:

$$Inv_{cambio} = \frac{Inv - Inv_{Ref}}{Inv_{Ref}} \times 100$$

donde, los valores negativos del Inv_{cambio} indican erosión y los valores positivos indican deposición. La erosión del suelo está indicada por inventarios resultantes más bajos, mientras que la sedimentación está indicada por inventarios mayores, en comparación al sitio de referencia.

Posteriormente, se lleva a cabo el ajuste y aplicación del modelo matemático para las estimaciones de las tasas de erosión y acumulación del suelo. Es importante mencionar que los resultados obtenidos son mediciones puntuales, para obtener un estudio a escala cuenca se realizó una relación regresiva de los datos obtenidos con relación a los datos geográficos (biogeofísicos) de la microcuenca. Para las estimaciones cuantitativas de las tasas de erosión y depositación del suelo se incluyen métodos de modelado matemáticos, estos varían en complejidad con el fin de describir los procesos en el control de la distribución de ¹³⁷Cs en el perfil del suelo.

Para este estudio se utilizó el modelo matemático *The Diffusion and Migration Model* el cual es utilizado para determinar la distribución de la erosión y acumulación en un espacio determinado y el cual cuenta con el software específico para su implementación. Este modelo es básicamente para zonas donde el suelo no está cultivado y no sufre de impactos que puedan influir en los resultados y se basa en un enfoque más realista donde se considera la distribución no sólo dependiente de la profundidad, sino también del tiempo después de la deposición atmosférica.

Según Walling and He (s.f) en su artículo *Models for Converting Measurements of Environmental Radionuclide Inventories (¹³⁷Cs, Excess Pb210, and Be7) to Estimates of Soil Erosion and Deposition Rates (Including Software for Model Implementation)* donde se realiza la estimación de la concentración de ¹³⁷Cs en el suelo (Ecuación 4):

$$C_u(t) \approx \frac{I(t)}{H} + \int_0^{t-1} \frac{I(t')e^{-R/H}}{\sqrt{D\pi(t-t')}} e^{-v^2(t-t')/(4D) - \lambda(t-t')} dt \quad \text{Ecuación 4}$$

, donde

D = coeficiente de difusión ($\text{kg}^2 \text{ m}^{-4} \text{ yr}^{-1}$);

v = velocidad de migración hacia abajo de ¹³⁷Cs en el perfil del suelo ($\text{kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$).

$I(t')$ = flujo de deposición anual de ¹³⁷Cs ($\text{Bq m}_2 \text{ yr}^{-1}$)

T = tiempo (yr)

R = tasa de erosión ($\text{kg m}^2 \text{ yr}^{-1}$)

H = Altura

π = relación entre la longitud de una circunferencia y su diámetro ($\approx 3,14$)

Para estimar las tasas de erosión y acumulación, donde la presencia de erosión laminar es el proceso dominante como en este caso, se puede estimar a partir de la reducción en el inventario de referencia ^{137}Cs $A_{ls}(t)$ (Bq m^{-2}), el factor de corrección del tamaño de partícula P y la concentración de ^{137}Cs en la superficie del suelo $C_u(t')$, con la ecuación siguiente (Ecuación 5):

$$\int_0^t PRC_u(t')e^{-\lambda(t-t')}dt' = A_{ls}(t) \quad \text{Ecuación 5}$$

Además, para determinar la ubicación de la deposición y su velocidad (Ecuación 6), se puede estimar a partir de la concentración de ^{137}Cs depositado $C_d(t')$ y el exceso del inventario de ^{137}Cs (definido como el total del inventario de ^{137}Cs menos el inventario de referencia local A) utilizando la siguiente relación:

$$R' = \frac{A_{ex}}{\int_{t_0}^t C_d(t')e^{-\lambda(t-t')}dt'} = \frac{A_u - A_{ref}}{\int_{t_0}^t C_d(t')e^{-\lambda(t-t')}dt'} \quad \text{Ecuación 6}$$

, donde $C_d(t')$ puede ser calculado de la siguiente manera (Ecuación 7):

$$C_d(t') = \frac{1}{\int_S R dS} \int P P C_u(t') R dS \quad \text{Ecuación 7}$$

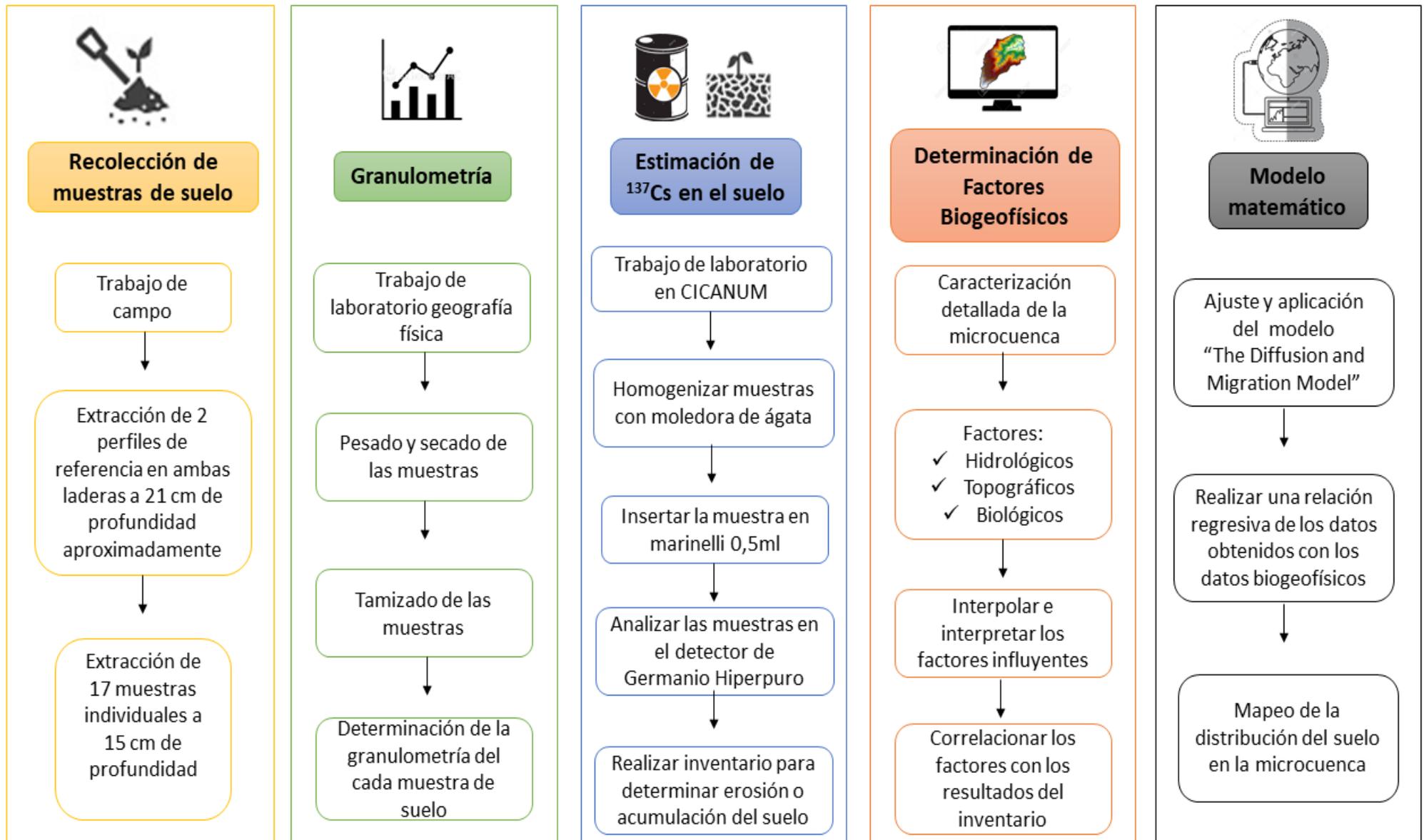


Figura 3. Flujo metodológico del proyecto de investigación

2. Capítulo segundo: Muestreo de suelo para el análisis radioisotópico.

2.1. Distribución del muestreo de suelo

Para este muestreo se pueden considerar dos tipos de muestras: del perfil del suelo e individuales. Primeramente, se realizaron dos perfiles de referencia, lo cuales se ubican en cada una de las laderas de la cuenca (**Figura 4, 5 y 6**), estos se tomaron en zona que no mostraran una posible dinámica erosiva o acumulativa del suelo, es decir, que fueran zonas estables.

Seguidamente se tomaron una serie de muestras puntuales para el análisis y posterior correlación con los perfiles de referencia, estas muestras se tomaron de igual manera en ambas laderas de la microcuenca, estas se extraen de zonas en condiciones topográficas diferentes para poder obtener tanto resultados de erosión como de acumulación del suelo (**Figura 4 y 5**).

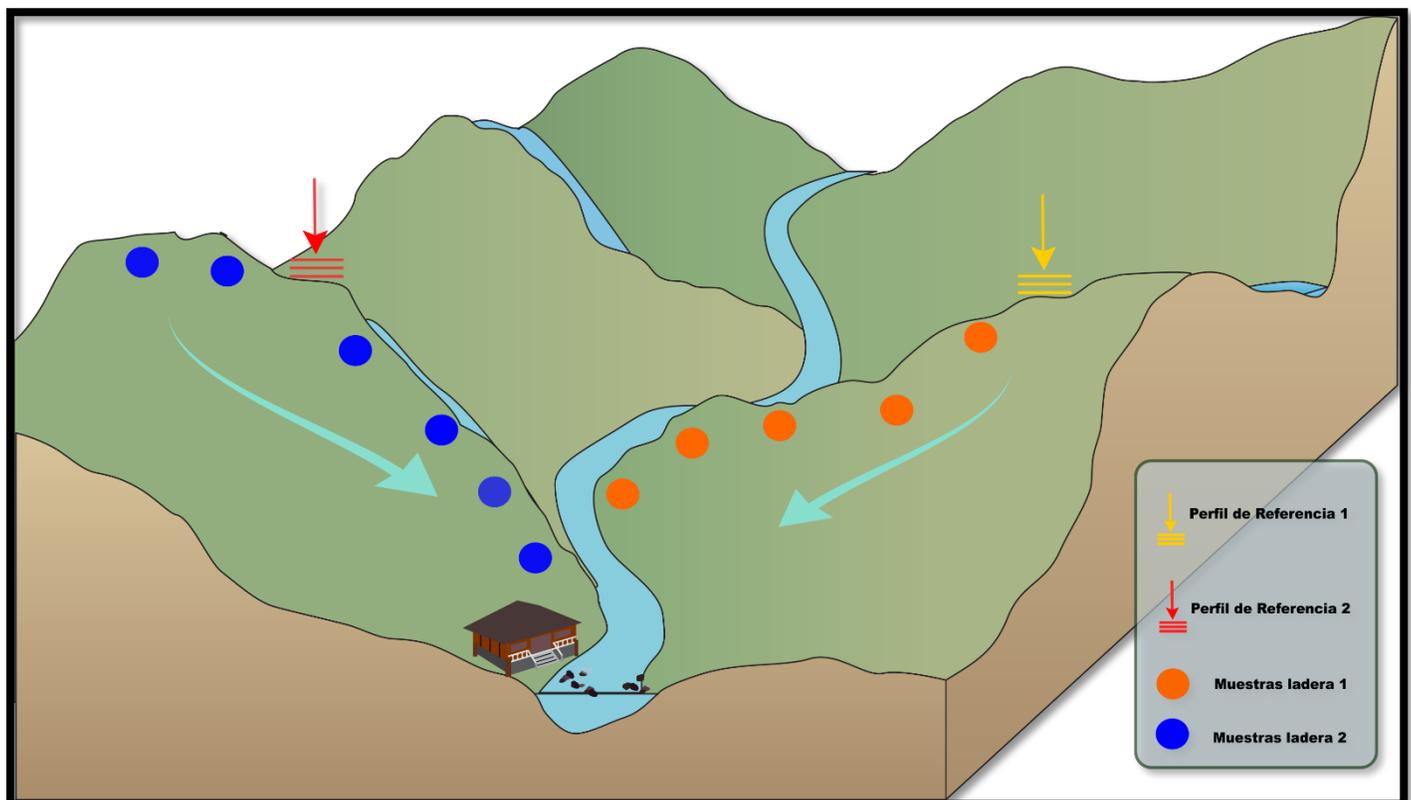


Figura 4. Distribución de las muestras individuales y perfiles de referencia

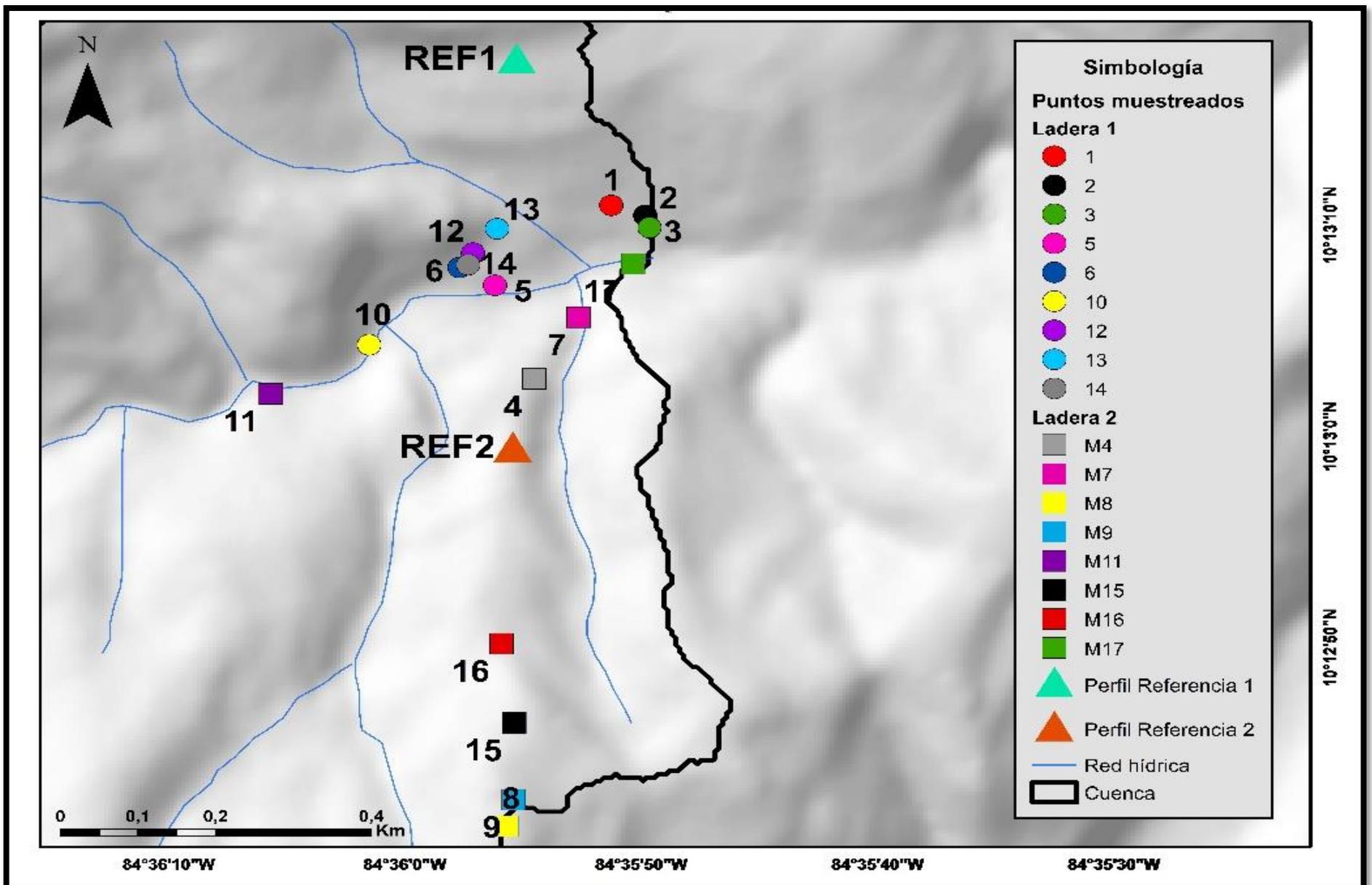
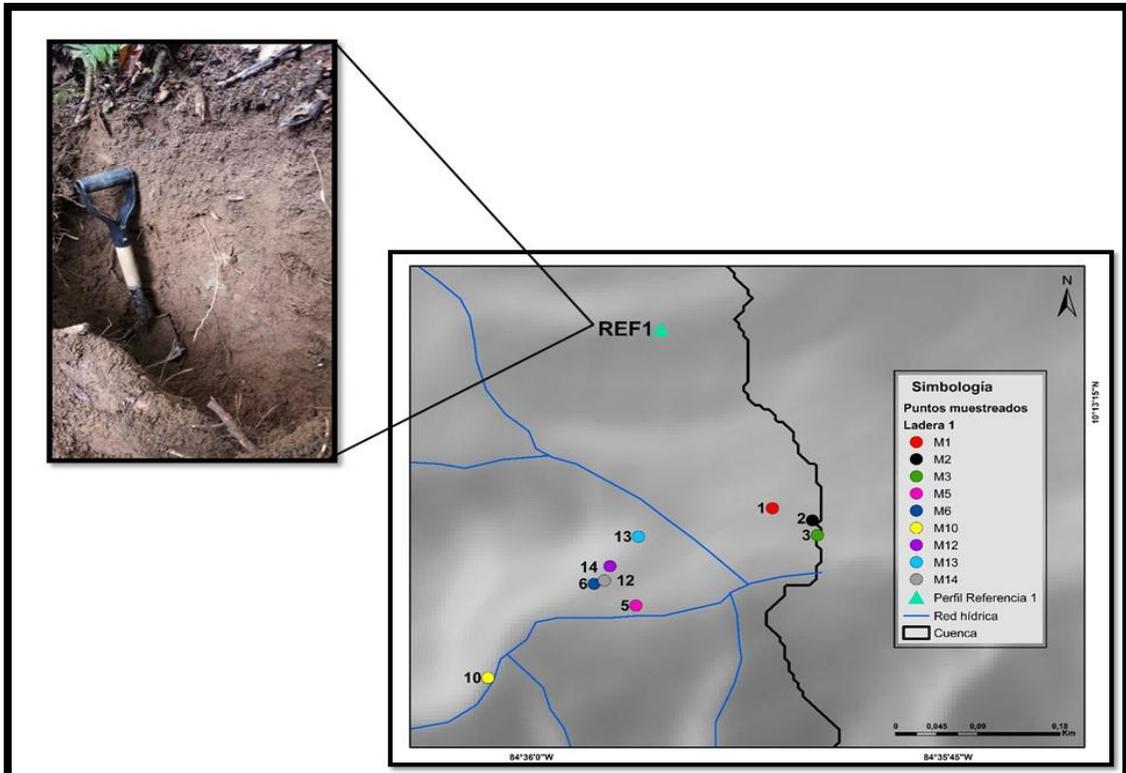


Figura 5. Distribución de los puntos de muestreo de suelo (Ladera 1 y 2)

Muestra	Ladera	Coordenada x	Coordenada Y	Elevación (m.s.n.m)	Pendiente (unidad)
Ref1	1	-84,5987	10,2216	1023	15,22
Ref2	2	-84,5987	10,2165	992	8,40
M1	1	-84,5976	10,2197	918,93	20,49
M2	1	-84,5972	10,2196	923,97	21,50
M3	1	-84,5971	10,2194	904,95	19,53
M4	2	-84,5985	10,2174	969,85	12,16
M5	1	-84,5989	10,2186	927,00	10,45
M6	1	-84,5994	10,2189	929,00	25,18
M7	2	-84,5980	10,2182	918,00	22,05
M8	2	-84,5988	10,2115	1170,60	10,45
M9	2	-84,5987	10,2119	1164,00	11,45
M10	1	-84,6004	10,2179	965,30	11,79
M11	2	-84,6016	10,2172	952,00	8,98
M12	1	-84,5992	10,2191	994,89	25,11
M13	1	-84,5989	10,2194	1002,33	20,53
M14	1	-84,5993	10,2189	975,70	25,01
M15	2	-84,5987	10,2129	1131	24,28
M16	2	-84,5989	10,2139	1087	23,54
M17	2	-84,5973	10,2189	907	5,65

Cuadro 1. Descripción general de los puntos de muestreo, tanto de referencia como individuales.

a)



b)

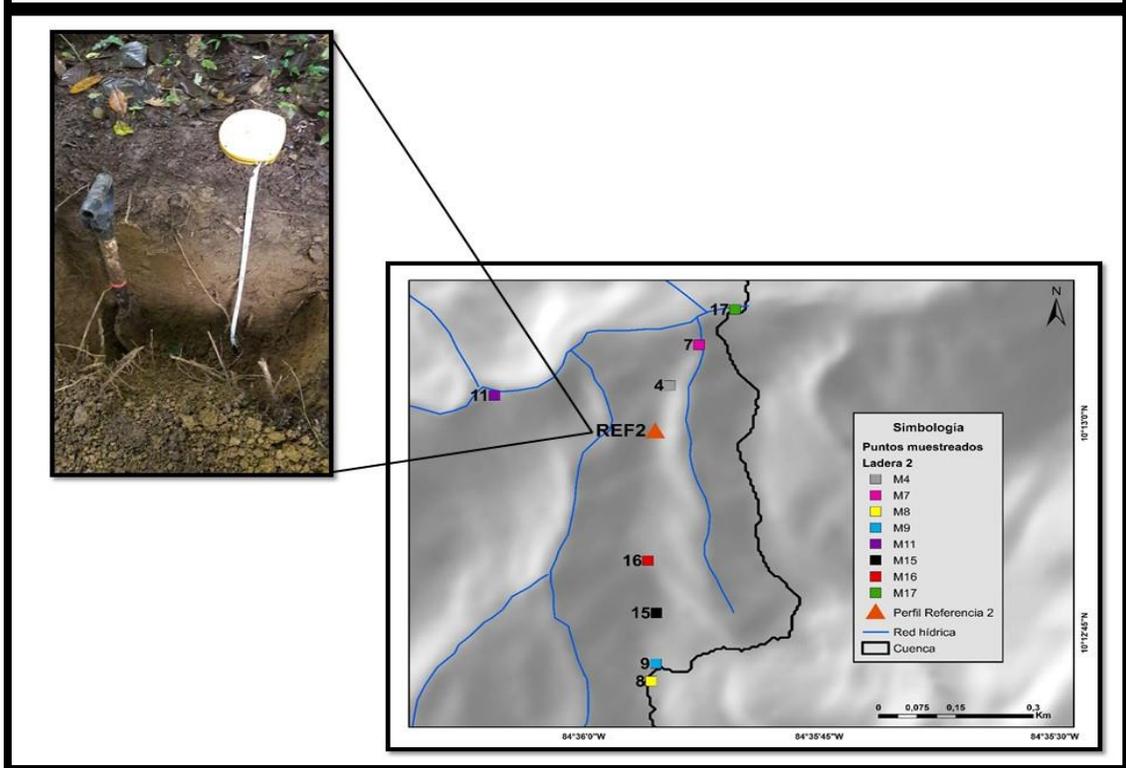


Figura 6. Distribución de los puntos de muestreo: a) Ladera 1 b) Ladera 2

2.2. Distribución granulométrica de puntos de muestreo

Para esta investigación ha sido necesario establecer una medición granulométrica de cada perfil de referencia y de cada punto muestreado individualmente. La granulometría del suelo establece una fuerte relación con la dinámica erosiva que presente cada punto de muestreo, debido que la distribución del tamaño de los granos del suelo va a influir en la degradación que el suelo presente, además, de garantizar una densidad constante en cada muestra y una distribución uniforme del ^{137}Cs en el momento de realizar los análisis en el laboratorio.

En el caso de la relación con el isótopo, este análisis se realiza debido a que el tamaño de las partículas del suelo es un factor determinante para la distribución del ^{137}Cs , debido a que influye en la velocidad de su movimiento a través del perfil del suelo. Es decir, disminuye esta velocidad en partículas más finas quedando fuertemente adsorbido a la superficie del suelo (He y Walling, 1996). En partículas más grandes o de mayor tamaño, el ^{137}Cs es más susceptible a la movilización vertical dentro del perfil del suelo y la dificultad de ser absorbido por este es mayor.

Tal y como se observan en los siguientes gráficos de distribución granulométrica (**Gráficos 1, 2, 3 y 4**) se presentan suelos en su gran mayoría gruesos, es decir, más arenosos (mayor a 0,2 mm), ya que estos suelos se encuentran en una etapa de pedogénesis avanzada donde posiblemente la roca madre este a un nivel muy superficial. A su vez, se evidencia una profunda meteorización tanto física como química en ambas laderas, esto debido a la fuerte

influencia de factores, principalmente climáticos como agua y viento, que intervienen en una selva tropical húmeda.

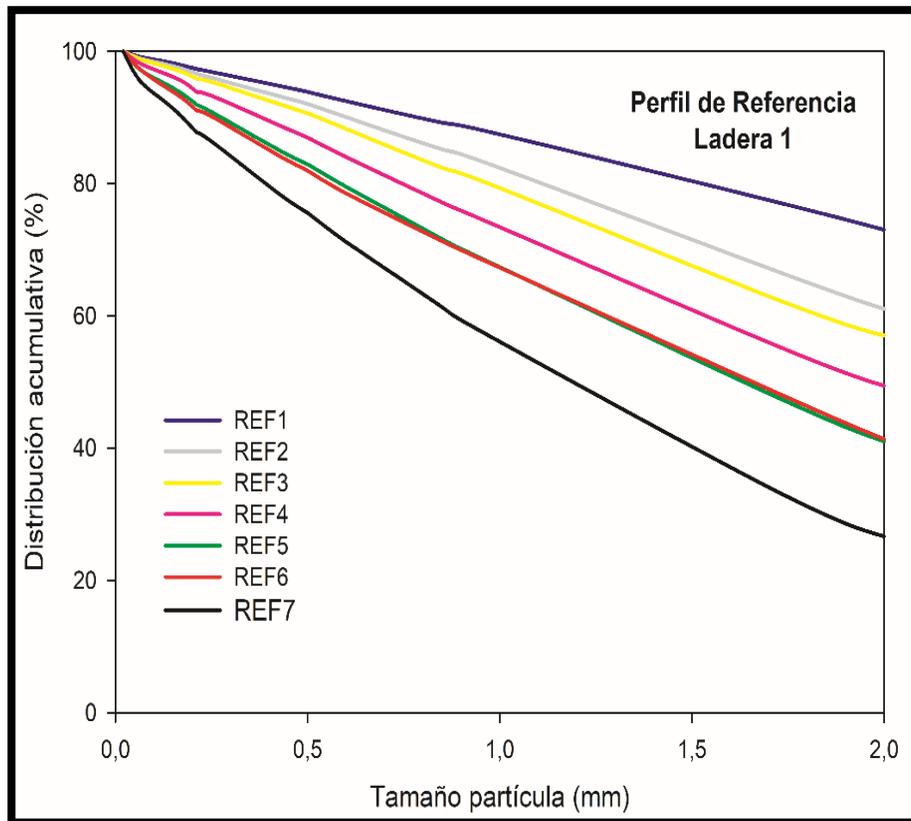


Gráfico 1. Distribución granulométrica de perfil de referencia Ladera 1

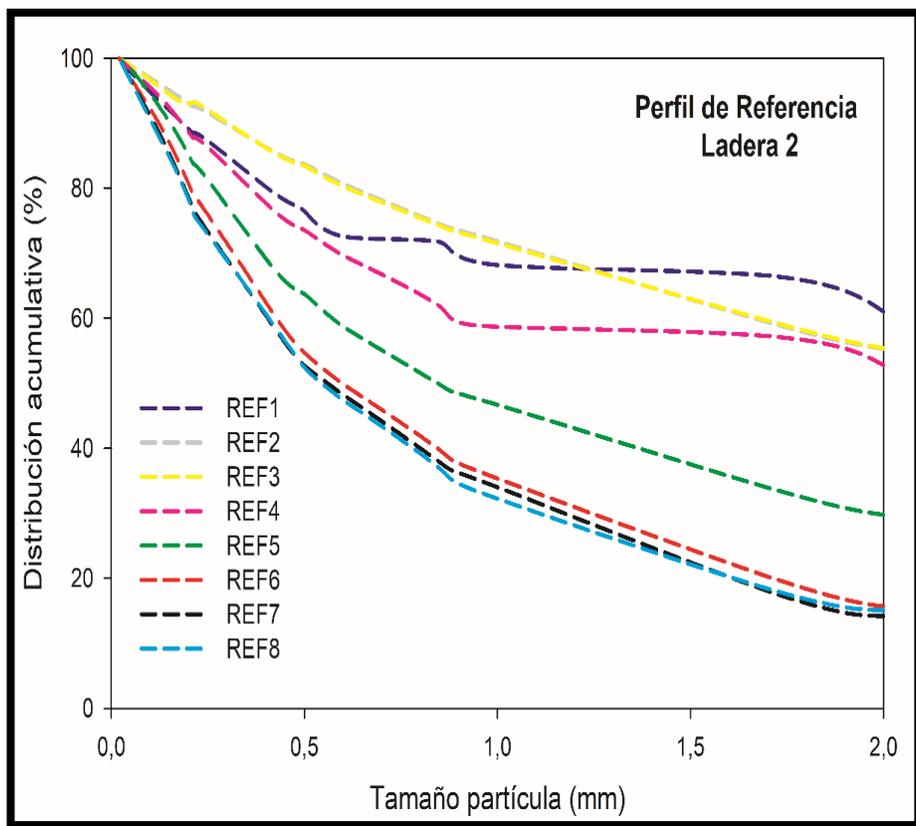


Gráfico 2. Distribución granulométrica de perfil de referencia Ladera 2

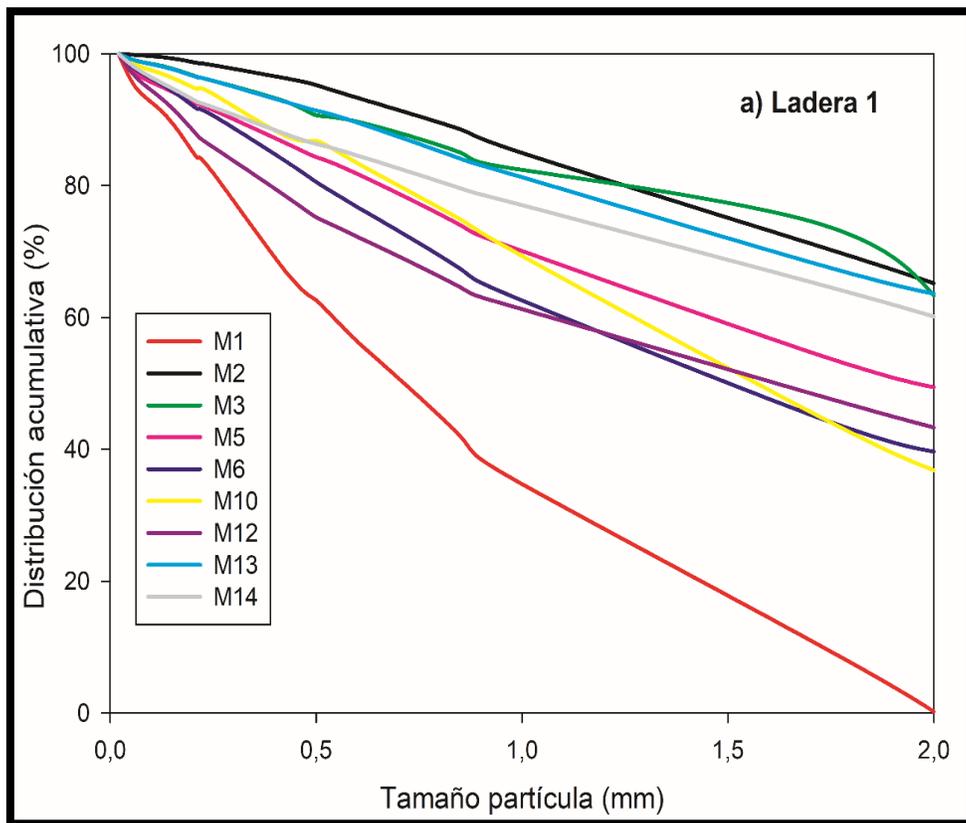


Gráfico 3. Distribución granulométrica de las muestras Ladera 1

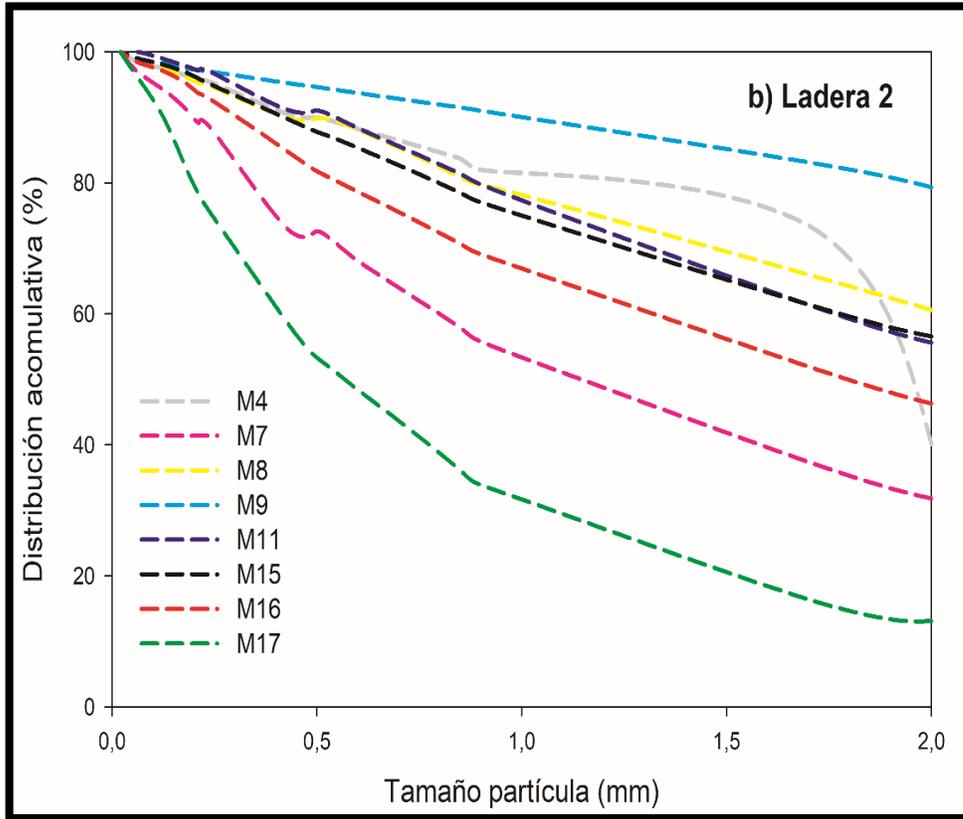


Gráfico 4. Distribución granulométrica de las muestras Ladera 2

2.3. Concentración de ^{137}Cs

La medida de la radiactividad de las muestras se ha hecho mediante espectrometría gamma usando un detector de Germanio HP, este método de medida está calibrado por determinación de fondo y recuento de muestras calibradas de actividades conocidas, usadas en distintos ejercicios de comparación de resultados de medida de radiactividad. A partir de los análisis en laboratorio se obtienen las medidas del contenido de ^{137}Cs para cada perfil de referencia y para cada muestra individual en Bq/Kg.

La actividad del isótopo primeramente se mide en los dos perfiles de referencia, para establecer la medida total de un suelo sin perturbación (**Cuadro 2 y Figuras 4 y 5**) y así, compararlos con las muestras individuales a lo largo de las laderas de la cuenca.

a) Perfil de Referencia Ladera 1				b) Perfil de Referencia Ladera 2			
Muestra	Profundidad (cm)	¹³⁷ Cs Bq/Kg	Incertidumbre	Muestra	Profundidad (cm)	¹³⁷ Cs Bq/Kg	Incertidumbre
Ref1_1	3	15,2	0,4	Ref2_1	3	11,5	0,4
Ref1_2	6	18,6	0,5	Ref2_2	6	12,1	0,3
Ref1_3	9	18,4	0,4	Ref2_3	9	12,5	0,3
Ref1_4	12	20,4	0,5	Ref2_4	12	10,4	0,3
Ref1_5	15	12,8	0,3	Ref2_5	15	5,8	0,3
Ref1_6	18	4,9	0,1	Ref2_6	18	3,1	0,1
Ref1_7	21	2,8	0,1	Ref2_7	21	2	0,2
				Ref2_8	24	1	0,1

Cuadro 2. Concentración de ¹³⁷Cs en perfiles de referencia.

a) Perfil de referencia Ladera 1. b) Perfil de referencia Ladera 2.

En los **Gráficos 5 y 6** se muestran los resultados de la distribución de ^{137}Cs en los perfiles de referencia de manera vertical, así mismo se muestra como los valores más altos de concentración se hallan en los primeros 15 cm de profundidad lo cual se relaciona con la presencia de las partículas de suelo más fino (arcillas y limos) y es en esta fracción donde el ^{137}Cs queda mayormente adsorbido al suelo posterior a su deposición. Esta dinámica viene a explicar cómo la distribución del isótopo en los perfiles está controlada por el movimiento de las partículas del suelo y condicionada por los procesos de erosión y sedimentación del mismo, es decir, los niveles de ^{137}Cs presentes en el suelo van a depender del tamaño de las partículas y de cómo se mueva el suelo, es por esto que se utiliza como un trazador, tanto para erosión como acumulación del suelo.

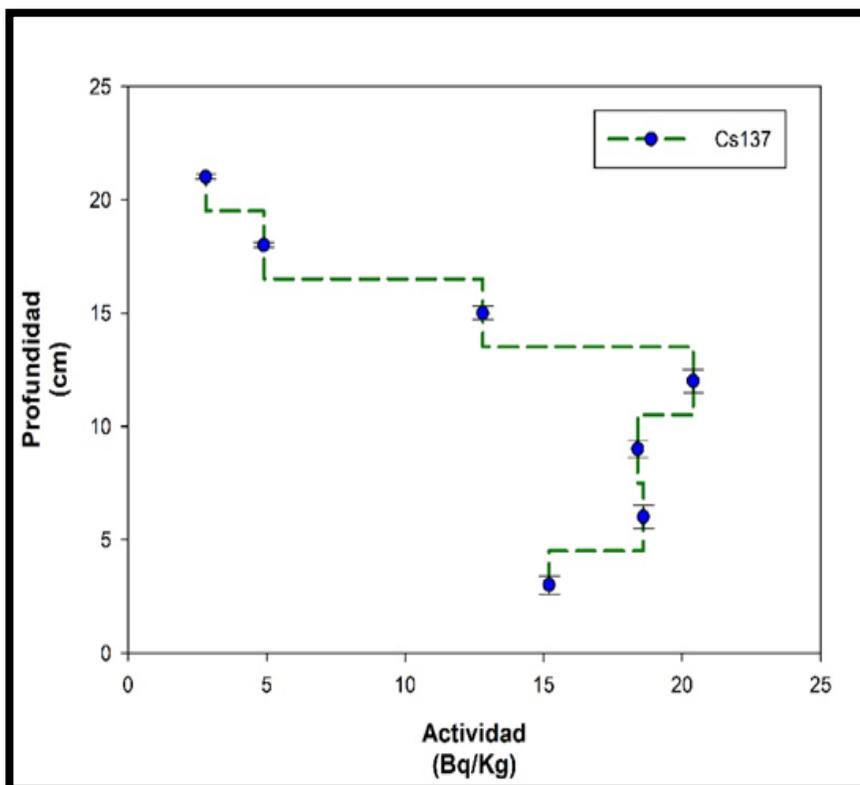


Gráfico 5. Concentración de ^{137}Cs en perfil de referencia 1

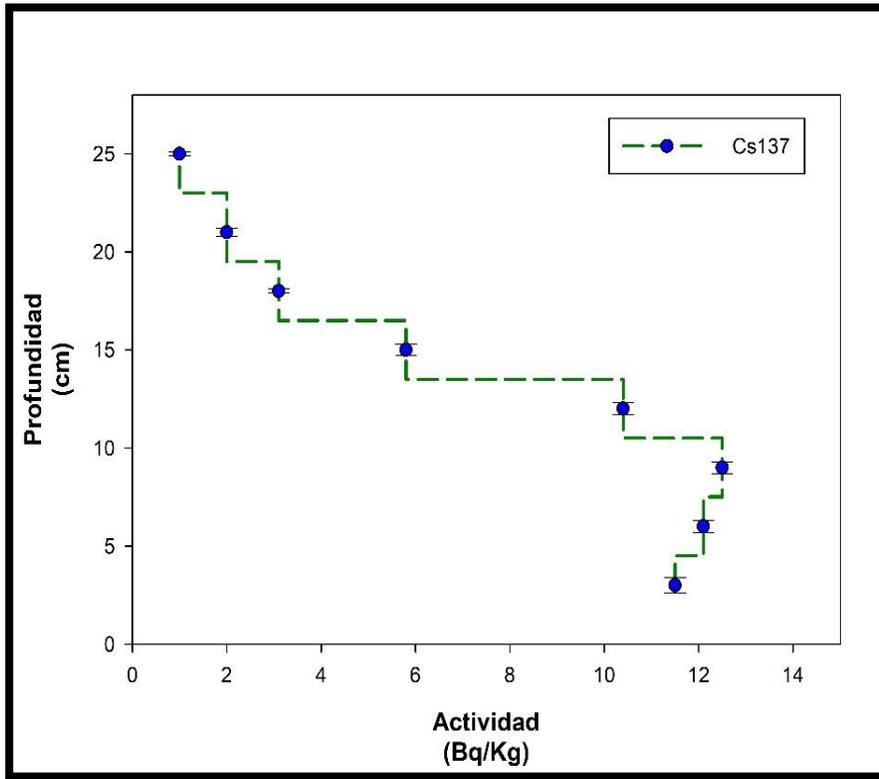


Gráfico 6. Concentración de ¹³⁷Cs en perfil de referencia 2

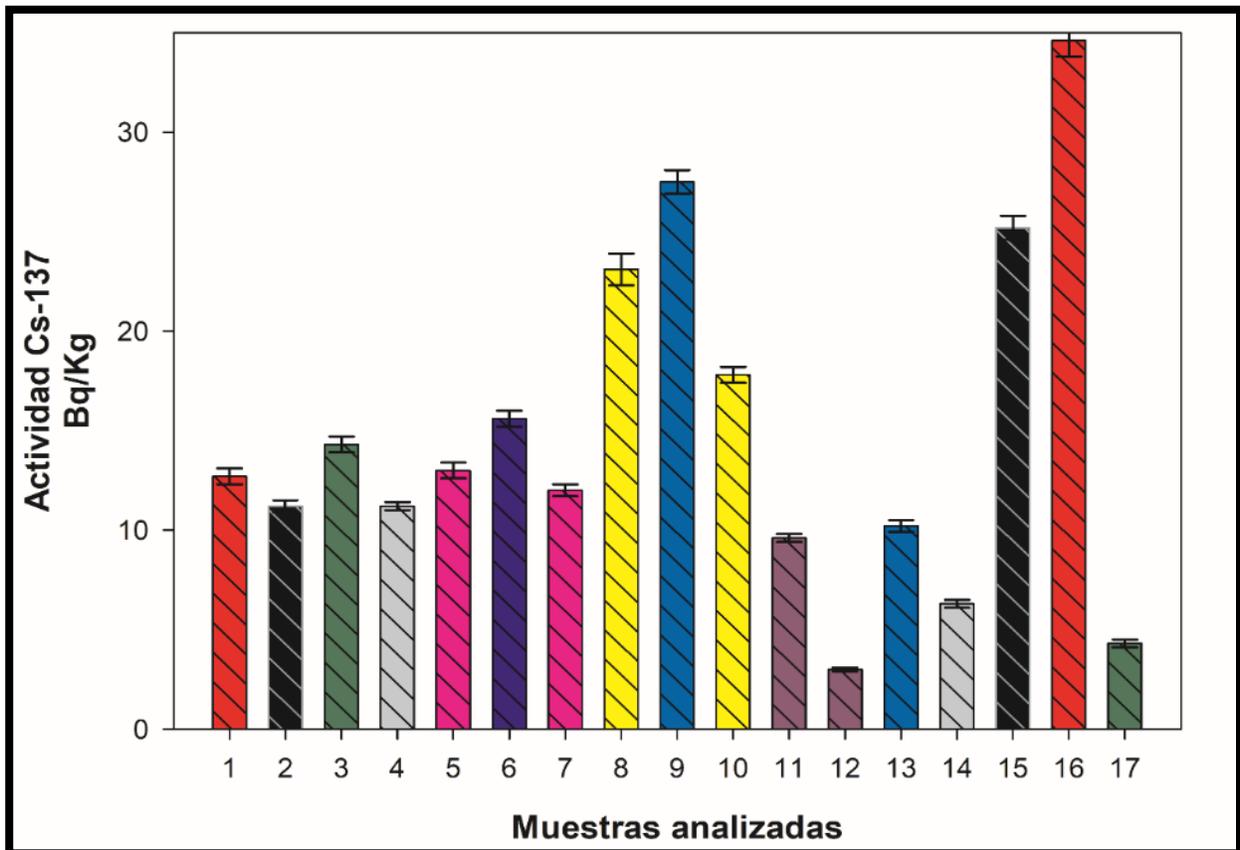


Gráfico 7. Concentración de ¹³⁷Cs en puntos de muestreo

Muestra	Ladera	¹³⁷ Cs Bq/Kg	Incertidumbre	Inventario
M1	1	12,7	0,4	-25,14
M2	1	11,2	0,3	-46,24
M3	1	14,3	0,4	-38,83
M4	2	11,2	0,2	66,89
M5	1	13	0,4	-16,85
M6	1	15,6	0,4	35,64
M7	2	12	0,3	26,84
M8	2	23,1	0,8	-11,51
M9	2	27,5	0,6	-36,26
M10	1	17,8	0,4	-7,00
M11	2	9,6	0,2	-40,65
M12	1	3	0,1	-75,07
M13	1	10,2	0,3	-46,92
M14	1	6,3	0,2	-61,10
M15	2	25,2	0,6	33,76
M16	2	34,6	0,8	90,57
M17	2	4,3	0,2	-3,18

Cuadro 3. Resultados de la concentración de ¹³⁷Cs por muestras (Bq/Kg) y resultados del inventario del Isótopo ¹³⁷Cs para los puntos de muestreo en porcentaje (%). (Los valores negativos rojos de indican erosión, mientras que los valores positivos verdes indican depositación)

El **Gráfico 7** y el **Cuadro 3** corresponden las concentraciones de ^{137}Cs en las 17 muestras individuales donde se puede ver como los valores resultantes se encuentran en un rango desde 3 a 35 Bq/Kg, los cuales están relacionados e influenciados con la exposición atmosférica que presente cada punto de muestreo, ya que, debido a la dinámica de liberación, dispersión y posterior deposición del Cesio, va a aumentar o disminuir directamente proporcional a la exposición que tenga el suelo en el momento de la deposición del cesio.

Además, la concentración de ^{137}Cs también se va a ver influenciada por la ubicación de cada muestra, si es en un radio cercano a los senderos (por ejemplo, muestra 11,12,13,14,17) la concentración de Cesio disminuye en comparación a las muestras recolectadas en áreas de menos perturbación, en áreas de acumulación de suelo o en algunas zonas cercanas al río (por ejemplo, muestra 8,9,10,15,16) donde los valores de concentración tienden a aumentar.

Luego de determinar las concentraciones del ^{137}Cs , se estableció una primera aproximación la distinción entre los lugares erosionados y los no erosionados aplicando la técnica de comparación entre el valor de los perfiles de referencia con respecto a los puntos de muestreo individuales en su respectiva ladera.

La desviación en la carga de una muestra respecto a la de referencia es lo que va a reflejar erosión o depósito. Las desviaciones negativas van a indicar que se ha producido una pérdida de ^{137}Cs y por ende la erosión del suelo, los resultados de estas muestras se asocian principalmente a zonas de alta pendiente. Las positivas reflejan la ganancia de ^{137}Cs y el depósito o acumulación del suelo, estas muestras en su mayoría están asociadas a las zonas bajas, donde la erosión ocasionada en la parte alta de la pendiente se ha acumulado ladera abajo (**Cuadro 3 y Figura 7**).

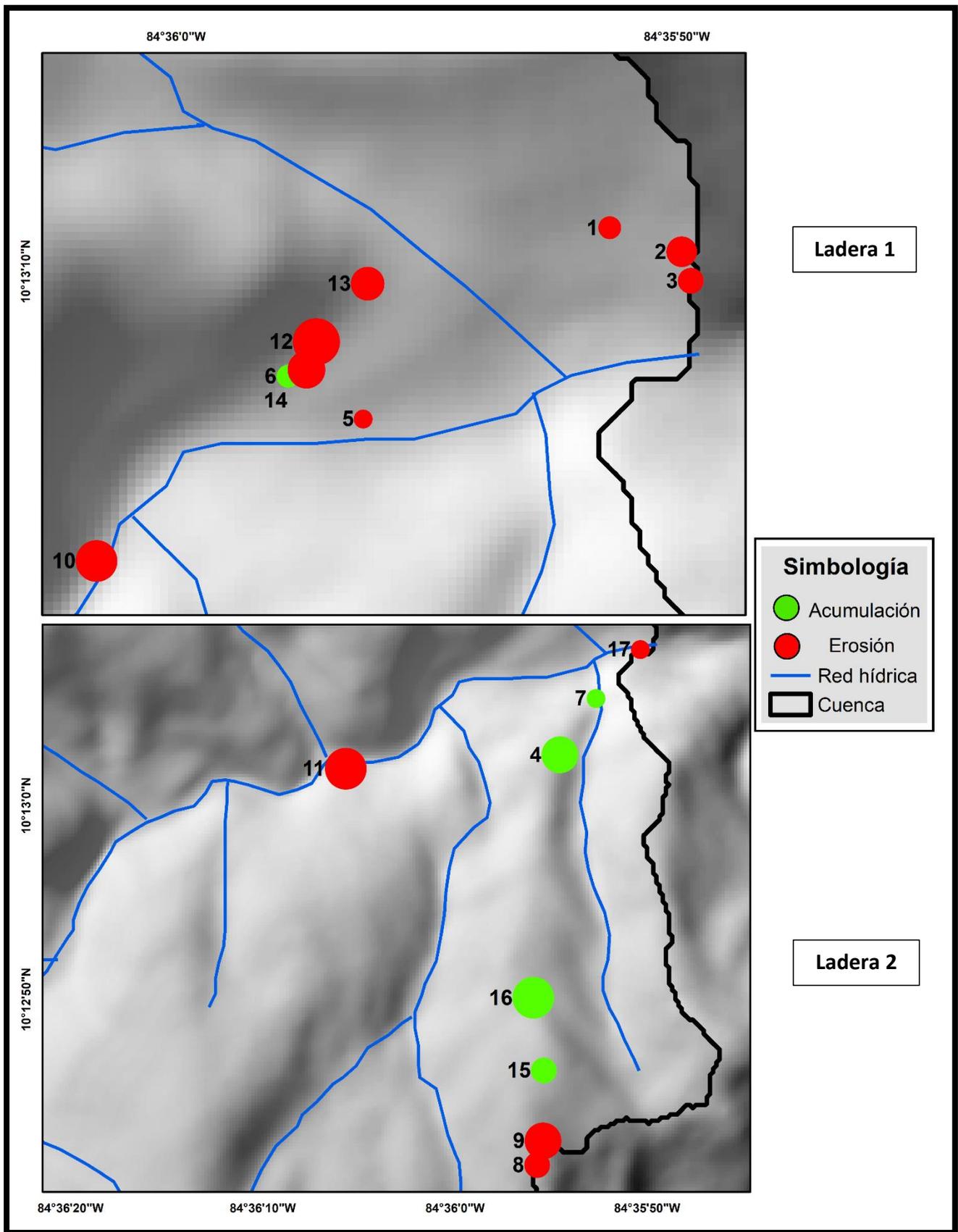


Figura 7. Distribución espacial de los resultados del inventario en Ladera 1 e inventario en Ladera 2

3. Capítulo tercero: Caracterización de la cuenca y relación de factores biofísicos con la concentración del ^{137}Cs y la dinámica erosiva.

3.1 Caracterización de la microcuenca

3.1.1 Generalidades

Esta área es representativa del bosque pluvial premontano, con un rango de elevación es de 900 a 1500 m.s.n.m (*Figura 8, a*), se caracteriza por ser poseer un relieve de origen volcánico, sumamente dinámico y con una alta rugosidad en su topografía. La dinámica es producto de altas precipitaciones y un volcanismo terciario muy meteorizado que favorece la remoción en masa y los procesos erosivos. Al tener un relieve muy complejo presenta de moderadas a altas pendientes, en su mayoría mayores a 18%, las cuales son explicadas por la neotectónica del lugar (*Figura 8, b*).

3.1.2 Climatología

Debido a la ubicación geográfica que tiene la RBAMB se clasifica como un área excesivamente húmeda con temperaturas moderadas. Según Solano & Granados, (2016) Las temperaturas promedio anual es de 20-26 C°. La evapotranspiración potencial es de 600-800 mm. La época lluviosa está definida de Mayo a Diciembre, mientras que la época seca va de Enero a Abril.

El área está dentro de una gran zona de recarga hídrica, por lo que su régimen de precipitación es bastante alto, ronda entre los 3500 mm de lluvia al año y llegando hasta los 5000 mm en algunas ocasiones. El agua precipitada es un factor que ayuda a la fijación y posterior lixiviación de radionucleido ^{137}Cs en el suelo. Así mismo, las altas precipitaciones es una de las principales causantes de la dinámica erosiva del suelo, por lo cual es algo muy común dentro de la cuenca. Debido a la influencia que

tiene de ambas vertientes, tanto la del Pacífico como la del Caribe, aportan humedad constantemente dando como resultado una humedad relativa anual de mayor al 90%.

3.1.3 Hidrografía

Por otra parte, según Veas (2009) la red fluvial de la RBAMB se sitúa dentro de la cuenca alta del río San Lorenzo, que se encuentra a su vez dentro del río San Carlos, el cual desemboca en el río San Juan.

Dentro de esta reserva es importante mencionar que nacen los ríos: el Palmital, el Jamaical y el San Lorencito, siendo este último el área de estudio y el tributario principal de la cuenca del río San Lorenzo. Además, dentro de esta zona se encuentran una gran cantidad de nacientes y quebradas que alimentan a los ríos principales. Lo anterior refleja cómo esta zona presenta un importante sitio de recarga, que, a su vez, es aprovechada para generar energía hidroeléctrica aguas abajo.

Es el caso específico del río San Lorencito, este se ubica en la parte sureste del área protegida, se encauza en dirección suroeste-noreste a través de una falla geológica hasta que se une con el río San Lorenzo (Veas, 2009).

Este cauce principal del río es alimentado por una serie de quebradas, que elevan considerablemente su caudal a causa de eventos lluviosos, lo cual pueden acarrear una gran cantidad de materiales, así como provocar deslizamientos y como resultado de esto la posterior erosión o acumulación de las laderas de la cuenca.

Además, se establece el índice de humedad topográfica, el cual parte del análisis de direcciones de flujo, pendientes y la topografía de la microcuenca, el cual provee una idea sobre la distribución y origen del escurrimiento superficial y de las

zonas potenciales de saturación en el área de estudio, evidentemente se puede observar como zonas con mayor humedad corresponden por consecuencia a las zonas cercanas a la red hídrica de la microcuenca (**Figura 8, c**).

3.1.4 Geología y Geomorfología

El área de estudio se circunscribe dentro de la cordillera de Tilarán, la cual es un viejo macizo volcánico, el cual según Madrigal (1972), es el producto de una actividad volcánica pliocénica, cuyos depósitos se han reagrupado bajo el nombre de la formación Aguacate. Este arco volcánico está constituido principalmente de lavas basálticas y andesíticas, brechas, tobas y sedimentos vulcanoclásticos, los cuales la mayoría están muy alteradas hidrotermalmente (Solano & Granados, 2016). El grupo Aguacate es una unidad litoestratigráfica que se utilizó para incluir todas las rocas volcánicas post.cretácicos y pre-cuaternarios de Costa Rica. Dentro de este grupo se encuentra la formación Monteverde a la cual pertenece la cuenca del río San Lorencito (Solano & Granados, 2016).

Por otra parte, la geomorfología del río San Lorencito se enmarca dentro de la dinámica geomorfológica del cuaternario, lo cual explica que la zona está en una etapa de formación. Esta zona es característica de un torrente de montaña, la orientación de dicho curso está controlado por una serie de fallas normales paralelas en donde su talweg se entalla en dicha fractura. En este sitio es posible encontrar gran cantidad de aluviones volcánicos (Solano & Granados, 2016).

Su parte alta se caracteriza por poseer pendientes muy pronunciadas, lo cual hace que sea una cuenca muy activa en su dinámica erosiva. Las mesetas inclinadas están recubiertas por lahares entrecortados por fallas paralelas entre sí, las cuales

tienen dirección suroeste- noreste, y se encuentran entalladas por lo ríos del área (Veas, 2009).

Esta microcuenca presenta coronas de deslizamientos, así como, drásticas modificaciones en sus laderas, lo cual puede estar asociado a fuertes procesos erosivos, siendo esto el resultado de una suma entre la acumulación de agua en el suelo, gran humedad en el suelo fuertes pendientes, las cuales aumentan conforme se acercan al río por el entallamiento que este ha hecho a lo largo del tiempo.

El relieve de esta zona es montañoso, altamente fracturado y muy accidentado, donde se manifiestan diferencias de hasta 300 metros entre las zonas más altas y el lecho del río. Debido a esto, prácticamente toda el área de la reserva se caracteriza por tener ríos rodeados de fuertes taludes de erosión (Bergoiegn, 2007)

3.1.5 Suelos

En el tema de pedología, en la microcuenca del río San Lorencito se encuentran inmersos dos tipos de suelo predominantes: los suelos andisoles (in situ) y los entisoles (transportados). Los cuales según Solano & Granados (2016) los suelos in situ se desarrollan debido a la descomposición de material volcánico expulsado del terciario. Estos presentan una textura superficial franca y a mayor profundidad aumenta la presencia de arcillas. Los andisoles son suelos que presentan una alta porosidad por consiguiente favorece una alta capacidad de infiltración y a su vez, facilita la depositación y distribución del ^{137}Cs en el suelo.

Por otra parte, los suelos transportados se desarrollan debido al movimiento de los sedimentos presentes en el río, por lo que se pueden encontrar principalmente

en las partes bajas y cercanía al cauce los cueles forman terrazas aluviales consolidadas.

3.1.6 Vegetación

En la microcuenca de río San Lorencito y en toda la extensión de la REBAMB se presenta un bosque denso, presenta un bosque tropical pluvial de Premontano (Artavia, 2005) según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1978). Presenta dos áreas de transición, una en cada lado de la reserva, bosque muy húmedo transición a premontano al oeste y bosque muy húmedo tropical transición a premontano al este.

La influencia de la vegetación en el suelo es importante, ya que este forma parte de un papel fundamental en la conservación y formación del mismo, donde las raíces de los árboles y las plantas no sólo evitan la erosión del suelo, sino que coadyuvan en la presencia de microorganismos los cuales influyen en la meteorización química y física del mismo y, por consiguiente, en la formación de arcillas (Veas, 2009). Además, debido a la densa vegetación que presenta esta cuenca es importante el papel que tiene en la disminución de la erosión por medio del amortiguamiento del agua precipitada, ya que ayuda a disminuir su impacto y, por ende, su potencial erosivo.

La presencia de vegetación es muy importante en la deposición del ^{137}Cs , ya que la mayor parte del cesio depositado es fuertemente absorbido por el intercambio iónico sobre las partículas del suelo, siendo especialmente rápido sobre materia orgánica y arcillas. Por lo que se refiere a que cuando el ^{137}Cs es depositado en la vegetación su mayoría es lavado por la lluvia y transferido al suelo debido a que las plantas no absorben el cesio de una manera rápida y a su vez, hacen que ingrese y se deposite al suelo de manera eficaz, mayormente en suelos arcillosos.

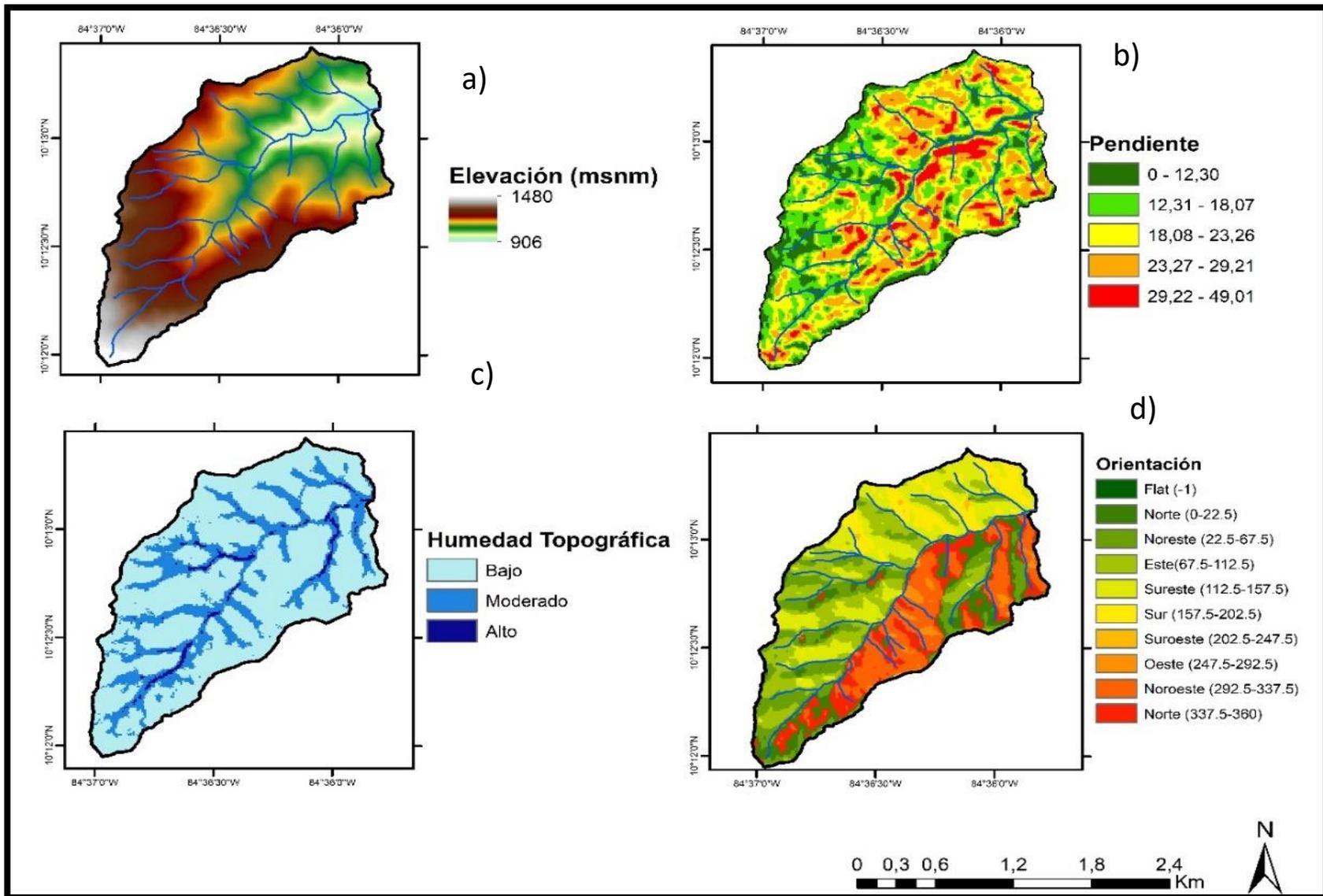


Figura 8. Factores biogeográficos determinantes de la dinámica erosiva en la cuenca

3.2 Relación de factores biogeofísicos con la dinámica erosiva

El comportamiento de los procesos de erosión o acumulación del suelo se ve condicionado por ciertos factores biogeofísicos presentes en el área de estudio. En este caso en específico la elevación, la pendiente, la orientación de la pendiente, el índice de humedad, el tamaño de la partícula y la densidad del suelo presentan correlaciones importantes con el ^{137}Cs y los movimientos de suelo.

Se realizaron dos correlaciones diferentes, una para las muestras que reflejan erosión y otra para las que presentan acumulación del suelo, esto debido a que dependiendo del proceso específico presente en el suelo así va a ser su relación con los factores biogeofísicos.

En el caso de la correlación en los puntos de acumulación de suelo (**Figura 9a**), el comportamiento del ^{137}Cs presenta una correlación inversa alta (-0.9) con el índice de humedad, esto implica que la concentración de ^{137}Cs va a disminuir en zonas húmedas, las cuales pueden estar asociadas mayormente a zonas donde el suelo ha sido lavado y la presencia del isótopo es menor.

A su vez, se presentan correlaciones relativamente altas con factores como la elevación y la pendiente (0,6), donde la influencia de zonas de alta pendiente en los puntos donde se acumula el suelo dan como resultado el aumento de la concentración de ^{137}Cs y del grado de inventario resultante. Otro factor que juega un papel importante es el tamaño de la partícula de suelo en este caso superior a 2mm, el cual presenta una correlación inversa (-0,6), ya que la presencia ^{137}Cs en el suelo va

a depender del tamaño de la partícula, donde en partículas gruesas (arenas) la lixiviación del isótopo a zonas más profundas del perfil de suelo, por lo que en partículas más finas (limos y arcillas) es donde se encuentra la mayor concentración de ^{137}Cs .

Por otra parte, en puntos de erosión de suelo (**Figura 9b**) se muestra una corrección fuerte del ^{137}Cs y del inventario con la densidad (-0,82) y la pendiente (-0,77). En relación con la pendiente, se puede establecer como en zonas de mayor pendiente, el suelo es más propenso a erosionarse y la concentración de ^{137}Cs disminuye, aumentando en las zonas de acumulación de ese suelo erosionado.

a)

b)

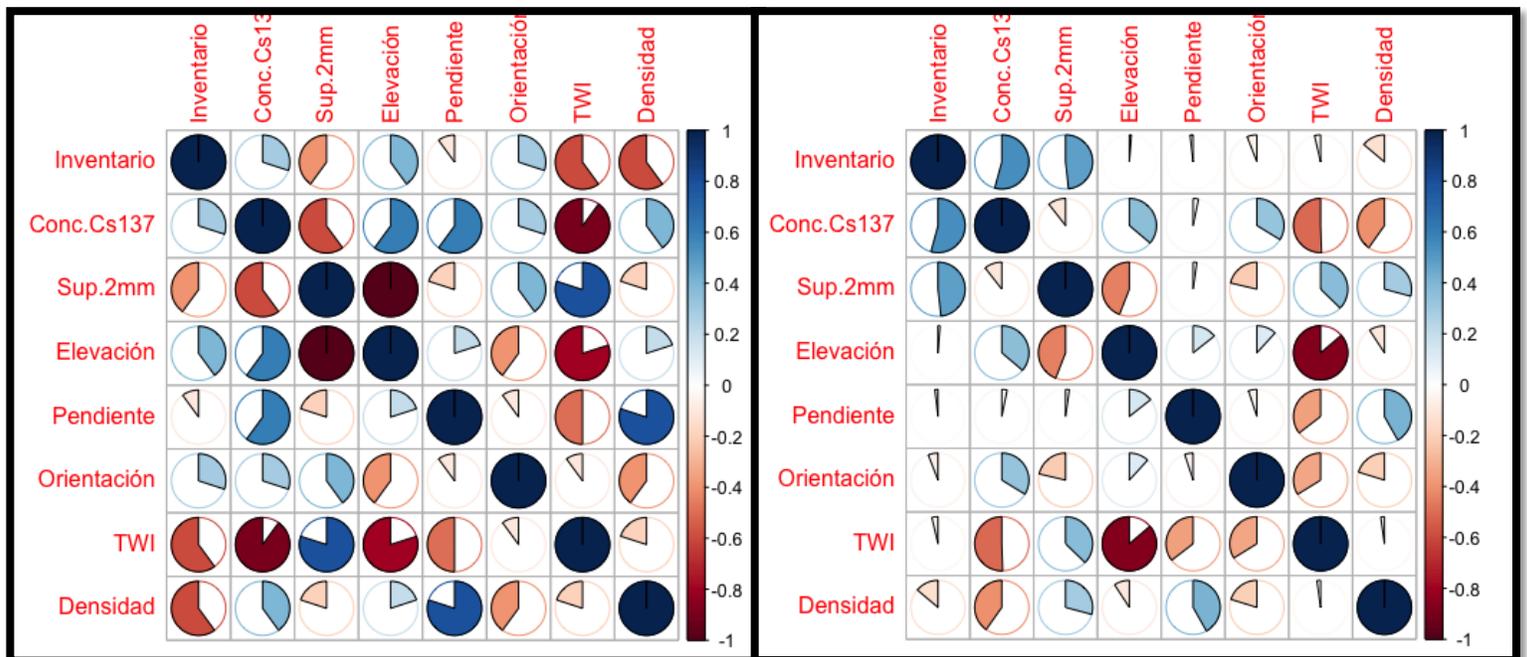


Figura 9. Matriz de correlación con los factores biogeofísicos para los puntos de (a) acumulación y (b) erosión

4. Capítulo Cuarto: Estimación de la tasa de erosión a través de un modelo matemático.

4.1 Datos necesarios para el modelo

Luego de estimar las concentraciones de ^{137}Cs y su respectivo inventario, es necesario evaluar el resultado de los inventarios de referencia total, los cuales deben de resultar consistentes a los estimados para el modelo global (aproximadamente 1000 Bq/m^2).

La información disponible sobre el patrón global de las consecuencias de ^{137}Cs indica que el inventario de referencia actual para un sitio de estudio en Costa Rica con altos niveles de precipitación media anual (mayor a 2500 mm) debería ser de aproximadamente 1000 Bq/m^2 . Un dato de referencia cercano es el inventario de referencia para un sitio de estudio en Haití el cual es reportado por Velasco et al, en un artículo reciente publicado en el Journal of Environmental Radioactivity en 2018 (vol. 183, pp. 7-16), donde el resultado del inventario de referencia total fue 670 Bq/m^2 .

Para calcular el inventario total de referencia se establecieron los datos de inventario (Bq/m^2) para cada aumento de profundidad en cada perfil de referencia (**Gráficos 8 y 9**) y de manera acumulativa se estableció los inventarios totales, los cuales resultaron aceptables en comparación a los datos del modelo global, donde el perfil de referencia resultó igual a $959,62 \text{ Bq/m}^2$ y el perfil de referencia 2 igual a $812,465 \text{ Bq/m}^2$ (**Gráficos 10 y 11**).

El producir distribuciones totales trazadas con un eje de profundidad expresado como profundidad de masa, es importante debido a que corresponde a una evaluación de los inventarios en modo de preparación o entrada de datos para el modelo matemático, principalmente para estimar el coeficiente de difusión y la tasa de migración.

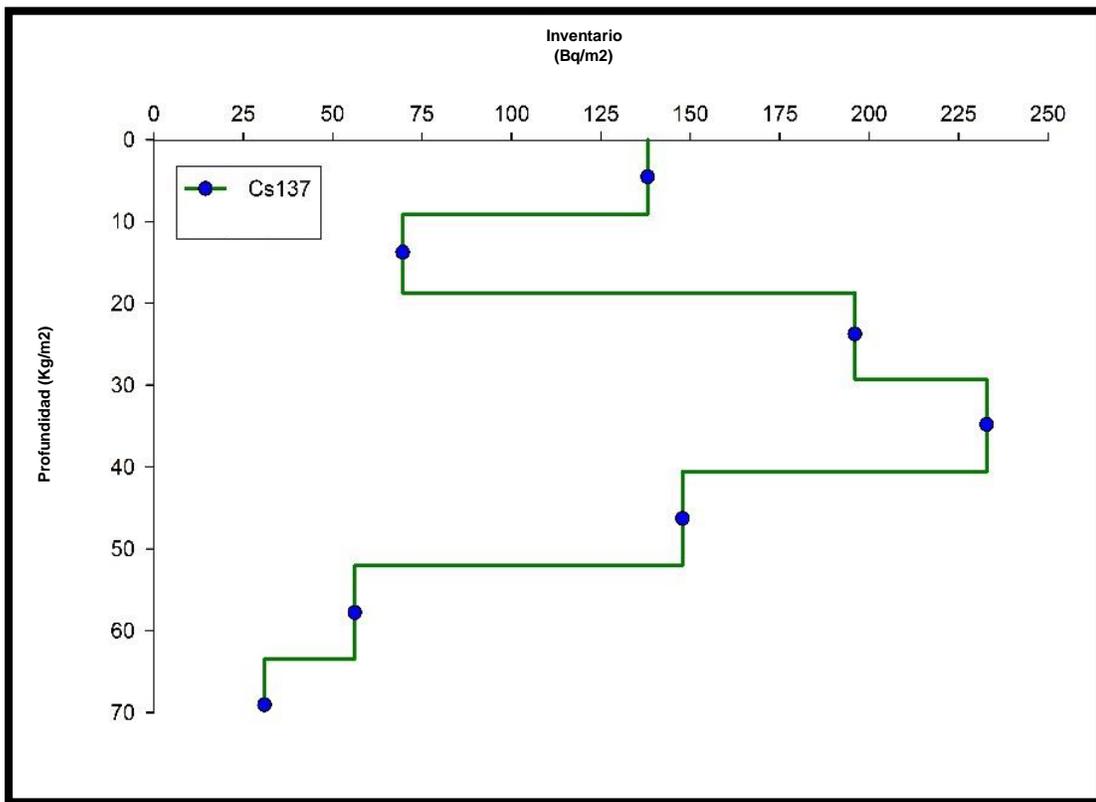


Gráfico 8. Datos de inventario (Bq/m^2) para cada aumento de profundidad para el perfil de referencia 1

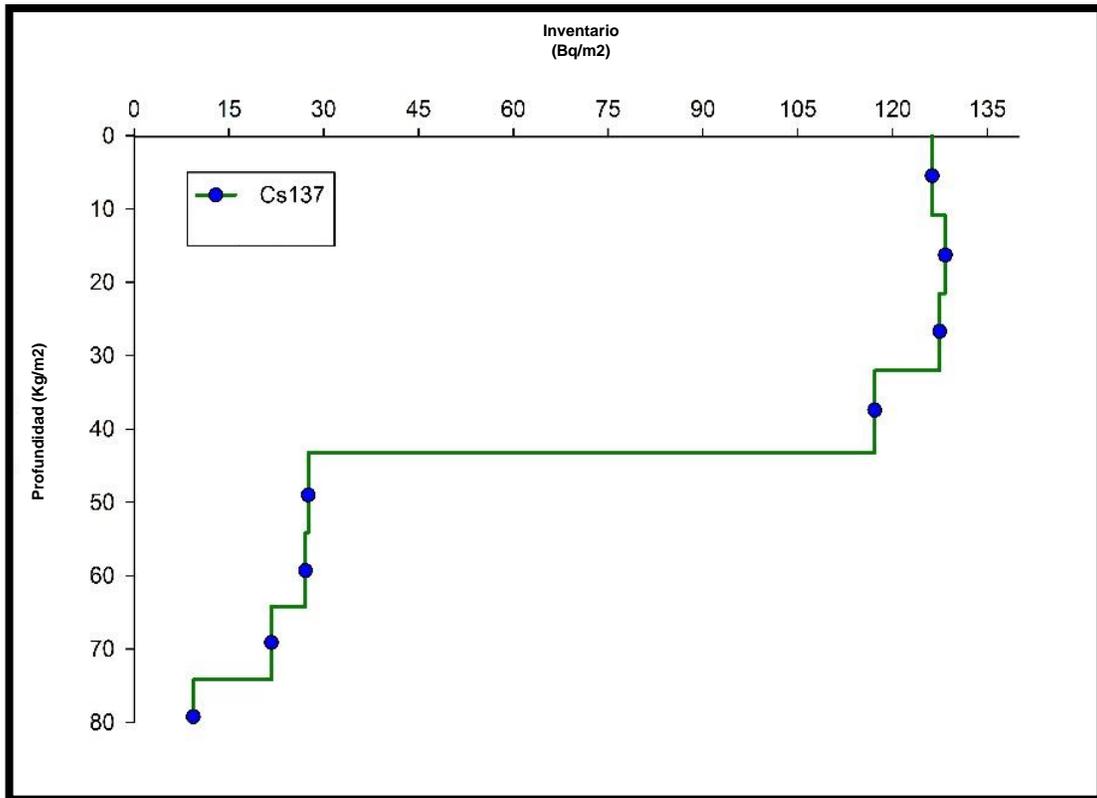


Gráfico 9. Datos de inventario (Bq/m²) para cada aumento de profundidad para el perfil de referencia 2

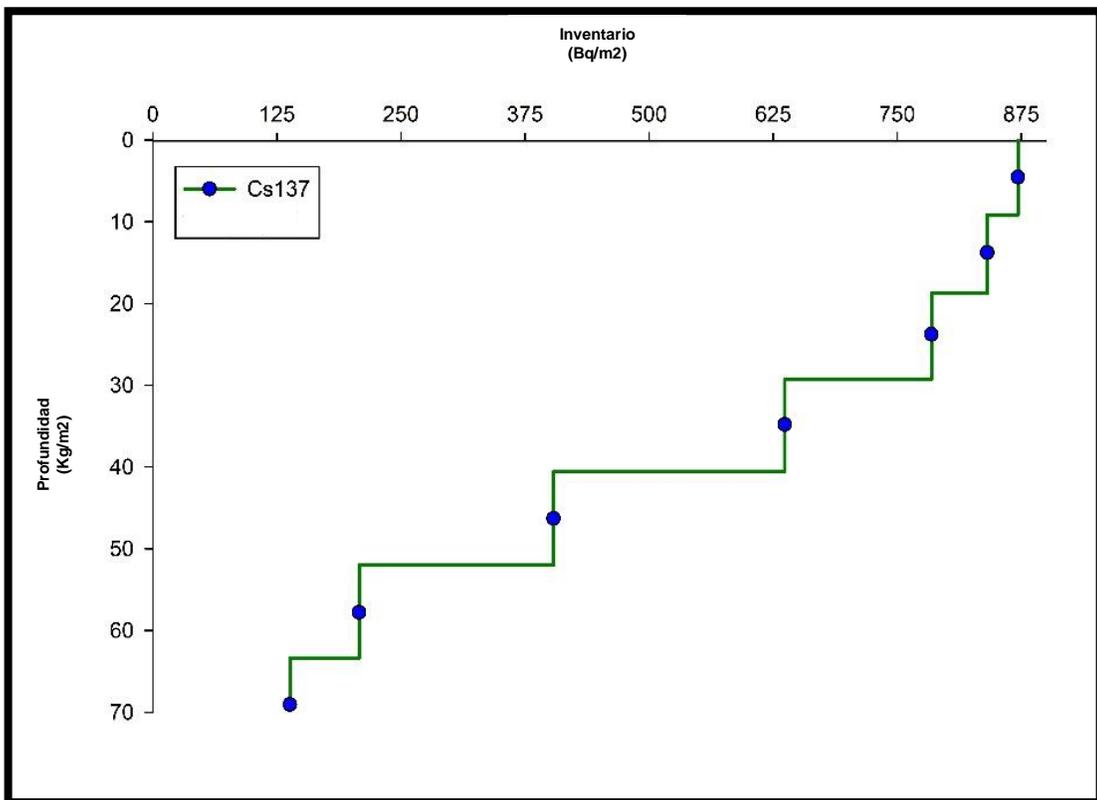


Gráfico 10. Datos acumulativos de inventario (Bq/m²) para el perfil de referencia 1

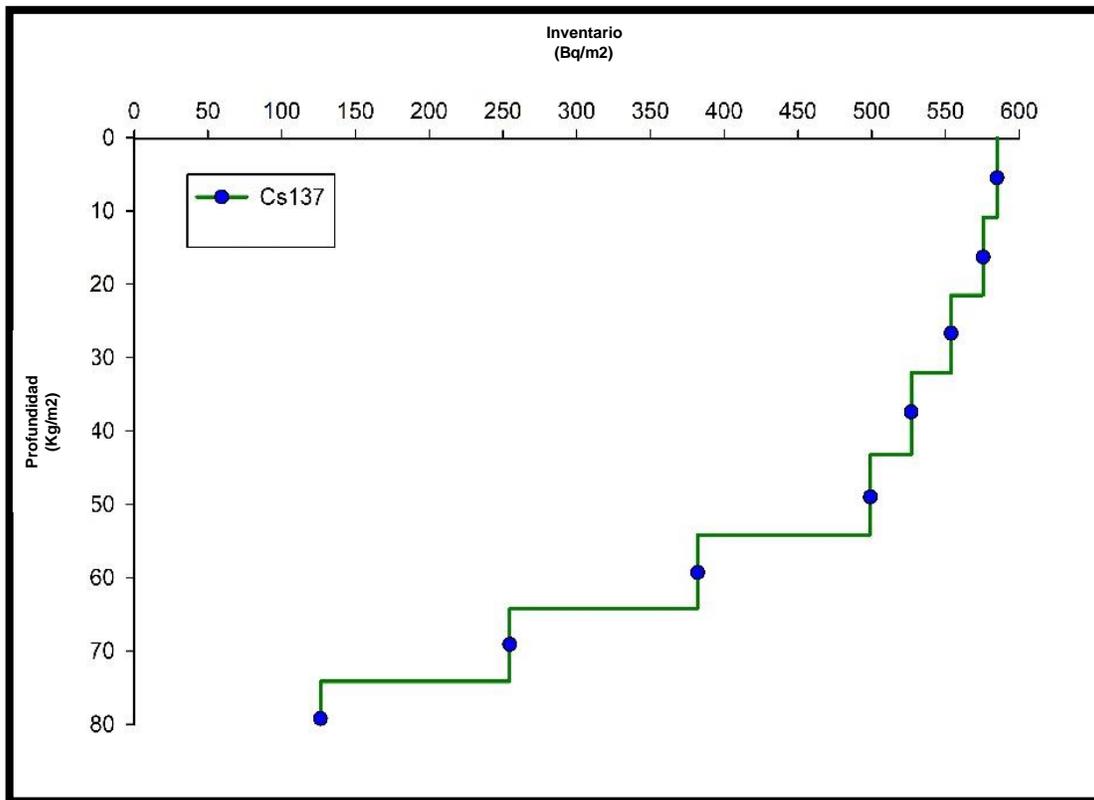


Gráfico 11. Datos acumulativos de inventario (Bq/m^2) para el perfil de referencia 2

5. Conclusiones

6. Bibliografía

1. Alomoro, A, Gascó, L, Rodríguez, M, Rodríguez, E & Schmid, T (2013). Estudio Preliminar sobre el Uso de los Radionucleidos ^{137}Cs y ^{210}Pb y las Técnicas de Espectrorradiometría como Herramientas para Determinar el Estado de Erosión de Suelos. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Ministerio de Economía y Competitividad. Madrid, España.
2. Artavia, G. (2005). La evolución de los frentes de colonización agrícola y la tenencia de la tierra en la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes. San Ramón, Alajuela, Costa Rica 1975-2005. Tesis de Maestría. Universidad de Costa Rica.
3. Bergesio, L, Cantero, A, Cholaky, C, Cisneros, J, Diez, A, González, J & Reynero, M (2012). Erosión Hídrica: Principios y técnicas de manejo. Universidad Nacional de Río Cuarto Facultad de Agronomía y Veterinaria Servicio de Conservación y Ordenamiento de Tierras, Córdoba, Argentina.
4. Beorgoieng, J.P (2007). Geomorfología de Costa Rica. Librería Francesa S.A. San José, Costa Rica.
5. BID (1996). Lineamientos para la preparación de proyectos de manejo de cuencas para eventual financiamiento del banco Interamericano de Desarrollo. Washington, D.C.
6. Bonotto, D & García, R (2014). Evaluación Comparativa de los modelos CS y CRS en estudios cronológicos de ^{210}Pb aplicados a cuencas hidrográficas en Brasil. Applied Radiation and Isotopes. Departamento de Petrología e Metalogenia, Universidade Estadual Paulista (UNESP) & Departamento de Física Aplicada II, Universidad de Sevilla.
7. Calvo, J et al (2015). Modelos de estimación de erosión de suelos y carga de sedimentos en suspensión para Costa Rica. Tecnológico de Costa Rica.
8. Castillo, A et al. (1999). Utilización de ^{137}Cs en cuantificación de erosión y sedimentación en un Palehumult de la XI Región. Instituto de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile Casilla 567 & Instituto de Ingeniería Agraria

y Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral de Chile. Revistas Electrónicas UACh, V.27, n.1. Valdivia. Chile.

9. Centro de Investigación en Ciencias Atómicas, Nucleares y Moleculares (s.f). Página Web. Apartado de Servicios: Análisis Radiométrico. Recuperado de <http://cicanum.ucr.ac.cr/node/7>. Fecha: 15/06/2017
10. Chevesich, D & García, P (2015). Control de la erosión y recuperación de suelos degradados. Estados Unidos.
11. Espinoza, E & Camacho, S (1995). Guía de regulaciones jurídicas para la fiscalización y tutela de actividades en las cuencas hidrográficas. ASOCUENCAS/ CEDARENA. San José, Costa Rica.
12. Faustino, J (1986). El proceso de la erosión del suelo. Turrialba, Cartago
13. Fernández, G (2012). Datación de Sedimentos y evaluación de sedimentación mediante el análisis de isótopos radiactivos de origen natural y artificial usados como trazadores. Máster en Física y Tecnología Físicas. Universidad de Cantabria. Cantabria, España
14. Gaitán, J (2013). Evaluación de erosión hídrica en suelos bajo cobertura forestal y agrícola, en la Cuenca del Río Reventazón, Costa Rica. Proyecto final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal. Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
15. García, P (2004). Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. En: Valladares, F. 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Páginas 309-334. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. Recuperado de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/48695/1/Interacciones%20entre%20la%20vegetaci%C3%B3n%20y%20la%20erosi%C3%B3n%20h%C3%ADdrica.pdf> Fecha: 18/11/2017
16. González, G & Rabin, C (2011). Para entender las radiaciones. Energía nuclear, medicina, industria. Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.

17. Gutiérrez, J (2004). Guía teórica de geomorfología. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.
18. Instituto Geológico y Minero de España. (s.f). Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. Guías y Manuales. España. Recuperado de <http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/LIBRO%20ISOTOPOS/PDF%20Isotopos-I/Seccion%206.pdf> Fecha: 18/11/2017
19. Larsen, R.I. (1985). Worldwide deposition of Sr-90 through 1983. USDOE Rep. EML-444. EML, New York.
20. López, R (2002). *Degradación del Suelo: causas, procesos, evaluación e investigación*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.
21. Madrigal, R (1972) Resumen de la estratigrafía de Costa Rica. Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
22. MAG-FAO (1996). Agricultura conservacionista: un enfoque para producir y conservar. San José, Costa Rica.
23. Meusburger, K et al (2016) A multi-radionuclide approach to evaluate the suitability of $^{239+240}\text{Pu}$ as soil erosion tracer, *Sci Total Environ*.
24. Muñoz, D (2006). Nuevas Formas de Representación Social: Una Investigación Exploratoria-Descriptiva del Fenómeno del Graffiti Hip Hop en Santiago. Escuela de Sociología, Universidad de Chile. Santiago de Chile.
25. Navas, A et al (2003). Trazadores Radioisotópicos de la Redistribución del suelo: Su aplicación en las Laderas Mediterráneas. *Edafología*, Vol 10, pp. 71-77. España.
26. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (2016). Resumen técnico: Estado Mundial del Recurso Suelo. Roma, Italia. Recuperado el 18 de noviembre del 2017 de: <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
27. Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA); Isotopes in water and environmental management. Division of public information. el 29 de mayo del 2017 de: <http://www->

naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/Isotopes%20In%20Water%20and%20environmental%20Management%201995%20.pdf

28. SAGARPA (s.f). Hidrología Aplicada a las Pequeñas Obras Hidráulicas. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca Y Alimentación. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.
29. Solana, V, Granados, S (2017). Dinámica de transporte de sedimentos en la cuenca del Río San Lorencito (Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes) utilizando sensores de alta resolución temporal, 2015-2016. Tesis de Licenciatura en Geografía. Universidad de Costa Rica.
30. Ureña, M (1999). Determinación de áreas susceptibles a erosión hídrica en la microcuenca hidrográfica tropical del Río Navarrito, Cartago, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. Escuela de Geografía. San José, Costa Rica.
31. Vanmaercke, M., Poesen, J, Maetens, W., de Vente, J. y Verstraeten, G. (2011). Sediment yield as a desertification risk indicator, *Sci Total Environ.* *Sci Total Environ.* 409(9):1715-25
32. Veas, N (2009). Caracterización y estimación de la erosión laminar en un Bosque Premontano a partir de un modelado hidrológico. Microcuenca del Río San Lorencito, Cordillera Volcánica de Tilarán, Costa Rica. Tesis de Licenciatura en Geografía. Universidad de Costa Rica.
33. Velazco, H., Torres, R., Joseph, D., Antoine, J., Mabit, L., Toloza, A., Dercon, G. y Walling, D. (2018) Adapting the Caesium-137 technique to document soil redistribution rates associated with traditional cultivation practices in Haiti. *Journal of Environmental Radioactivity* 183 (2018) 7-16. Haití.
34. Walling, D.E. y He, Q. (1998). Use of fallout ¹³⁷Cs measurements for validating and calibrating soil erosion and sediment delivery models. *IAHS Publ. No. 249*, 267-278.
35. Walling, D. E., and Q. He. (1999). Improved Models for Estimating Soil Erosion Rates from Cesium-137 Measurements. *J. Environ. Qual.* 28:611-622. doi:10.2134/jeq1999.00472425002800020027x
36. Walling, D. E., and Q. He. (s.f) Models for Converting Measurements of Environmental Radionuclide Inventories (¹³⁷Cs, Excess ²¹⁰Pb, and ⁷Be) to

Estimates of Soil Erosion and Deposition Rates (Including Software for Model Implementation). Department of Geography, University of Exeter, Exeter, EX4 4RJ U.K.

37. World Vision (s.f). Manual de Manejo de Cuencas. Conceptos Básicos de cuencas. Módulo I.
38. Zapata, F.; Garcia-Agudo, E.; Ritchie, J.C.; Appleby, P.G. (2002). Chapter 1: Introduction. En Zapata, F. (ed.). Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides: 1-13. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands
39. Zapata, F. (2003). The use of environmental radionuclides as tracers in soil erosion and sedimentation investigations: recent advances and future developments. *Soil Tillage Res.*

7. Anexos

(Matriz correlación)