

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

**DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIAS EN CONSERVACIÓN DE
SUELOS Y AGUA**



**ESTIMACION DE LA EROSIÓN A TRAVÉS DEL MODELO USLE
EN LA MICROCUENCA RUMIYACU, REGIÓN SAN MARTÍN**

TESIS

Para optar al título de:

INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

Rudy Joseph, RUIZ PÉREZ

Tingo María - Perú

- 2011 -



P36

R94

Ruiz Pérez, Rudy J.

Estimación de la Erosión a Través del Modelo USLE en la Microcuenca Rumiyaçu, Región San Martín. Tingo María, 2011

118 h.; 28 cuadros; 29 fgrs.; 26 ref.; 30 cm.

Tesis (Ing. Recursos Naturales Renovables Mención: Conservación de Suelos y Agua) Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María (Perú). Facultad de Recursos Naturales Renovables.

**1. DEGRADACION - SUELO 2. EROSION HIDRICA 3. PERDIDA POTENCIAL
4. ERODABILIDAD 5. TELEDETECCION 6. COVERTURA VEGETAL 7. PERU.**



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 26 de Setiembre de 2011, a horas 07:00 p.m. en el auditorio del Departamento Académico de Ciencias en Conservación de Suelos y Agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, para calificar la tesis titulada:

“ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN A TRAVÉS DEL MODELO USLE EN LA MICROCUENCA RUMIYACU, REGIÓN SAN MARTÍN”

Presentado por el Bachiller: **RUDY JOSEPH RUIZ PÉREZ**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara aprobado con el calificativo de “BUENO”.

En consecuencia el sustentante queda apto para optar el **Título de INGENIERO en RECURSOS NATURALES RENOVABLES**, mención **CONSERVACIÓN DE SUELOS Y AGUA**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para la otorgación del título correspondiente.

Tingo María, 28 de Setiembre de 2011

.....
Ing. MSc. LUCIO MANRIQUE DE LARA SUAREZ

Presidente

.....
Ing. Mg. WILFREDO ALVA VALDIVIEZO

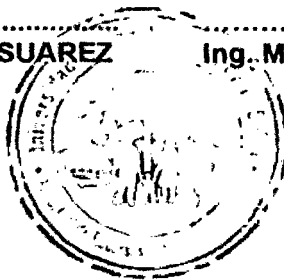
Vocal

.....
Ing. JUAN PABLO RENGIFO TRIGOZO

Vocal

.....
Ing. RICARDO M. CHÁVEZ ASENCIO

Asesor



DEDICATORIA

**A mi Padre Celestial, que desde
arriba me guía y acompaña.**

**A mis queridos padres Raúl Ruíz y
Olenki Pérez.**

**A mis hermanos Junior, Gary,
Fiorella y Lila.**

A Fabianita y Karin.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por la hospitalidad y los medios prestados.

Al Ing. Ricardo Chávez Asencio, por brindar sus conocimientos y dirigir esta investigación.

A los docentes de la Facultad de Recursos Naturales Renovables en especial a los docentes de la especialidad de Conservación de Suelos y Agua quienes entregaron todos sus conocimientos y experiencias en bien de formar buenos profesionales.

A los miembros de la Cooperativa Agraria Cafetalera "Fe y Esperanza" Valle del Alto Mayo, por la acogida y apoyo brindado.

A Wilder Trujillo Salas, así mismo, a la promoción de ingreso en Conservación de Suelos y Agua 2005.

A mis padres, Raúl y Olenki, a mis hermanos y a mi novia Karin, por el cariño y la atención brindada.

A todas las personas que me han ayudado a lo largo de mi formación profesional, quienes me han enseñado nuevos conocimientos y con quienes he disfrutado en esta etapa de mi vida.

INDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Erosión del suelo.....	4
2.1.1. Historia de la investigación en erosión.....	5
2.1.2. Tipos de erosión.....	8
2.1.2.1. Erosión hídrica.....	9
2.1.2.2. Erosión eólica.....	10
2.1.3. Agentes causantes de la erosión hídrica.....	10
2.1.3.1. Precipitación.....	10
2.1.3.2. Pendiente del terreno.....	11
2.1.3.3. Material parental.....	12
2.1.3.4. Características internas de los suelos.....	12
2.1.3.5. Vegetación.....	13
2.1.4. Proceso de erosión hídrica.....	15
2.2. Métodos de cuantificación y modelización de la erosión.....	16
2.2.1. Técnicas de medida directa.....	16
2.2.2. Modelización predictiva.....	17
2.3. Ecuación universal de pérdida de suelos (USLE).....	20
2.3.1. Factor de lluvia y escorrentía (R).....	24
2.3.2. Erodabilidad del suelo (K).....	27
2.3.3. Factores topográficos integrados (LS).....	30
2.3.4. Factor cobertura del suelo (C).....	31
2.3.5. Factor prácticas de conservación de suelos (P).....	33
2.4. Modelo digital de elevaciones (DEM).....	34
2.4.1. Estructuras de codificación de la elevación.....	34

2.4.2. Parámetros derivados del DEM.....	37
2.4.3. DEM SRTM.....	38
2.4.4. DEM ASTER.....	39
2.5. Sistemas de información geográfica (SIG).....	39
2.6. Teledetección.....	41
2.6.1. Satélite Landsat 5 - TM.....	42
2.6.2. Índices de vegetación.....	45
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
3.1. Lugar de ejecución.....	48
3.1.1. Ubicación geográfica.....	49
3.2. Características del área de estudio.....	49
3.2.1. Precipitación.....	49
3.2.2. Humedad.....	50
3.2.3. Temperatura.....	50
3.2.4. Geología.....	50
3.2.5. Fisiografía.....	52
3.2.6. Hidrografía.....	55
3.3. Características morfométricas de la cuenca.....	55
3.4. Materiales.....	58
3.4.1. Material cartográfico.....	58
3.4.2. Material satelital.....	58
3.4.3. Hardware y software.....	58
3.4.4. Equipo y material de campo.....	58
3.5. Metodología.....	59
3.5.1. Primera fase: Reconocimiento y recopilación de información básica del área de estudio	60
3.5.1.1. Adquisición y procesamiento de imagen Landsat.....	61
3.5.1.2. Adquisición y comparación de DEM ASTER y SRTM.....	67
3.5.2. Segunda fase: Determinación de factores del USLE.....	71
3.5.2.1. Determinación del factor R.....	71
3.5.2.2. Determinación del factor K.....	76
3.5.2.3. Determinación del factor LS.....	80
3.5.2.4. Determinación del factor C.....	82

3.5.2.5. Determinación del factor P.....	85
3.5.3. Tercera fase: Modelización de factores del USLE.....	85
3.5.3.1. Determinación de pérdida potencial de suelos.....	85
3.5.3.2. Determinación de pérdida actual de suelos.....	86
3.5.3.3. Tolerancia a la pérdida de suelos.....	86
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	88
4.1. Erosividad de las precipitaciones (factor R).....	88
4.2. Índice de erodabilidad del suelo (factor K).....	92
4.3. Factor de longitud y gradiente de pendiente (factor LS).....	94
4.4. Factor de cobertura vegetal (factor C).....	96
4.5. Erosión potencial de suelos.....	100
4.6. Erosión actual de suelos.....	103
4.7. Validación de resultados.....	105
V. CONCLUSIONES.....	107
VI. RECOMENDACIONES.....	109
VII. ABSTRACT.....	111
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
IX. ANEXOS.....	118
Anexo 1. Cálculo del factor erosividad de lluvias.....	119
Anexo 2. Fotografías.....	121

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Superficie mundial afectada por distintos tipos y causas de erosión....	5
2. Superficie continental afectada por la erosión del suelo por uso del terreno.....	6
3. Clase de permeabilidad según la textura.....	29
4. Clase de estructura.....	30
5. Factor topográfico (LS).....	31
6. Factor cobertura vegetal (C).....	32
7. Factor prácticas de conservación de suelos (P).....	34
8. Resumen de las estructuras más usuales utilizadas para el almacenamiento de los modelos digitales de elevaciones.....	36
9. Principales características de la imagen Landsat 5 – TM	44
10. Parámetros morfométricos de la microcuenca Rumiyacu	56
11. Estaciones meteorológicas consideradas en la investigación.....	61
12. Puntos de control tomados del área de estudio.....	63
13. Radiancias espectrales para calibración de imágenes Landsat 5.....	65
14. Unidades ESUN para corrección atmosférica de imágenes Landsat 5 – TM.....	66
15. Distancia Tierra – Sol en unidades astronómicas	66
16. Características básicas de cotas de la Hoja 13j	68
17. Resumen estadístico de residuales altimétricos calculados	69
18. Datos de precipitación en mm año ⁻¹ de estaciones meteorológicas estudiadas.....	72
19. Distribución espacial de la precipitación en la microcuenca Rumiyacu.	75
20. Características de unidades homogéneas.....	78
21. Resultados de análisis de suelos.....	79
22. Datos de suelo necesarios para estimar el factor K.....	80
23. Niveles de erosión.....	87
24. Erosividad de las precipitaciones en la microcuenca Rumiyacu.....	88
25. Erodabilidad del suelo de la microcuenca Rumiyacu.....	92

26. Valores del factor C para la microcuenca Rumiyacu.....	96
27. Área total de la microcuenca en función al uso del suelo.....	99
28. Validación de resultados.....	105

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Agentes causantes de la erosión hídrica.....	14
2. Taza de salpicadura.....	17
3. Mapa de ubicación de la microcuenca Rumiyacu.....	48
4. Precipitación promedio anual de la microcuenca Rumiyacu.....	50
5. Mapa de grupos geológicos de la microcuenca Rumiyacu.....	51
6. Mapa fisiográfico de la microcuenca Rumiyacu.....	54
7. Mapa de pendientes de la microcuenca Rumiyacu.....	57
8. Proceso de Corrección de imagen Landsat 5 – TM.....	62
9. Proceso de determinación del factor R.....	71
10. Correlación entre CO – Jepelacio y CO – Moyobamba.....	72
11. Correlación entre CO – Jepelacio y E. La Flor de Café.....	73
12. Correlación entre CO – Jepelacio y E. El Triunfo.....	73
13. Mapa de isoyetas de la microcuenca Rumiyacu.....	74
14. Proceso de determinación del factor K.....	76
15. Mapa de unidades homogéneas de la microcuenca Rumiyacu	77
16. Proceso de determinación del factor LS.....	80
17. Proceso de determinación del factor C.....	82
18. Mapa de índice de vegetación normalizada (NDVI).....	83
19. Mapa de clasificación de coberturas.....	84
20. Proceso de determinación de pérdida potencial de suelos... ..	85
21. Proceso de determinación de pérdida actual de suelos.....	86
22. Mapa de erosividad de las lluvias en la microcuenca Rumiyacu.....	89
23. Relación entre la precipitación y el factor R en la E. CO – Jepelacio... ..	91
24. Mapa de erodabilidad del suelo en la microcuenca Rumiyacu.....	93

25. Mapa de longitud y gradiente de pendiente de la microcuenca Rumiyacu.....	95
26. Mapa de factor cobertura vegetal de la microcuenca Rumiyacu.....	97
27. Área total de la microcuenca en función al uso del suelo.....	99
28. Mapa de erosión potencial de suelos de la microcuenca Rumiyacu.....	101
29. Mapa de erosión actual de suelos de la microcuenca Rumiyacu.....	103

RESUMEN

El presente trabajo de investigación estimó la cantidad de suelo que se pierde debido a la acción hídrica en la microcuenca Rumiyaçu, bajo el enfoque de la ecuación universal de pérdida de suelos – USLE, aplicando técnicas SIG y teledetección, evaluando la interacción entre los factores principales causantes de la erosión como son: la erosividad de lluvia (factor R), la erodabilidad del suelo (factor K), la topografía (factor LS), la cobertura vegetal (factor C) y las prácticas conservacionistas (factor P).

El factor R se evaluó bajo la metodología propuesta por ROOSE (1995), MORGAN (1974) y FOSTER (1981), obteniéndose valores que oscilan entre 761.5 - 898.8 MJ mm ha⁻¹h⁻¹año⁻¹; el factor K se obtuvo aplicando la fórmula propuesta por WISCHMEIER (1978), en el cual se considera los parámetros: textura, MO, estructura y permeabilidad, valores brindados de los resultados del análisis de suelos de 05 unidades homogéneas, la erodabilidad varía de 0.00745 – 0.01060 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹, el factor LS se obtuvo directamente del mapa de pendientes, aplicando la metodología propuesta por MINTEGUI (1993), los valores varían de 0.3 – 28.5, así mismo, se determinó el factor C, asignándole a cada uso de suelo su valor correspondiente, basados en las cifras propuestas por WISCHMEIER Y SMITH (1978), obteniéndose valores que oscilan entre 0 – 1; Se asumió un valor del factor P igual a 1, al

considerarse que en las zonas agrícolas de la microcuenca Rumiayacu no se aplica ninguna práctica de conservación de suelos.

Se estimó la pérdida potencial de suelos de la microcuenca Rumiayacu, simulando un área totalmente despejada (sin cubierta vegetal), alcanzándose valores anuales medios de 35.9 t ha^{-1} , lo que representa una pérdida total de $25\,334.63 \text{ t año}^{-1}$.

Finalmente se logró estimar y validar la pérdida actual de los suelos por acción hídrica de la microcuenca Rumiayacu, a través de la metodología predictiva USLE, obteniéndose valores que oscilan entre 0 y $77 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, y una pérdida media anual de 1.1 t ha^{-1} , cifra que define pérdidas totales de suelo en $776.27 \text{ t año}^{-1}$; el 98% del área de la microcuenca presenta niveles de erosión que se encuentran por debajo de los límites tolerables y sólo el 2% se encuentra con graves problemas de erosión.

I. INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo en la Amazonía peruana es una consecuencia directa de la deforestación, el mismo que alcanzó niveles alarmantes en el 2002, con una erosión severa de 306 320 ha, cifra que representa el 17.25% de tierras aptas para uso agropecuario, que han perdido parcial o totalmente su capacidad para producir (INRENA, 2002), trayendo consigo grandes pérdidas económicas y ambientales.

Las condiciones climáticas, relieve, composición del suelo, cobertura vegetal y escasas prácticas agrícolas conservacionistas, en la microcuenca Rumiyacu, facilitan la pérdida gradual de sus suelos, así mismo, genera un desequilibrio hídrico al alterar su cantidad y calidad, lo cual conlleva al deterioro del ecosistema y nivel de vida de sus pobladores.

Existen diversos métodos para estimar la erosión del suelo, dentro de ellos la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), es la más aceptada entre las personas encargadas de la gestión de cuencas con fines de producción o de conservación. Dada la validez de este método para estimar las pérdidas de suelo por acción hídrica, esta ecuación ha sido empleada universalmente para numerosos propósitos y diferentes condiciones.

Los sistemas de información geográfica (SIG), y teledetección, actualmente se han convertido en una potente herramienta de manejo de información con criterio geo-espacial, es un infaltable eslabón en la cadena de toma de decisiones en todos los niveles, haciendo un especial hincapié en usos sostenibles de recursos naturales y planificación ambiental.

El presente trabajo de investigación estimó la cantidad de suelo que se pierde debido a la acción hídrica en la microcuenca Rumiyacu, bajo el enfoque de la ecuación universal de pérdida de suelos, evaluando la interacción entre los factores principales causantes de la erosión como son: la erosividad de lluvia (factor R), la erodabilidad del suelo (factor K), la topografía (factor LS), la cobertura vegetal (factor C) y las prácticas conservacionistas (factor P) y se planteó el siguiente objetivo general estimar la erosión hídrica a través de la ecuación universal de la pérdida de suelos (USLE) aplicando SIG y teledetección en la microcuenca Potrerillo, además cuenta con los siguientes objetivos específicos determinar el factor de erosividad de precipitación (Factor R), Estimar el factor de erodabilidad de suelos (Factor K), Definir el factor de longitud y grado de la pendiente (Factor Ls) y determinar el factor de cobertura vegetal del suelo (Factor C).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Erosión del suelo

SUÁREZ (1979) define erosión como el proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de partículas de suelo causado por el agua y viento; MORGAN (1995) la define como una desagregación y transporte de partículas por diversos agentes erosivos, principalmente el agua y viento, y su acumulación ocurre cuando la energía de estos agentes es insuficiente para continuar con su transporte.

Una definición más actual de erosión es brindada por PORTA (2003) quien afirma que el término "erosión" proviene del latín "*erosio*" que significa roedura; y consiste en la pérdida gradual del material que constituye el suelo, al ir siendo arrastradas las partículas (disgregadas, arrancadas y transportadas), a medida que van quedando en la superficie.

En términos simples, se define erosión como el desprendimiento y remoción de partículas de suelo por acción hídrica y/o eólica, sin embargo, para la zona tropical, la principal causa de erosión son las fuertes precipitaciones que se presentan. Las condiciones meteorológicas y el clima,

preparan el material parental para la erosión, y la precipitación actúa como principal agente en dicho proceso. La cobertura vegetal, el tipo y características del suelo, la geomorfología, la geología y los usos del suelo, establecen el grado de propensión del suelo a ser afectado por agentes erosivos.

2.1.1 Historia de la investigación en erosión

El control de la pérdida de suelo es vital en el escenario actual de rápida degradación y sobreexplotación del medio ambiente y de incremento de la población, para la sostenibilidad de los recursos naturales y de las áreas de cultivo.

Cuadro 1. Superficie mundial afectada por distintos tipos y causas de erosión.

Tipo y causa de erosión	Superficie afectada (10 ⁶ ha)
Hídrica	1094
Eólica	549
Degradación química	240
Degradación física	83
Sobrepastoreo	679
Deforestación	579
Agricultura	552
Sobreexplotación	133
Industria	23
Total	1966

Fuente: Oldeman (1994).

Cuadro 2. Superficie continental afectada por la erosión del suelo por uso del terreno.

Continentes	Cultivo	Pasto	Bosque	Total
	(10 ⁶ ha)			
África	120	243	130	493
Asia	206	197	344	747
América del Sur	64	68	112	244
América Central	28	10	25	63
América del Norte	63	29	4	96
Europa	72	54	92	218
Oceanía	8	84	12	104
Total	561	685	719	1965

Fuente: Oldeman (1994).

Las investigaciones sobre erosión se inicia a principios del siglo XX, a escasas décadas del nacimiento de la edafología o ciencia del suelo de la mano de SPRENGEL (1837) quien publicó el primer libro en el que el suelo se considera como un ente natural independiente y de FALLOU (1862) quien presentó por primera vez el término "*Pedologie*" proponiendo al suelo como el sujeto de una ciencia independiente.

Para dar respuesta al problema de la pérdida de suelo por erosión hídrica, COOK (1936) identificó por primera vez los factores de control de la pérdida de suelo, describiendo la susceptibilidad del suelo frente a la erosión (erodabilidad), erosividad potencial de la lluvia y el efecto protector de la cubierta vegetal.

Años más tarde, ZINGG (1940) publicó la primera ecuación para calcular la pérdida de suelo, considerando el efecto de la inclinación y longitud de la pendiente. SMITH (1941) añadió a esta ecuación los factores de gestión de los cultivos y de medidas de conservación del suelo. Así mismo, introdujo el concepto de límite de pérdida de suelo anual, conocido posteriormente como pérdida de suelo tolerable, y desarrolló un método gráfico de selección de diferentes medidas de protección del suelo para el medio oeste de EE.UU.

BROWNING *et al.* (1947) añadieron a la ecuación los factores de erodabilidad, gestión del suelo y de las cubiertas; observaron la necesidad de establecer un valor máximo de longitud de la pendiente en función de las rupturas de pendiente producidas por las distintas técnicas de arado y manejo del suelo agrícola.

Estas investigaciones permitieron a SMITH y WHITT (1948) presentar la primera ecuación completa de predicción de la pérdida de suelo anual para zonas de cultivo. Tras este primer modelo de pérdida de suelo se han sucedido diversas mejoras y ampliaciones que han dado lugar a la variedad de modelos de erosión que existen hoy en día y que permiten investigar la pérdida de suelo desde una perspectiva multidisciplinar.

2.1.2 Tipos de erosión

Podría aceptarse la consideración de dos tipos básicos de erosión: la geológica o natural, y la antrópica o acelerada. La primera se produce normalmente sin la acción del hombre, estando por tanto fuera de su control; es tan lenta que pasa inadvertida y contribuye de cierto modo a la formación del relieve mismo y a la meteorización de rocas.

En el tipo de erosión natural intervienen el agua (ríos, mar, lluvia), el viento, la temperatura y la gravedad; es considerada benéfica, pues busca la estabilidad de la superficie y un equilibrio entre el suelo, la vegetación, los animales y el agua; se ha presentado durante millones de años y existe actualmente como en el pasado, variando espacialmente dadas las diferencias en el carácter de las rocas y en las condiciones climáticas y de vegetación.

Por otra parte, en la erosión acelerada ha mediado el hombre, destruyendo la vegetación protectora al introducir otros usos al suelo y con ello rompiendo el equilibrio natural. Así, se ha favorecido la acción erosiva del agua y viento, en especial en terrenos inclinados, al usar sistemas de cultivos y herramientas inadecuadas, al talar los bosques y/o quemar la vegetación, al construir obras de infraestructura, etc.

De acuerdo con el agente físico causante, pueden definirse tres tipos de erosión: hídrica, eólica y glacial. Es la primera de ellas la que mayor interés reviste en aquellos espacios geográficos de los trópicos sujetos a

condiciones climáticas en donde imperan abundantes y frecuentes lluvias de alta intensidad. El viento y el hielo son importantes agentes activos de la erosión eólica y glacial respectivamente, cuya importancia es menor en los trópicos, sin embargo, la primera influye considerablemente en países de clima mediterráneo, y los de origen glacial van modelando los paisajes del continente europeo y otros países del globo (LÓPEZ, 2007).

En el trópico, la erosión puede dividirse en dos grandes grupos según, las causas que la originan dentro de ellos tenemos:

2.1.2.1 Erosión hídrica

Es la erosión causada por el agua, producto de precipitaciones fuertes, en general se dividen en tres tipos, los cuales pueden ocurrir simultáneamente sobre un mismo terreno. Estos tipos se denominan: laminar, en surcos y cárcavas.

- La erosión laminar, consiste en la remoción de capas delgadas y más o menos uniformes de suelo sobre toda un área. Es la forma menos notable del flagelo y, por lo mismo, la más peligrosa.
- La erosión en surcos, ocurre cuando por pequeñas irregularidades en la pendiente del terreno, la escorrentía se concentra en algunos sitios hasta adquirir velocidad y volumen suficiente para hacer cortes y formar canaliculos que se destacan en el terreno.

- La erosión en cárcavas, se presenta generalmente cuando hay una gran concentración de la escorrentía en determinadas zonas del terreno y se permite que año tras año vayan ampliándose los surcos formados por la acción de esas corrientes de gran volumen y velocidad.

2.1.2.2 Erosión eólica

La erosión eólica o erosión causada por el viento, es un fenómeno que ocurre generalmente en regiones planas y de bajas precipitaciones, donde la vegetación natural crece escasamente y ofrece una reducida protección al suelo y en dónde, además, existen vientos o brisas de velocidades considerables.

2.1.3 Agentes causantes de la erosión hídrica

Son aquellos factores que aceleran, controlan y regulan la erosión hídrica, dentro de los cuales se tiene la precipitación, las características topográficas, las características edáficas intrínsecas y la cubierta vegetal.

2.1.3.1 Precipitación

La lluvia o precipitación es considerada la principal fuente de agua sobre el terreno; de su cantidad, intensidad y frecuencia depende el volumen de flujo de suelo que se desliza en capas uniformes. Con respecto a la primera, MORGAN (1986) expone que a una escala global la erosión alcanza sus máximos valores con precipitaciones de 300 mm año^{-1} ; cuando la precipitación

total es inferior a dicho valor, la erosión se incrementa conforme la precipitación lo hace, sin embargo una vez este valor es superado el efecto de protección ofrecida por la cubierta vegetal que se beneficia de una mayor precipitación incidente, se traduce en menores pérdidas de suelo (SUÁREZ, 1979).

2.1.3.2 Pendiente del terreno

En condiciones normales, la erosión se incrementa conforme lo hace el grado y longitud de la pendiente, como resultado de los respectivos incrementos en velocidad y volumen de la escorrentía superficial. Además, mientras en una superficie plana el golpe de las gotas de lluvia arroja las partículas de suelo al azar en todas las direcciones, en condiciones de pendiente inclinada, más suelo es salpicado hacia abajo de ella que hacia arriba incrementándose la proporción conforme lo hace el grado (MORGAN, 1986).

El grado de la pendiente regula la velocidad de circulación del agua sobre la superficie de forma casi exclusiva. En los trópicos húmedos el efecto de la pendiente en combinación con las tormentas tropicales es decisivo en la generación de pérdidas de suelo (ZINGG, 1940).

Así mismo, la longitud de la pendiente influye en la velocidad por las alturas de agua acumuladas en la parte baja de las pendientes; tales alturas son mayores cuanto más extensas son las vertientes en la parte superior.

2.1.3.3 Material parental

La importancia del material parental en el análisis del fenómeno erosivo estriba en los rasgos hereditarios que de él se derivan en los suelos conforme avanza el proceso de meteorización. Una clasificación primaria de las rocas es aquella establecida basándose en su origen; así, se diferencian tres tipos de ellas: ígneas, metamórficas y sedimentarias. De acuerdo a su dureza relativa, éstas pueden agruparse en blandas (sedimentarias) y duras (metamórficas e ígneas). Esta clasificación plantea que las rocas ígneas y metamórficas son más resistentes, lo cual se da en razón de ser más compactas por presentar un mayor empaquetamiento entre sus minerales constituyentes (SUÁREZ, 1979).

Por otro lado, las rocas sedimentarias presentan una mayor porosidad, la cual permite el ingreso del agua al interior de la roca, favoreciendo el proceso de meteorización, que resulta en un efectivo ablandamiento del material y de allí una mayor susceptibilidad a la erosión.

2.1.3.4 Características internas de los suelos

En la explicación del fenómeno erosivo, es indudable el papel que cumplen algunas propiedades de los suelos, principalmente físicas, como coactores en tal fenomenología. Debe destacarse entonces el efecto que tienen sobre el proceso de infiltración la textura, el contenido de materia orgánica y la estructura del suelo, al imprimirle diferentes características de permeabilidad y erodabilidad (LÓPEZ, 2007).

2.1.3.5 Vegetación

La cubierta vegetal se desempeña como agente regulador en los fenómenos erosivos, controlando los excesos de agua en el perfil del suelo, disminuyendo las velocidades del flujo de escurrimiento e integrando el suelo como masa unitaria, entre otros beneficios. Sin embargo, su papel es variable de acuerdo a las características de porte, enraizamiento, hábito y velocidad de crecimiento; incluso en ocasiones puede favorecer las condiciones de inestabilidad de las laderas.

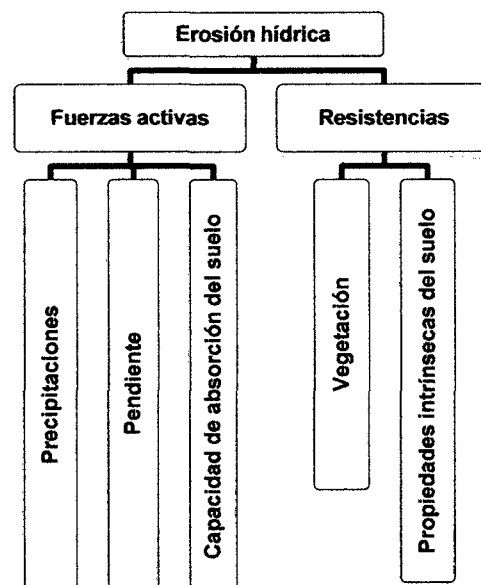
En términos generales, las formas o mecanismos a través de los cuales las plantas defienden el suelo son los siguientes (SUÁREZ, 1980):

- **Dispersión directa, intercepción por el follaje y evaporación de gotas de agua lluvia.**
- **Transpiración, humedad que pasa de estratos profundos al aire.**
- **Protección directa, contra el impacto de las gotas de lluvia.**
- **Efecto sujetador, del sistema radicular sobre las partículas de suelo.**
- **Penetración de raíces a través del perfil, al descomponerse dejan espacios que favorecen los procesos de infiltración y de aireación.**
- **Mejoramiento de estructura del suelo, principalmente por aporte de materia orgánica, y con ello la infiltración.**

- Aumento del coeficiente de rugosidad y dispersión lateral de la escorrentía, reduciéndose con ello el volumen y la velocidad del flujo.

Además SUÁREZ (1979) asegura que el efecto amortiguador que tienen las coberturas vegetales contra el impacto directo de las gotas de lluvia, y los demás recién listados, es de gran interés el efecto relacionado con el mejoramiento del proceso de infiltración. En tal sentido, este proceso es favorecido por el crecimiento y desarrollo de las raíces a través del perfil del suelo, incrementando su porosidad y con ello la infiltración.

Asimismo, el paso del material muerto al suelo incrementando el contenido de materia orgánica y humus, favorece a su vez la porosidad y la capacidad de retención de agua de los terrenos, retardando con ello la aparición de la escorrentía superficial.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Agentes causantes de la erosión hídrica.

2.1.4 Proceso de erosión hídrica

La desagregación y transporte de partículas debido al impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo es, generalmente, el primer proceso de erosión que tiene lugar al inicio de una tormenta (VAN DIJK *et al.*, 2002).

En zonas de baja pendiente el transporte de partículas por salpicadura resulta casi irrelevante debido a la redistribución espacial homogénea de las partículas desagregadas, mientras que en zonas de moderada y elevada pendiente juega un papel importante en la redistribución aguas abajo de las partículas desagregadas.

Una vez que los horizontes superficiales del suelo alcanzan el nivel de saturación y que rebasa la capacidad de almacenamiento máximo de agua en la superficie del suelo, el volumen de precipitación restante se convierte en escorrentía superficial, desagregando y transportando partículas de suelo.

La erosión hídrica incluye también procesos subsuperficiales y subterráneos, entre los que destaca la formación de agujeros y canales verticales paralelos a las cárcavas o barrancos (GUTIÉRREZ *et al.*, 1997) y los procesos de disolución y lixiviación del suelo.

Los procesos de erosión hídrica que tienen lugar en las laderas difieren significativamente de los que tienen lugar dentro de los cursos de agua, tanto en la magnitud del suelo erosionado como del redistribuido.

2.2 Métodos de cuantificación y modelización de la erosión

Tanto la medida directa como la modelización predictiva de la pérdida y acumulación de suelo pretenden dar respuesta a las preguntas de dónde, en qué cantidad y en qué momento se producen los distintos procesos de erosión y redistribución del suelo.

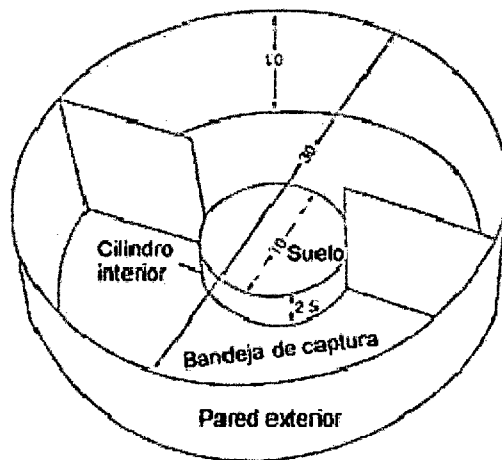
La erosión afecta tanto a las rocas y materiales geológicos no consolidados, como al suelo en sentido estricto, de tal modo que las tasas de pérdida y acumulación que se obtienen a través de las diversas medidas y modelos no discriminan entre el origen del material removilizado.

2.2.1 Técnicas de medida directa

Tradicionalmente las medidas sobre el terreno han constituido la manera frecuente de estimar la pérdida y acumulación del suelo a lo largo de las laderas, y especialmente en pequeñas parcelas o cuencas monitorizadas.

Algunas de las técnicas más usadas son: tazas de salpicadura para medir la erosión y transporte de partículas producido por el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo (SALLES y POESEN, 2000) agujas de erosión y perfiladores microtopográficos para medir variaciones a pequeña escala del perfil transversal de cárcavas y laderas (DE SANTISTEBAN *et al.*, 2006; SIRVENT *et al.*, 1997) colectores de agua y sedimento en parcelas y cuencas aforadas para el estudio de la erosión y exportación de sedimento a escala de evento (DESIR y MARÍN, 2007).

En determinados ambientes de escasa pluviometría, como en las regiones semiáridas, la aplicación de simuladores de lluvia permite reproducir, con ciertas limitaciones, los procesos de erosión durante un evento natural (NOLAN *et al.*, 1997; NAVAS, 1993).



Fuente: Morgan (1995).

Figura 2. Taza de salpicadura.

2.2.2 Modelización predictiva

Los costos elevados, la necesidad de equipamiento y la limitada área de aplicación de algunas de las técnicas de medida directa, convierten a los modelos de predicción en herramientas de uso frecuente en la investigación de los procesos de erosión y redistribución del suelo.

Los modelos permiten valorar de un modo rápido el impacto de los procesos de erosión en áreas de cultivo y forestales, estimar la efectividad de las medidas de conservación del suelo y de control de la erosión, bajo diferentes escenarios en los que todos los parámetros se pueden variar con el

objeto de valorar su efecto de modo particular o sobre el resto de las propiedades consideradas.

Los modelos de predicción permiten integrar extensas bases de datos sobre las que aplicar diferentes ecuaciones de pérdida de suelo que resultan de gran interés a la hora de elaborar políticas económicas y de conservación de los recursos naturales. La mayoría de los modelos de erosión incluyen modelos hidrológicos y en algunos casos módulos de transporte de contaminantes o de nutrientes, de tal modo que los modelos actualmente en uso son multidisciplinarios (LÓPEZ, 2007).

La modelización de la erosión y transporte del suelo tal y como hoy la entendemos comienza en EE.UU. de la mano de WISCHMEIER y SMITH (1958), a través de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE, por sus siglas en inglés). Este modelo se aplica a escala de parcela y se ajusta mediante datos de campo, siguiendo un planteamiento empírico.

La integración de los modelos predictivos en las aplicaciones de tipo SIG y la utilización de modelos digitales de elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés), supone un cambio cualitativo en el estudio del riesgo de erosión y en la escala espacial y temporal de aplicación de los modelos.

Estas herramientas dieron lugar a una nueva generación de modelos en los que la representación espacial de los parámetros requeridos y

de los procesos de erosión dio origen a los modelos de parámetros distribuidos (MACHÍN y NAVAS, 1995).

Estas nuevas metodologías han permitido la aplicación de los modelos sobre cuencas de gran extensión o en cuencas pequeñas pero a una mayor resolución espacial, así como la incorporación de información proveniente de otras fuentes cartográficas, en especial de aquellas derivadas del análisis de imágenes de satélite (PÉREZ y CABELLO *et al.*, 2006; VICENTE y SERRANO *et al.*, 2004; DE ROO, 1996) o de sensores aerotransportados (BEGUERÍA, 2006).

En función de la aproximación al conocimiento y representación de los procesos de erosión, los modelos de predicción se dividen en modelos empíricos, de procesos y de balance de masa y energía.

Los modelos empíricos son modelos funcionales derivados del análisis intensivo de datos de erosión de suelo, bibliográficos y recogidos en parcelas de campo, siendo los más utilizados las ecuaciones USLE (WISCHMEIER y SMITH, 1978) y RUSLE (RENARD *et al.*, 1991).

2.3 Ecuación universal de pérdida de suelos (USLE)

De los diversos modelos paramétricos existentes para describir la relación entre la erosión laminar debida a la lluvia y los principales factores que la controlan, el más conocido, estudiado y comprobado es la ecuación universal

de pérdida de suelo, desarrollada en el National Runoff and Soil Loss Data Center, fundado en 1954, por el Science and Education Administration de los Estados Unidos (formalmente Agricultural Research Service), en cooperación con la Universidad de Purdue.

En 1958 Wischmeier estadístico del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), se puso en la tarea de intercalar la información disponible sobre precipitación y pérdidas de suelos. Posteriormente Wischmeier y Smith (1960 y 1978) se propusieron establecer un modelo empírico para predecir la erosión en terrenos agrícolas, con el objeto que especialistas en el tema de erosión pudieran escoger el tipo de medidas requerido para mantener las pérdidas de suelo dentro de límites aceptables, de acuerdo con el clima, la pendiente y los factores de productividad.

El modelo fue presentado formalmente por Walter Wischmeier y Dwight Smith en 1978 con base en investigaciones desarrolladas por diversos autores y entidades en los Estados Unidos desde 1930, acerca de las relaciones entre energía cinética de las gotas de lluvia y las pérdidas de suelo.

La información para el análisis estadístico consistió en datos básicos de escorrentía y pérdidas correspondiente a más de 10,000 parcelas año⁻¹, obtenidos en terrenos de prueba sometidos a condiciones naturales de lluvia, los cuales estuvieron distribuidos en más de 49 localidades. Esta información fue complementada mediante simuladores de lluvia instalados a

partir de 1960, en parcelas de prueba localizadas en 16 Estados que carecían de datos adecuados.

La USLE es un modelo de erosión diseñado para predecir el promedio de pérdidas de suelo a largo plazo, en terrenos agrícolas, bajo sistemas de cosecha y manejo particulares, pero también es aplicable en condiciones no agrícolas, como aquellas relacionadas con las actividades de construcción (USDA, 1978).

Si la selección de los factores es apropiada en un determinado sitio, la ecuación permite calcular el promedio de pérdidas de suelo durante un año particular o durante una fracción del mismo.

La ecuación del modelo se expresa como una multiplicación de seis factores que reflejan las diversas variables que gobiernan la erosión, las cuales varían considerablemente alrededor de su media, de una lluvia a otra, pero los efectos de sus fluctuaciones aleatorias tiende a un promedio durante largos periodos.

Debido al carácter aleatorio de los niveles de fluctuación de dichas variables, las predicciones de la ecuación son sustancialmente menos precisas para eventos específicos que para promedios a largo plazo. La ecuación universal de pérdidas de suelos se expresa como:

$$A = R.K.L.S.C.P$$

Donde:

- A : Pérdida de suelo calculada por unidad de área, expresada de acuerdo con las unidades seleccionadas para K y R, en el periodo seleccionado. Normalmente se expresa en $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$.
- R : Factor de lluvia y escorrentía. Es el número de unidades del índice de erosión pluvial en $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ año^{-1}$.
- K : Factor de erodabilidad del suelo. Es la tasa de pérdida de suelo por unidad del índice de erosión pluvial que un suelo exhibe en una parcela unitaria, la cual se define como aquella unidad de terreno con 22.1 metros de longitud y 9% de pendiente uniforme, arada en la dirección de la máxima pendiente y mantenida en barbecho continuo (baldía), y sin porte de materia orgánica, desde 2 años antes del inicio de las mediciones. Está dado en $t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$.
- L : Factor de longitud de la pendiente. Es la relación entre las pérdidas de suelo que ocurren en una longitud de terreno dada y aquellas que ocurrirían en una longitud de 22.1 metros, bajo las mismas condiciones de lluvia, erodabilidad, inclinación, cobertura y manejo. Es un factor adimensional.

- S :** Factor de inclinación de la pendiente. Es la relación entre las pérdidas de suelo que ocurren en un terreno con un gradiente dado y aquellas que ocurrirían en una inclinación del 9%, bajo las mismas condiciones de lluvia, erodabilidad, inclinación, cobertura y manejo; es un factor adimensional.
- C :** Factor de cobertura y manejo. Es la relación entre las pérdidas de suelo que ocurren en un terreno bajo unas condiciones de cobertura y manejo dadas y aquellas que ocurrirían un área idéntica, arada en dirección de la pendiente y mantenida en barbecho continuo.
- P :** Factor de prácticas de soporte o conservación. Es la relación entre las pérdidas de suelo que ocurren bajo una práctica de conservación dada, tal como: siembra en contorno, cultivo en fajas, barreras vivas, terrazas, acequias de ladera, entre otras, y aquellas que ocurrirían en el terreno si este es mantenido en barbecho continuo y se ara en dirección de la pendiente. Es un factor adimensional.

2.3.1 Factor de lluvia y escorrentía (R)

Se ha denominado también como “factor de erosividad de la lluvia”, es una propiedad específica del comportamiento de las precipitaciones que determina su capacidad potencial de movilizar partículas o agregados del suelo, bajo unas condiciones dadas.

La energía de una tormenta es una función de la cantidad de lluvia y de todos los componentes de intensidad del aguacero. El tamaño medio de las gotas se incrementa con la intensidad de la lluvia y la velocidad terminal de las gotas de agua se incrementa con el incremento de su tamaño. Dado que la energía de una masa en movimiento es proporcional al cuadrado de la velocidad, la energía de la lluvia está directamente relacionada con su intensidad.

Tras analizar numerosos datos de campo WISCHMEIER y SMITH (1958) y WISCHMEIER (1959) observaron que cuando el resto de factores permanecen constantes, la pérdida de suelo en campos de cultivo está asociada a un parámetro de lluvia, que es el producto de la energía total de la tormenta (E) por el valor de la máxima intensidad durante un periodo de 30 minutos (I_{30}). El resultado de este producto es el índice EI_{30} o EI , que se define como la erosividad de una tormenta o evento de lluvia erosiva. Este índice es un término de interacción estadística que refleja cómo la energía total y la intensidad máxima se combinan en cada evento de lluvia. Desde un punto de vista físico, el índice EI_{30} combina la desagregación de las partículas del suelo con la capacidad de transporte de la escorrentía, produciendo una pérdida neta de suelo.

Investigaciones actuales como es el caso del modelo RUSLE establece que un evento de lluvia es erosivo cuando la precipitación acumulada es ≥ 12.7 mm, o bien cuando la precipitación es <12.7 mm, pero con al menos

un pico de intensidad ≥ 6.35 mm en 15 minutos. Finalmente, dos eventos de lluvia quedan individualizados uno del otro cuando la precipitación acumulada a lo largo de 6 horas es < 1.27 mm.

Al existir una relación lineal entre el índice de erosividad EI_{30} y la pérdida de suelo, la suma de los valores del índice EI_{30} durante un año para una localidad determinada es la medida del factor de erosividad de la lluvia y de la escorrentía R . El valor obtenido permite cuantificar el efecto del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo, así como la magnitud de la escorrentía, pero no refleja el efecto de los aportes de agua originados tras la fusión de la nieve, ni de aquellos procedentes del regadío, ni tampoco el efecto de la lluvia sobre el suelo helado.

Matemáticamente el cálculo del factor R se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{k=1}^m (E)(I_{30})_k \right)$$

Donde:

E : es la energía total de una tormenta o evento de lluvia erosiva.

I_{30} : es la intensidad de la lluvia durante los 30 minutos de mayor intensidad.

m : es el número de intervalos temporales K en los que se divide un evento de lluvia erosiva.

j : es el número de eventos de lluvia erosivos para el número n de años estudiados.

ROOSE (1995), propone el siguiente índice de erosividad que considera la precipitación promedio anual y se expresa por la siguiente ecuación:

$$R = 1.73 * 0.5 * P$$

Donde:

P = Precipitación promedio anual en mm.

MORGAN (1974), propone este método para lugares de alta precipitación y está dado por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{I_{30}(9.28P - 8.383)}{1000}$$

Donde:

I_{30} = 75 mm/h (valor recomendado por Wischmeier).

P = Precipitación promedio anual en mm.

FOSTER (1981), expresa R a través de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{0.276PxI_{30}}{100}$$

Donde:

I_{30} = 75 mm/h (valor recomendado por Wischmeier).

P = Precipitación promedio anual en mm.

2.3.2 Erodabilidad del suelo (K)

Se ha denominado también “índice de erodabilidad del suelo”, representa en forma combinada la resistencia a la erosión de un suelo específico (por impacto de las gotas de lluvia y por escorrentía), medida durante años completos. Determina la cantidad de erosión que ocurre por cada unidad del índice de erosión pluvial R, para un suelo localizado dentro de una parcela unitaria o parcela USLE estándar.

Los valores de longitud del terreno de 22.1 metros e inclinación de la pendiente del 9% correspondiente a la parcela unitaria, son utilizados como base para la evaluación de los factores L, S y K, debido a que corresponden a la longitud y gradientes promedios, utilizados para las mediciones de pérdidas de suelo durante 40 años en Estados Unidos, las cuales dieron origen a la base de datos empleada para el desarrollo del modelo USLE.

El factor K es un valor cuantitativo determinado experimentalmente y debe ser estudiado en forma independiente de los otros factores de la

ecuación USLE. Por tanto, no es posible evaluar las diferencias en la susceptibilidad natural de los suelos a la erosión, mediante simples apreciaciones visuales en campo.

La erodibilidad del suelo es una propiedad compleja que refleja la facilidad con la que un suelo es desagregado debido al impacto de las gotas de lluvia, al flujo superficial o a ambos. En el modelo RUSLE, el factor K de erodabilidad del suelo ($t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$) corresponde a la tasa de pérdida de suelo por unidad de erosividad de la lluvia y de la escorrentía, medido sobre una parcela de 22.1 m de largo y 1.83 m de ancho, con una pendiente constante del 9%.

Este factor refleja de modo agrupado cómo la conductividad hidráulica, el contenido en materia orgánica, el tipo de textura y de agregados del suelo, ejercen una resistencia frente a la disgregación del suelo en partículas fácilmente exportables, la variable K (erodabilidad del suelo), puede estimarse de acuerdo a WISCHMEIER (1977), así:

$$K = \frac{[2.1(10^{-4})(12 - MO)(M^{1.14}) + 3.25(s - 2) + 2.5(p - 3)]}{100} 0.1317$$

Donde:

K : Factor erodabilidad del suelo ($t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$)

M : M es el producto del porcentaje modificado de limo (0.002 – 0.1 mm) por el porcentaje modificado de arena (0.1 – 2 mm).

- MO : Es el porcentaje de materia orgánica.
- s : Clase de estructura de los agregados del suelo.
- p : Clase de permeabilidad del suelo.

Las clases de estructura y de permeabilidad del suelo se derivan de las definidas en el manual de suelos N° 430 del Departamento de Agricultura de EE.UU. (USDA, 1983).

Cuadro 3. Clase de permeabilidad según la textura.

Clase de permeabilidad	USDA (1983)	Rawls et al. (1982)	Hudson (1982)
	Textura	K_{fs} (mm h ⁻¹)	K_{fs} (mm h ⁻¹)
1 (rápida y muy rápida)	Arenosa	> 60.96	> 125
2 (moderada a rápida)	Arenosa franca,	20.32 - 60.96	62.5 - 125
	franco arenosa		
3 (moderada)	Franca, franco	5.08 - 20.32	20 - 62.5
	limosa, limosa		
4 (lenta a moderada)	Franco arcillo	2.03 - 5.08	5 - 20
	arenosa, franco		
5 (lenta)	arcilloso	1.02 - 2.03	1.25 - 5
	limosa, arcillo		
6 (muy lenta)	arenosa	< 1.02	< 1.25
	Arcilloso, arcillo		
	limosa		

Fuente: Manual de suelos N° 430 (USDA, 1983).

Cuadro 4. Clase de estructura.

Clase de estructura	USDA (1983)
1	Granular y migajosa muy fina (< 1 mm)
2	Granular y migajosa fina (1 - 2 mm)
	Granular y migajosa media (2 - 5 mm) y granular grosera (5 - 10 mm)
3	mm)
4	Granular y prismática muy grosera y columnar (> 10 mm)

Fuente: Manual de suelos N° 430 (USDA, 1983).

2.3.3 Factores topográficos integrados (LS)

Tanto la longitud como la inclinación de un terreno afectan sustancialmente la tasa de erosión hídrica pluvial. Los dos efectos han sido evaluados por separado en las investigaciones y están representados en la USLE por los factores L y S, respectivamente. Sin embargo, para su aplicación, generalmente suelen agruparse bajo la denominación de topográfico LS.

Factor de longitud de la pendiente L, es la relación entre las pérdidas de suelo para una longitud determinada y las pérdidas de suelo para una longitud de 22.1 metros, del mismo tipo de suelo y en condiciones idénticas. Su magnitud es adimensional.

El factor de inclinación de la pendiente S, es una relación entre las pérdidas de suelo para una pendiente determinada y las pérdidas para una pendiente del 9%, del mismo tipo de suelo y bajo las mismas condiciones. El factor de pendiente es adimensional.

Método de Mintegui (1983)

Este método fue elaborado por la Cátedra de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid, mediante la correlación con el mapa de pendientes. Este estudio permitió la elaboración de una tabla que asigna directamente el valor del factor LS en función de la pendiente (RAMOS, 2001).

Cuadro 5. Factor topográfico (LS)

Grupo de pendientes (%)	Factor LS
0 - 3	0.3
3 - 12	1.5
12 - 18	3.4
18 - 24	5.6
24 - 30	8.7
30 - 60	14.6
60 - 70	20.2
70 - 100	25.2
> 100	28.5

Fuente: Facultad de Hidráulica e Hidrología ETSIM (Madrid).

2.3.4 Factor cobertura del suelo (C)

Se conoce también con el nombre de “factor de cobertura vegetal”, es la relación entre las pérdidas del suelo en una parcela de prueba cultivada bajo unas condiciones específicas y las pérdidas del suelo correspondientes a la misma parcela sometida a barbecho continuo. Es un factor adimensional.

La cobertura proporcionada por la vegetación protege el suelo de la acción directa de las gotas de lluvia y de la escorrentía, disminuyendo en forma significativa las pérdidas de suelo respecto a aquellas que ocurrirán con el suelo desnudo. Por tanto el factor de cobertura C es un valor entre 0 – 1, dependiendo del grado de protección dado por la vegetación al suelo.

WISCHMEIER publicó en el año 1978 la tabla que definen los valores de C para los tipos más comunes de cultivos, así como para las diferentes coberturas:

Cuadro 6. Factor cobertura vegetal (C)

Cultivo y práctica	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1
bosque o matorral denso	0.001
Pradera herbácea en buenas condiciones	0.01
Pradera sobrepastoreada	0.1
Maíz, sorgo, con laboreo convencional	0.2 - 0.55
Maíz, sorgo, sin laboreo convencional	0.5 - 0.90
Maíz, sorgo con laboreo mínimo	0.02 - 0.1
maíz, sorgo con alto rendimiento y laboreo con chisel	0.12 - 0.2
maíz, sorgo con bajo rendimiento y laboreo con chisel	0.3 - 0.45
Algodón	0.4 - 0.7
Pradera herbácea	0.01 0.025
Soya	0.2 - 0.5
Trigo	0.1 0.4
Arroz	0.1 - 0.2
Maní	0.3 - 0.8
Frutales con cobertura vegetal	0.01 - 0.8
Caña de azúcar	0.56
Arbolado denso	0.001 - 0.003
Arbolado forestal clareado	0.003 - 0.009
Arbolado muy clareado(25-60%)	0.041
matorral ralo y eriales	0.003 - 0.013
Matorral ralo y eriales	0.2 - 0.013
Cultivos anuales y herbáceos	0.25

Pasturas	0.15
Plantas herbáceas y matorros (100%)	0.003
Plantas herbáceas y matorros (60%)	0.035
Cubierta escasa (60%)	0.15 - 0.09
Cubierta inapreciable	0.45

Fuente: Ramos (2001).

2.3.5 Factor prácticas de conservación de suelos (P)

El factor del método de control de la erosión es la proporción de la pérdida del suelo cuando se hace uso de alguna práctica específica en comparación de la pérdida de suelo cuando se cultiva en laderas de las colinas.

Los factores de método para las tres principales prácticas mecánicas conservacionistas según las recomendaciones de WISCHMEIER Y SMITH (1978), aparece en la siguiente tabla:

Cuadro 7. Factor prácticas de conservación de suelos (P).

Pendiente del terreno (%)	Cultivo en contorno	Cultivo en franjas de contorno y surcos irrigados	Terraceo
1 - 2	0.6	0.3	0.12
3 - 8	0.5	0.25	0.1
9 - 12	0.6	0.3	0.12
13 - 16	0.7	0.35	0.14
17 - 20	0.8	0.4	0.16
21 - 25	0.9	0.45	0.18

Fuente: Wischmeier y Smith (1978).

2.4 Modelo digital de elevaciones (DEM)

Un modelo digital de elevaciones, es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud en la superficie del terreno.

Uno de los elementos básicos de cualquier representación digital de la superficie terrestre son los modelos digitales de elevación. Constituyen la base para un gran número de aplicaciones en ciencias de la Tierra, ambientales e ingenierías de diverso tipos (FELICÍSIMO, 1997).

2.4.1 Estructuras de codificación de la elevación

Un modelo digital de elevaciones puede representarse de forma genérica mediante la ecuación:

$$z = f(x, y)$$

Donde z es la altitud del punto situado en las coordenadas x e y , y f la función que relaciona la variable con su localización geográfica.

Los valores de x e y suelen corresponder con las abscisas y ordenadas de un sistema de coordenadas plano, habitualmente un sistema de proyección cartográfica.

El diseño de estas interrelaciones es lo que configura las diferentes opciones en la estructura de datos, cuya elección es trascendental pues condiciona completamente el futuro manejo de la información.

Mientras que los mapas convencionales usan casi exclusivamente una única convención (las curvas de nivel) para la representación de la superficie del terreno, los DEM disponen de alternativas más variadas, desde una transposición casi directa de las isohipsas hasta otras menos habituales en la cartografía impresa pero más adaptada al proceso digital.

En todas ellas la altitud se describe básicamente mediante un conjunto finito y explícito de cotas. El valor propio de un punto de localización arbitraria será, en su caso, estimado por interpolación a partir de los datos de su entorno.

El cuadro siguiente muestra un resumen de las estructuras de datos de mayor interés para la gestión de los DEM.

Cuadro 8. Resumen de las estructuras más usuales utilizadas para el almacenamiento de los modelos digitales de elevaciones.

VECTORIALES	CONTORNOS	<i>SECUENCIAL</i> : las líneas se almacenan como cadenas de cotas.
		<i>ANALÍTICA</i> : las líneas se almacenan como segmentos de Bézier, polinómicos, etc.
	PERFILES	Cadenas paralelas de cotas en línea con altitud variable.
	TRIÁNGULOS	Red de triángulos irregulares (TIN)
RASTER	MATRICES	<i>REGULARES</i> : cotas sobre una malla cuadrada de filas y columnas equidistantes
		<i>ESCALABLES</i> : cotas sobre submatrices jerárquicas y de resolución variable.

POLÍGONOS Cotas asignadas a teselas
poligonales regulares (triángulos o
hexágonos).

Fuente: FELICÍSIMO (2007).

Históricamente, los modelos digitales de elevaciones se han dividido básicamente en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de los datos: vectorial y raster.

Los modelos vectoriales están basados en entidades (básicamente puntos y líneas) definidas por sus coordenadas. En los modelos raster, los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie no nula que teselan el terreno con una distribución regular, sin solapamiento y con recubrimiento total del área representada.

2.4.2 Parámetros derivados del DEM

A partir de los DEM es posible construir un conjunto de modelos digitales que representan variables derivadas directamente de la topografía (datos y relaciones topológicas entre los mismos), sin intervención de datos auxiliares o información externa (FELICÍSIMO, 1997).

De las principales variables implicadas en estas aplicaciones, la de uso más general es probablemente la pendiente, aunque también son usadas con frecuencia en geomorfología la orientación y la curvatura.

FRANKLIN (1987) menciona cinco parámetros básicos en este contexto: elevación, pendiente, orientación, convexidad y relieve. El relieve, definido en este caso como la variabilidad de la superficie, es lo que otros autores denominan rugosidad.

- Pendiente, la pendiente en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector gradiente en ese punto, P y el eje Z (vertical).
- Sombras, el modelo de sombras representa la superficie del terreno influenciado por el ángulo de iluminación.

2.4.3 DEM SRTM

En febrero del 2000 la NASA, la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA), y las agencias espaciales de Alemania e Italia lanzaron la Misión *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Esta misión produjo el modelo de elevación digital (DEM) de más alta resolución de la superficie terrestre (FARR, 2007) el DEM SRTM, fue producido a una resolución de 1 arco - segundo (aproximadamente 30 m en el Ecuador) para casi todo el globo terráqueo, entre las latitudes 60 grados norte y 56 grados sur (FARR, 2007) con un error de altitud vertical medio de 6,2 m (nivel de confianza de 90%) y un error de ubicación de 9 m para Suramérica (RODRÍGUEZ, 2006).

En el 2003 la NASA publicó los productos DEM en el portal web del Centro de Observación y Ciencia de los Recursos de la Tierra (EROS, por sus siglas en inglés). La distribución de estos datos se rige por el memorando de entendimiento de NASA/NGA, y, en pocas palabras, expone que para aquellas áreas que se encuentran fuera del territorio de los Estados Unidos los datos se pueden distribuir públicamente a una resolución reducida igual a, o mayor que 3 arco segundos (aproximadamente 90 m en el ecuador). Las áreas dentro del territorio de los Estados Unidos no están sujetas a dicha restricción y se pueden publicar con toda la resolución de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m en el ecuador) (FARR, 2007).

2.4.4 DEM ASTER

Desde Julio de 2009 se encuentra disponible para todos los usuarios, en forma gratuita, el Modelo de Elevación Digital Global, confeccionado por el sensor Advance Space Borne Thermal Emisión and Reflection Radiometer (ASTER) de Japón, llamado oficialmente: ASTER GDEM.

Más de 1.2 millones de imágenes, adquiridas entre el año 2000 y el 2008, fueron usadas para construir ASTER GDEM y está siendo publicado oficialmente en la web, por el U.S. Geological Survey (USGS), y posee cobertura global, entre los 83° latitud norte y los 83° latitud sur.

Se distribuye en cuadrángulos de 1° X 1° (12,345.4 Km²), en formato GeoTiff o Tiff Georreferenciado, en coordenadas geográficas Lat/Long, con Datum WGS 84. El total de cuadrángulos para el planeta es de 22.600.

2.5 Sistema de información geográfica (SIG)

La primera referencia al término SIG aparece por TOMLINSON (1967) referida a una aplicación informática cuyo objetivo es desarrollar un conjunto de tareas con información geográfica digitalizada. Se trataba del Sistema de Información Geográfica de Canadá (CGIS).

BERRY (1987) definió un sistema de información geográfica como “un sistema informático diseñado para el manejo, análisis y cartografía de información espacial”.

También, en 1987 el Department of Environment de USA lo expresó como “un sistema para capturar, almacenar, chequear, manipular, analizar y representar datos que están espacialmente referenciados en la Tierra”.

En 1988 BURROUGH y MCDONNELL amplían el concepto a “un sistema de herramientas para reunir, introducir, almacenar, recuperar, transformar y cartografiar datos espaciales sobre el mundo real con el fin de satisfacer múltiples propósitos”. La base de datos está compuesta, generalmente, por un gran número de representaciones espaciales de tipo mapa denominadas “coberturas” o “capas”.

En 1990 el National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA) de USA los define como "sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión".

Tal como se observa, estas definiciones no sólo son sucesivas en el tiempo, sino que además cada una supone un mayor nivel de complejidad respecto a la anterior. La primera hace referencia únicamente a las bases de datos espaciales; la segunda y la tercera a las herramientas (software) de tratamiento de estos datos (el típico paquete de módulos de SIG); finalmente, la cuarta y quinta incluyen el hardware utilizado y los procedimientos complementarios que puedan ser necesarios.

En la actualidad, mediante los SIG se pueden realizar operaciones entre las capas, y así obtener resultados en formato imagen o en tablas. Todos estos resultados pueden utilizarse para la elaboración de análisis y modelos. Por lo tanto, no hay que considerar a los SIG como una herramienta sólo de captura, almacenamiento, manejo y presentación de mapas.

Los SIG son una nueva tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial, y que surgió como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar preguntas de modo inmediato.

La base de un SIG es, por tanto, una serie de capas de información espacial en formato digital que representan diversas variables (formato raster), o bien capas que representan objetos (formato vectorial) a los que corresponden varias entradas en una base de datos enlazada. Esta estructura permite combinar en un mismo sistema, información con orígenes y formatos muy diversos, incrementando la complejidad del sistema.

2.6 Teledetección

Es la adquisición de información sobre un objeto a distancia, esto es, sin que exista contacto material entre el objeto o sistema observado y el observador.

Desde el punto de vista práctico, la teledetección tiene por objeto el reconocimiento de las características de la superficie terrestre y de los fenómenos que en ella tienen lugar a partir de los datos registrados por el sensor.

La tecnología de la teledetección integra los desarrollos más recientes de la investigación espacial, de la física y de la informática, para poner a nuestra disposición una consistente base de datos a una resolución temporal, espacial y espectral útil para la gestión de los recursos, la planificación y el desarrollo económico. No hay duda de que nos encontramos ante una poderosa fuente de información que a finales del siglo XX ha

revolucionado el campo de la adquisición de datos. El desarrollo de metodologías que permitan la aplicación operativa de la teledetección pasa por el trabajo científico y la convergencia de esfuerzos expertos en disciplinas diversas (SOBRINO, 2000).

2.6.1 Satélite Landsat 5 – TM

El satélite Landsat 5 fue puesto en órbita el 1° de marzo de 1984 portando el sensor TM (Mapeador Temático) con captura de datos en 7 bandas diferentes. Su órbita, sincrónica con el sol, tiene una altura de 705 Km y un período de 98.9 minutos, o sea que da 14 vueltas diarias alrededor de la Tierra. Por ser heliosincrónica pasa por una determinada longitud siempre a la misma hora, las 9:45 am (hora local) (CHANDER y MARKHAM, 2003).

El Landsat 5 pertenece al programa Landsat, financiado por el gobierno de los Estados Unidos y operado por la NASA. Pesa 2200 Kg y tiene una longitud aproximada de 4 metros. Lleva a bordo un sensor denominado Thematic Mapper (TM) que opera en siete bandas espectrales diferentes. Estas bandas fueron elegidas especialmente para el monitoreo de vegetación.

Banda 1(0,45 a 0,52 micrones - azul), diseñada para penetración en cuerpos de agua, es útil para el mapeo de costas, para diferenciar entre suelo y vegetación y para clasificar distintos cubrimientos boscosos, por ejemplo coníferas y latifoliadas.

Banda 2(0,52 a 0,60 micrones - verde), especialmente diseñada para evaluar el vigor de la vegetación sana, midiendo su pico de reflectancia (o radiancia) verde. También es útil para diferenciar tipos de rocas y, al igual que la banda 1, para detectar la presencia o no de limonita.

Banda 3(0,63 a 0,69 micrones - rojo), es una banda de absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal. También sirve en la diferenciación de las distintas rocas y para detectar limonita.

Banda 4(0,76 a 0,90 micrones - infrarrojo cercano), es útil para determinar el contenido de biomasa, para la delimitación de cuerpos de agua y para la clasificación de las rocas.

Banda 5(1,55 a 1,75 micrones - infrarrojo medio), indicativa del contenido de humedad de la vegetación y del suelo. También sirve para discriminar entre nieve y nubes.

Banda 6(10,40 a 12,50 micrones - infrarrojo termal), el infrarrojo termal es útil en el análisis del stress de la vegetación, en la determinación de la humedad del suelo y en el mapeo termal.

Banda 7(2,08 a 2,35 micrones - infrarrojo medio), especialmente seleccionada por su potencial para la discriminación de rocas y para el mapeo hidrotermal. Mide la cantidad de hidróxilos (OH) y la absorción de agua.

Cuadro 9. Principales características de la imagen Landsat 5 – TM.

Sensor	Res. Espectral (μm)	Res. Espacial (m)	Res. Temporal (días)	Res. Radiométrica (bits)	Cober- tura (km)
Landsat - 5 TM	B1: 0.45 - 0.52 (azul)	30			185 x 170
	B2: 0.52 - 0.60 (verde)	30			
	B3: 0.63 - 0.69 (rojo)	30			
	B4: 0.76 - 0.90 (IR cercano)	30	16	8	
	B5: 1.55 - 1.75 (IR medio)	30			
	B6: 10.4 - 12.5 (IR térmico)	120			
	B7: 2.08 - 2.35 (IR medio)	30			

Fuente: Sistema de Información de Biodiversidad (2005).

Estas siete bandas pueden combinarse de a tres o más, produciendo una gama de imágenes de color compuesto que incrementan notablemente sus aplicaciones, especialmente en el campo de los recursos naturales.

El mapeador temático (TM) tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor, el MSS, y mejor resolución espacial, ya que el tamaño del pixel en todas las bandas excepto la 6, es de 30 metros. Esto permite la clasificación de zonas tan pequeñas como 2,5 o 3 hectáreas.

2.6.2 Índices de vegetación

El Índice de vegetación (IV) es un parámetro calculado a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretende extraer la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de otros factores externos como las propiedades ópticas del suelo, la irradiancia solar, etc. El índice de vegetación ideal ha sido descrito por JACKSON *et al.* (1983) como “aquel particularmente sensible a la cubierta vegetal, insensible al brillo y color del suelo y poco afectado por las perturbaciones atmosféricas, los factores medioambientales y la geometría de iluminación y de observación”.

Evidentemente, el índice de vegetación ideal no existe, y los más usados son diversas aproximaciones al mismo. Como más del 90% de la información espectral de una cubierta vegetal está contenida en las bandas roja e infrarroja próxima, son estas dos bandas las que se utilizan principalmente.

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), es sin lugar a dudas, el índice más utilizado en aplicaciones agronómicas de teledetección ya que reúne tres características muy importantes: su sencillez matemática, su fácil interpretación y su poder de normalización de la respuesta espectral de sistemas de vegetación, alcanzando un alto grado de correlación con diversos parámetros de interés agronómico.

El NDVI es un índice de vegetación bi – dimensional, sugerido por ROUSE *et al.* (1974). Este índice toma valores en el rango de -1.0 a +1.0, donde valores negativos indican superficies sin vegetación, tal como agua, nieve o nubes y valores positivos indican vegetación creciente, el suelo posee valores bajos, mientras la vegetación se encuentra dentro del rango de 0.2 a 0.8.

El éxito del NDVI como un descriptor de las variaciones de vegetación, a pesar de los efectos atmosféricos y degradación radiométrica del sensor en las bandas del infrarrojo cercano y visible, reside en la normalización que realiza reduciendo el efecto de la degradación de calibración del sensor en aproximadamente un 6% del valor total del índice (BANNARI *et al.*, 1995).

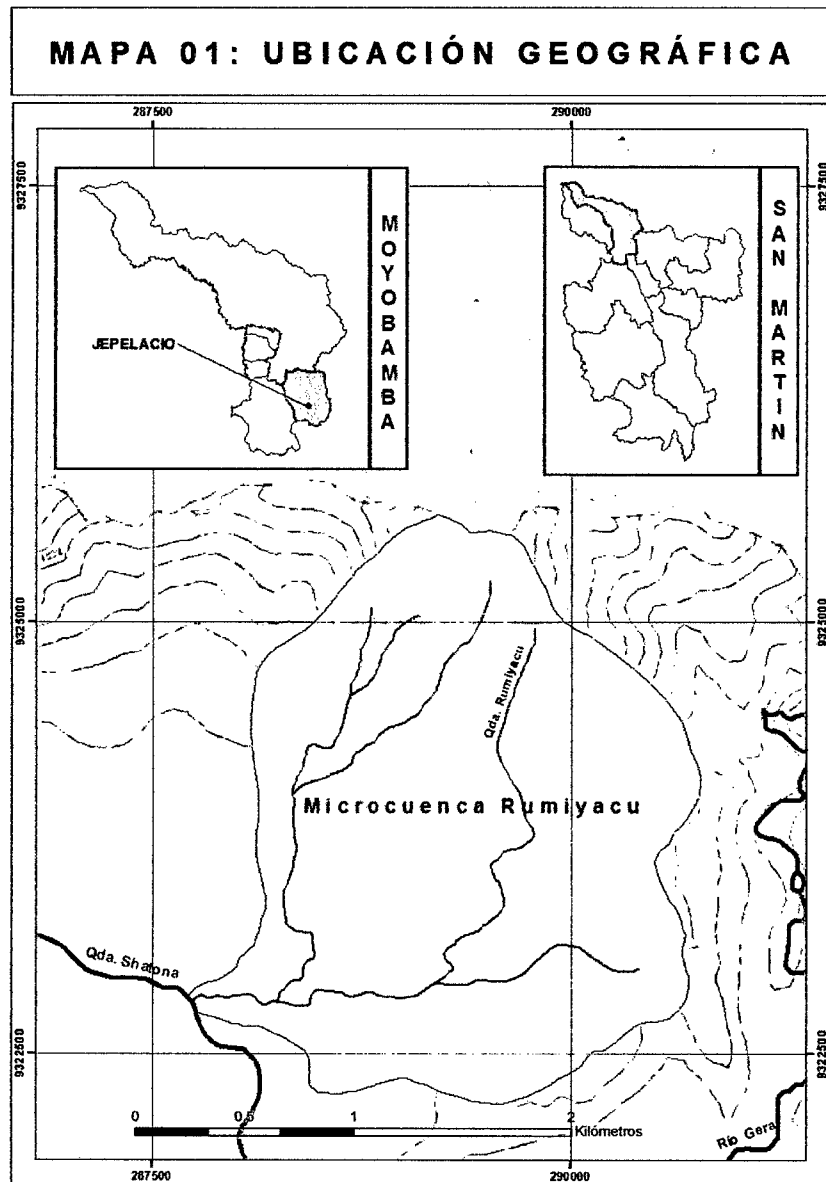
Se considera un buen estimador de la biomasa, es universalmente usado y ha resultado el índice verde más consistente para monitoreo de vegetación en los ambientes y situaciones más diversos; se utiliza ampliamente para evaluar de manera rápida, a escala regional, la productividad de los cultivos, con un nivel aceptable de precisión y tiene correlación con el contenido de humedad de la planta y puede ser aplicado —incluso en la agricultura de precisión— en el control de los cultivos, debido a que las observaciones espectrales del follaje pueden, por tanto, usarse para monitorear las variaciones del crecimiento; las que, subsecuentemente, pueden utilizarse como indicadores del estrés a que está sometido el cultivo e, indirectamente, en la productividad del cultivo (XAVIER, 2004; BENEFETTI, 1993).

Además de conocer el vigor o debilidad de la vegetación, el índice puede ser un elemento de diferenciación de cultivos y lo mismo en vegetación natural, con una identificación en la imagen que se mantiene con toda nitidez. Además, ésta no pierde la respuesta espectral de cada pixel.

Lo usual para el índice de vegetación (aprovechando la alta absorción de las bandas del visible y la fuerte reflectancia del infrarrojo cercano) es buscar la relación entre la banda del infrarrojo cercano (700-1300 nm) y la banda del rojo (650 nm) lo que corresponde, en el TM, a la relación entre las bandas 4 y 3.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de ejecución



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Mapa de ubicación de la microcuenca Rumiyaçu.

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en la microcuenca Rumiyacu, ubicada al norte del distrito de Jepelacio, provincia de Moyobamba, región San Martín; presenta una superficie aproximada de 705.70 ha y una altitud promedio de 1200 m.s.n.m.

El análisis y procesamiento de datos de campo, se realizó en las instalaciones de la Cooperativa Agraria Cafetalera “Fe y Esperanza” Valle del Alto Mayo, ubicada en el distrito y provincia de Moyobamba, región San Martín.

3.1.1 Ubicación geográfica

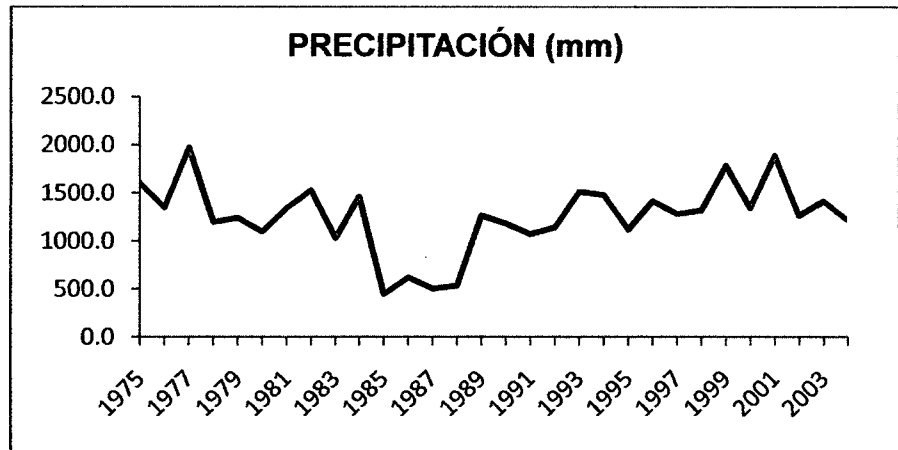
La microcuenca Rumiyacu se encuentra ubicada entre las coordenadas geográficas:

6.09° a 6.13°	Latitud Sur
76.92° a 76.88°	Longitud Oeste
Altitud	1200 m.s.n.m.

3.2 Características del área de estudio

3.2.1 Precipitación

La estación Meteorológica “CO – Jepelacio” del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI, registra una precipitación promedio anual de 1250 mm, en toda el área de estudio.



Fuente: Registros de la estación CO – Jepelacio.

Figura 4. Precipitación promedio anual de la microcuenca Rumiyacu.

3.2.2 Humedad

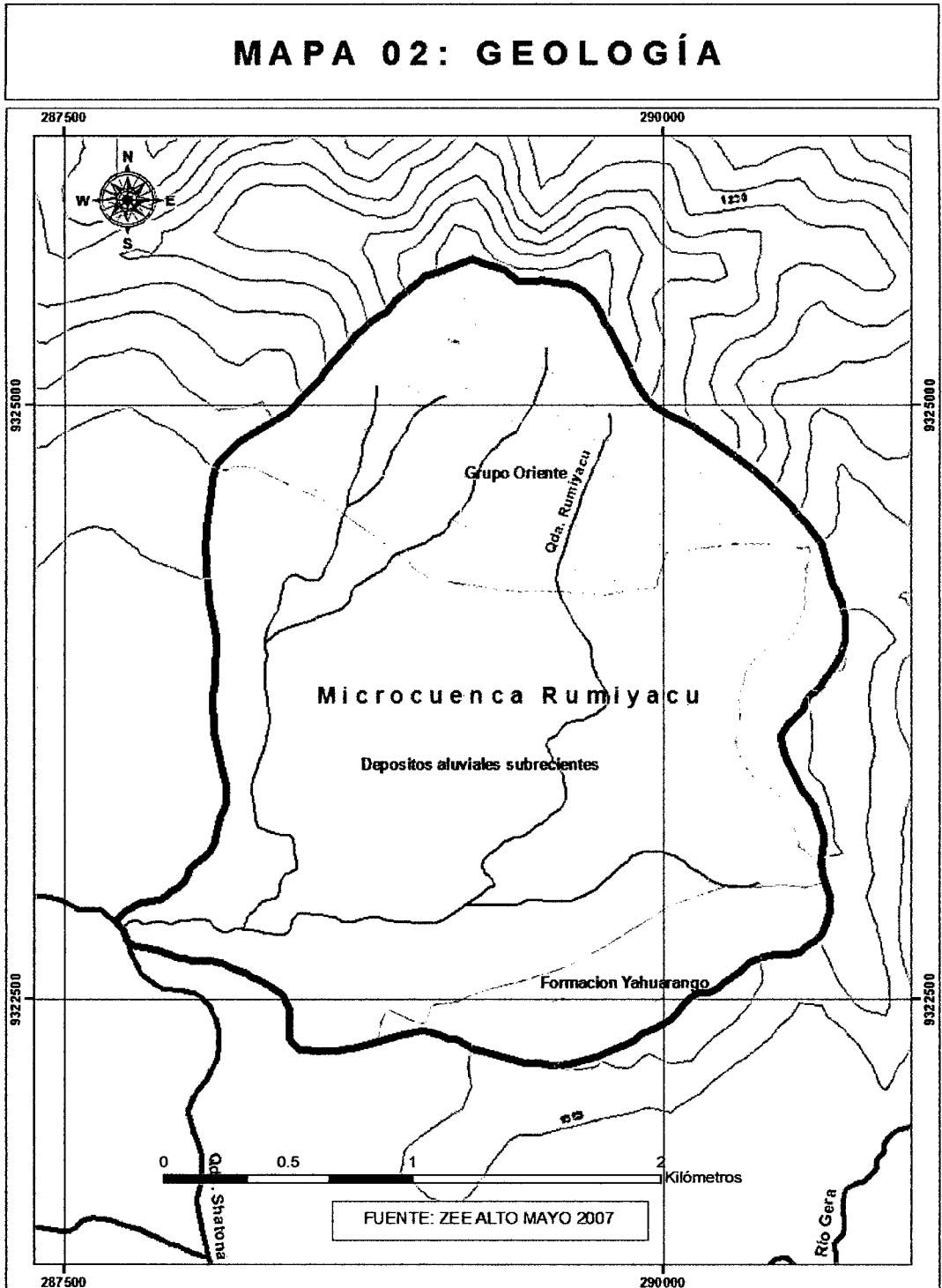
La estación CO – Jepelacio registra para la microcuenca Rumiyacu una humedad relativa media anual de 80%.

3.2.3 Temperatura

Se registra una temperatura máxima de 30 °C, temperatura mínima de 17.1 °C y una temperatura promedio de 22.6 °C, para la cuenca en estudio.

3.2.4 Geología

La microcuenca Rumiyacu, geológicamente está dividida en tres grupos diferenciados:



Fuente: ZEE Alto Mayo 2007.

Figura 5. Mapa de grupos geológicos de la microcuenca Rumiyacu.

Grupo Oriente, representa el 30.6% del área en estudio con una superficie de 216.2 ha, constituido por areniscas cuarzosas y lutitas grises.

Depósitos aluviales subrecientes, constan esencialmente de arenas y arcillas depositadas en las zonas anegadizas de los ríos Shatona y Gera, representa el 60.8% de la cuenca en estudio con una superficie de 429.0 ha.

Formación Yahuarango, constituye un conjunto litológico denominado capas rojas continentales, que da inicio al depósito continental donde describe en la parte superior limo arcillitas rojas (lodolitas rojizas), limolíticas; y en la base, conglomerados redondeados a subangulosos con estratificación sesgada.

3.2.5 Fisiografía

La fisiografía de la microcuenca Rumiyacu es muy variada, encontrándose zonas relativamente planas, así como también montañas altas de laderas muy empinadas, se logra distinguir cuatro grupos:

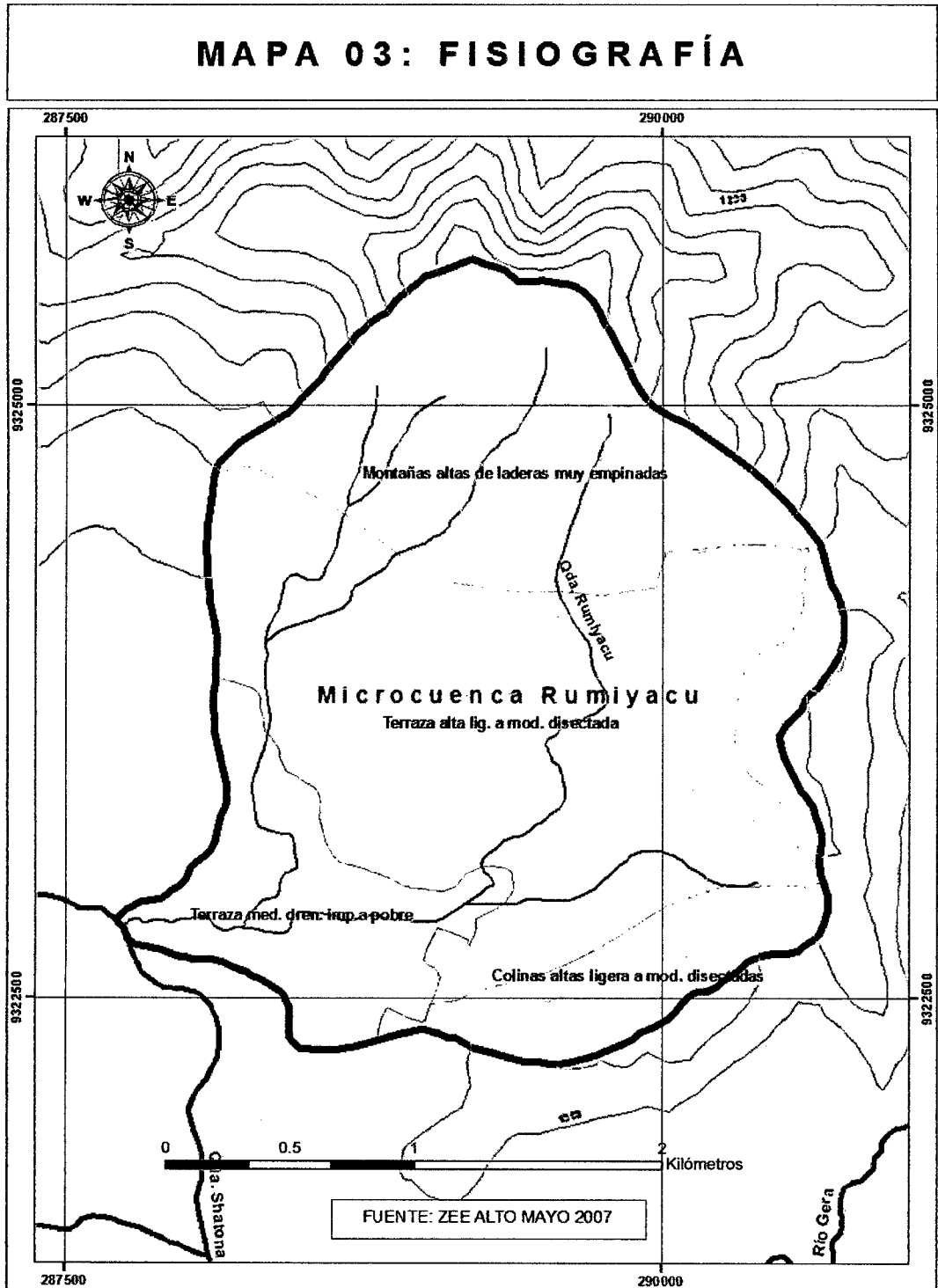
Terrazas medias de drenaje imperfecto a pobre, abarca una superficie aproximada de 98.8 ha., que representa el 14.0% del área estudiada. Constituidos por acumulación de sedimentos de diversa naturaleza, muchas veces algo cementada que descansa sobre material gravoso impidiendo la infiltración de la aguas de lluvia. También se observa en la superficie, la

presencia de un manto de materia orgánica, de espesor variable entre 20 y 30 cm.

Terrazas altas ligera a moderadamente disectadas, con una superficie aproximada de 330.2 ha equivalente a 46.8% del área total evaluada. Presenta relieve plano ondulado, con disecciones originado por pequeños cauces de agua.

Colinas altas ligera a moderadamente disectadas, cubren una superficie aproximada de 60.5 ha, equivalente a 8.6 % del área total de la cuenca. Está constituido por colinas que presentan cimas redondeadas con laderas largas y pendientes dominantes entre 30 y 50 %.

Montañas altas con laderas muy empinadas, cubren una superficie aproximada de 216.2 ha, equivalente a 30.6 % del área evaluada, presentan un relieve fuertemente disectado con pendientes que varían de 50 a 75%; los suelos son superficiales a muy superficiales.



Fuente: ZEE Alto Mayo 2007.

Figura 6. Mapa fisiográfico de la microcuenca Rumiyaqu.

3.2.6 Hidrografía

La quebrada Rumiyacu es la fuente principal de agua para los cultivos que se manejan bajo un sistema extensivo en las partes bajas de la microcuenca; su cauce principal posee una extensión aproximada de 4 Km. y desemboca en la quebrada Shatona.

3.3 Características morfométricas de la cuenca

Para caracterizar la morfometría de la microcuenca Rumiyacu se ha calculado una serie de índices que tienen la descripción precisa de la misma. Existen numerosos índices de cuenca, entre los que destacaron por su mayor aplicación los de compacidad (C_c ; GRAVELIUS, 1914), de forma (F ; HORTON, 1932) y de elongación (Re ; SCHUMM, 1956); según las siguientes expresiones:

$$C_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

$$Re = \frac{2\sqrt{A}}{L\sqrt{\pi}}$$

$$F = \frac{A}{L^2}$$

Donde: P es el perímetro de la cuenca, A es el área de la cuenca y L es la longitud de la principal línea de drenaje.

Cuadro 10. Parámetros morfométricos de la microcuenca Rumiyaçu.

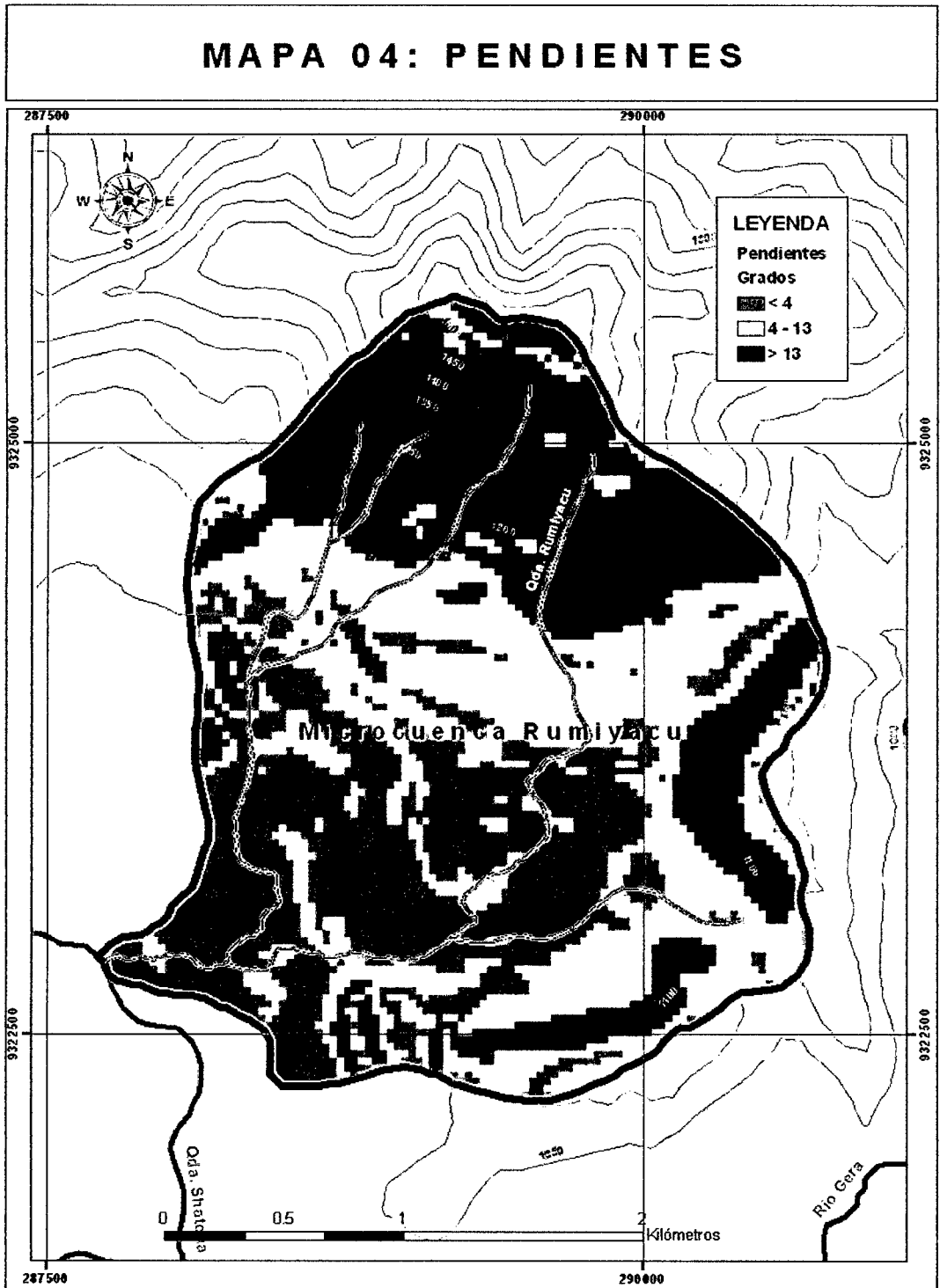
Cuenca	Elevación			Pendiente			Área	Perímetro	L	Cc	Re	F
	m.s.n.m.			% del área			Km ²	km	Km			
	min	max	media	< 4°	4° - 13°	> 13°						
Rumiyaçu	1014	1547	1281	37	32	31	7.057	10.808	4.182	1.15	0.72	0.4

Fuente: Elaboración propia.

Cc = 1.15, índice de forma que indica que la microcuenca es casi redonda a oval redonda.

Re = 0.72, indica que la microcuenca Rumiyaçu es ligeramente alargada.

F = 0.4, afirma la forma alargada que posee la cuenca en estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Mapa de pendientes de la microcuenca Rumiyaqui.

3.4 Materiales

3.4.1 Material cartográfico

- Carta Nacional de la hoja 13j a escala 1: 100 000, provista por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), en formato digital.

3.4.2 Material satelital

- Imagen Landsat 5 TM, código L5008064_06420070130.
- Modelo de elevación digital ASTER GDEM de 30 m de resolución espacial del área de estudio.
- Modelo de elevación digital SRTM de 90 m de resolución espacial del área de estudio.

3.4.3 Hardware y software

- Computadora personal (PC) Core i5.
- Programa ArcGis versión 9.3.
- Programa ENVI versión 4.6.
- Otros: Office 2010 (Word, Excel), etc.

3.4.4 Equipo y material de campo

- GPS 60x marca Garmin.
- Cámara digital de 12 MP marca Canon.

- Datos de precipitación mensual (mm) de la Estación CO – Jepelacio, CO – Moyobamba, El Triunfo y La Flor de Café.
- Resultados de análisis de suelo, realizado por el laboratorio de suelos del ICT – Tarapoto.
- Fichas de campo.
- Libreta de campo.
- Útiles de escritorio en general.

3.5 Metodología

La presente investigación se realizó en tres fases que se resumen a continuación:

La primera fase se enfocó en reconocer el área de estudio, previa coordinación con las autoridades del lugar, se recopiló toda la información básica (cartográfica, satelital, ZEE) física y digital disponible, así mismo, se evaluó los DEM adquiridos a través de un análisis estadístico para determinar el que mejor se ajusta a la topografía del terreno.

La segunda fase se concentró en determinar los parámetros requeridos en la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE), se adquirió los datos de precipitación de 04 estaciones meteorológicas ubicadas dentro y fuera de la cuenca en estudio, los cuales se analizaron y procesaron para obtener el factor R y su distribución espacial en la misma, así mismo se

muestreó y analizó los suelos de la zona para conocer sus propiedades físicas y químicas, indispensables para definir el factor K de la cuenca estudiada, el factor LS se derivó del mapa de pendientes de la microcuenca, para el cálculo del factor C se determinó el uso actual del terreno (UAT), e identificó las coberturas vegetales existentes, finalmente se asignó un valor unitario común al factor P.

En la tercera fase se analizó los datos obtenidos anteriormente y el correspondiente modelamiento USLE, para estimar la erosión potencial y actual de la microcuenca Rumiyaçu.

3.5.1 Primera fase: Reconocimiento y recopilación de información básica del área de estudio.

La investigación se realizó en la microcuenca Rumiyaçu, la cual posee aproximadamente 705.7 ha de extensión, se encuentra ubicada dentro de la jurisdicción del distrito de Jepelacio, provincia de Moyobamba, región San Martín.

Dentro de la cuenca se encuentra instalada actualmente la estación meteorológica denominada "CO – Jepelacio", la cual es administrada por el SENAMHI, así mismo, se tiene la estación "CO – Moyobamba", ubicada en la localidad del mismo nombre y administrada por el SENAMHI, las estaciones "El Triunfo" y "La Flor de Café" ambos en localidades del mismo nombre, son administradas por el Proyecto Especial Alto Mayo – PEAM.

Cuadro 11. Estaciones meteorológicas consideradas en la investigación.

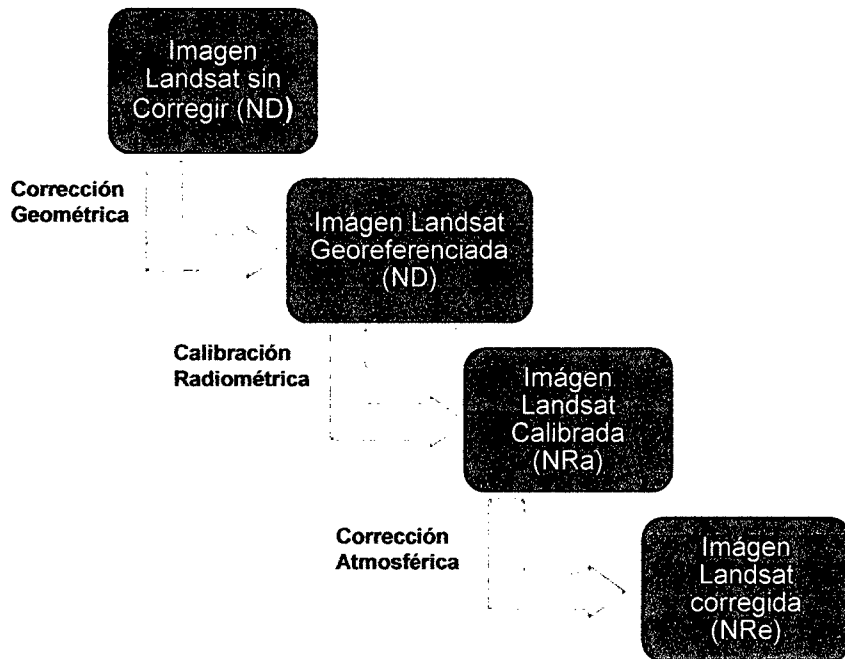
Estación Meteorológica	Ubicación		Cota (m.s.n.m.)	Precipitación (mm)	Serie Temporal
	Este	Norte			
Jepelacio SENAMHI	288879	9323978	1000	Mensual	Ene 1975 – Dic 2010
Moyobamba SENAMHI	282017	9332764	860	Mensual	Ene 1996 – Dic 2010
El Triunfo PEAM	296216	9321114	850	Mensual	Ene 1996 – Dic 2010
La Flor de Café PEAM	295571	9327786	1150	Mensual	Ene 2003 – Dic 2010

Fuente: Elaboración propia.

Parte de la localidad de Jepelacio es abarcada por la cuenca en estudio, como principal vía de acceso se tiene la carretera afirmada Moyobamba – Jepelacio, la cual atraviesa en forma transversal la totalidad de la microcuenca y continúa hasta el centro poblado de Shucshuyacu.

3.5.1.1 Adquisición y procesamiento de imagen Landsat

La imagen utilizada en el presente estudio fue obtenida de la United States Geological Survey (USGS) y fue tomada el 30 de Enero del año 2007, por el sensor Mapeador Temático (Thematic Mapper – TM) a bordo del satélite Landsat 5, el cual se encuentra en órbita desde el año 1984 y presenta una resolución espacial de 30 metros.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Proceso de Corrección de imagen Landsat 5 – TM.

Imagen Landsat sin corregir, los valores de los píxeles en las imágenes Landsat expresan la cantidad de energía radiante recibida por el sensor en la forma de valores relativos no calibrados, simplemente llamados Niveles Digitales (ND), dichos valores deben pasar por un proceso de corrección, con el fin de transformarlos a niveles físicos de radiancia y reflectancia.

Imagen Landsat 61eoreferenciada, por defecto las imágenes descargadas del USGS están georeferenciadas, pero por motivos de errores geométricos generados por el mismo sistema de sensores remotos o en combinación con la rotación de la tierra o sus características de curvatura; como es el caso de la esfericidad, rotación, ángulo de observación, tiende a

generar distorsiones en la ubicación. La información para corregirlos no siempre está disponible, por lo que es necesario tomar puntos de control y remuestrear la imagen para corregirlos.

Para el área de estudio se ha elegido georeferenciar con el uso de GPS los puntos de control (GCP, por sus siglas en inglés), tratando de abarcar la totalidad de la cuenca, las coordenadas de los GCP tomados se muestran a continuación:

Cuadro 12. Puntos de control tomados del área de estudio.

Punto (GCP)	Este	Norte
01	287927	9322838
02	288542	9324269
03	290623	9324297
04	289279	9322988
05	289150	9324884
06	290559	9322974
07	288871	9323983
08	288227	9324326
09	290094	9323775
10	288900	9324104

Fuente: Elaboración Propia.

Imagen Landsat calibrada, una vez corregida geométricamente la imagen se procedió a calibrarla radiométricamente con el fin de mejorar la precisión de las medidas de reflectancia obtenidas del sensor TM, así mismo,

se transformó los niveles digitales a niveles de radiancia, para optimizar el análisis cuantitativo de las propiedades biofísicas de los elementos de la superficie terrestre e identificar y evaluar los procesos que en ella ocurren, dicho proceso se realizó con la siguiente ecuación:

$$L\lambda = \left(\frac{LMAX\lambda - LMIN\lambda}{Qcal\ max} \right) Qcal + LMIN\lambda$$

Donde:

$L\lambda$: Radiancia espectral en la abertura del sensor en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$.

$Qcal$: Calibración del valor del pixel en niveles digitales (ND).

$Qcal\ min$: Mínima calibración del valor del pixel (ND = 0) correspondiente a $LMIN\lambda$.

$Qcal\ max$: Máxima calibración del valor del pixel (ND = 255) correspondiente a $LMAX\lambda$.

$LMIN\lambda$: Radiancia espectral escalada a $Qcal\ min$ en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$.

$LMAX\lambda$: Radiancia espectral escalada a $Qcal\ max$ en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$.

Dicha ecuación se simplificó al definirla como:

$$L\lambda = Grescale \times Qcal + Brescale$$

Donde:

$$Grescale = \left(\frac{LMAX\lambda - LMIN\lambda}{Qcalmax} \right)$$

$$Brescale = LMIN\lambda$$

Los datos requeridos en las ecuaciones anteriores se obtuvieron del siguiente cuadro:

Cuadro 13. Radiancias espectrales para calibración de imágenes Landsat 5.

Radiancias espectrales en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$				
Procesamiento de datos	después del 5 de Mayo del 2003			
Bandas	LMIN	LMAX	Grescale	Brescale
1	-1.52	193.000	0.762824	-1.52
2	-2.84	365.000	1.442510	-2.84
3	-1.17	264.000	1.039880	-1.17
4	-1.51	221.000	0.872588	-1.51
5	-0.37	30.200	0.119882	-0.37
6	1.2378	15.303	0.055158	1.2378
7	-0.15	1225.000	0.065294	-0.15

Fuente: CHANDAR y MARKHAM (2003).

Imagen Landsat corregida, una vez calibrada la imagen se procedió a corregirla atmosféricamente para transformar los niveles de radiancia a niveles de reflectancia, y relacionar la energía incidente y la reflejada. El resultado obtenido no posee unidades al ser un cociente de irradiancias, y se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$\rho_p = \frac{\Pi \cdot L\lambda \cdot d^2}{ESUN \cdot \cos\theta}$$

Donde:

ρ_p : Reflectancia planetaria adimensional.

$L\lambda$: Radiancia espectral en la abertura del sensor en $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$.

d : Distancia tierra – sol en unidades astronómicas.

ESUN : Irradiancia solar exoatmosférica media.

\emptyset : Ángulo cenital solar en grados.

Los datos requeridos en las ecuaciones descritas, se obtuvieron de los siguientes cuadros:

Cuadro 14. Unidad ESUN para corrección atmosférica de imágenes Landsat 5.

Unidades ESUN W/(m ² . um)		
Bandas	Landsat 4	Landsat 5
1	1957	1957
2	1825	1826
3	1557	1554
4	1033	1036
5	214.9	215
7	80.72	80.67

Fuente: CHANDAR y MARKHAM (2003)

Cuadro 15. Distancia Tierra – Sol en unidades astronómicas.

DOY	Distancia	DOY	Distancia	DOY	Distancia
1	0.9832	121	1.0076	242	1.0092
15	0.9836	135	1.0109	258	1.0057
32	0.9853	152	1.014	274	1.0011
46	0.9878	166	1.0158	288	0.9972
60	0.9909	182	0.0167	305	0.9925
74	0.9945	196	0.0165	319	0.9892
91	0.9993	213	0.0149	335	0.986
106	1.0033	227	0.0128	349	0.9843
DOY - Día del Año (Día Juliano)				365	0.9833

Fuente: CHANDAR y MARKHAM (2003).

3.5.1.2 Adquisición y comparación de los DEM ASTER y SRTM

La hoja N° 13j de la carta nacional provista por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en su formato digital presenta datos insuficientes en el área de estudio, dificultando el análisis del terreno, debido a ello se recurrió a información geoespacial diversa como los modelos de elevación digital.

Los modelos generalmente utilizados son los DEM ASTER (generado a partir de datos estereoscópicos, 30 metros de resolución espacial) y los DEM SRTM (obtenido mediante la técnica InSAR, de 90 metros de resolución espacial).

Se evaluó ambos modelos para determinar su calidad, a través de un análisis estadístico de los residuales altimétricos calculados a partir de los diferentes DEM (ASTER y SRTM) y las cotas de la hoja N° 13j de las cartas nacionales. Para el tratamiento y análisis de los datos se aplicó herramientas SIG bajo ArcGIS 9.3.

La metodología empleada para la evaluación de los DEM a través de datos altimétricos fue la siguiente (SUÁREZ H.*et al.*, 2009):

- Recolección de datos (DEM y cotas).
- Adecuación de datos.
- Cálculo de residuales altimétricos en cada DEM.

- Depuración de residuales altimétricos de cada grupo.
- Análisis estadístico para cada grupo de residuales altimétricos depurados.
- Análisis e interpretación de resultados.

Se recopiló un conjunto de datos geodésicos con información altimétrica (cotas) de la hoja N° 13j de la carta nacional del IGN. Para el estudio se contó con 87 cotas (calidad altimétrica ± 1.0 m).

A continuación se presenta una tabla descriptiva de los datos utilizados en la zona de estudio en función de la cantidad de cotas, calidad, espaciamiento promedio entre cotas y su densidad por área.

Cuadro 16. Características básicas de cotas de la Hoja 13j.

Hoja	Fuente	Cantidad	RMS (m)	Espaciamiento (km)	Densidad (cotas/km ²)
13j	IGN	87	± 1.0	2.6	0.2

Fuente: Elaboración propia.

Se calculó residuales altimétricos para cada DEM (ASTER y SRTM) a partir de los datos geodésicos. La ecuación utilizada para el cálculo de los residuales altimétricos se muestra a continuación:

$$\Delta = HDEM - H_{\text{Datos}}$$

Donde:

Δ : Residual altimétrico en el vértice X, Y.

HDEM: Altura media del DEM en el píxel que comprende al vértice X, Y.

HDatos: Altura de la cota ubicada en el vértice X, Y.

El cálculo del error medio cuadrático (RMS, por sus siglas en inglés), se describe a continuación:

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\Delta)^2}{N}}$$

Donde:

RMS : Error medio cuadrático.

Δ : Residual altimétrico.

N : Número de datos analizados.

A continuación se presenta la tabla del resumen estadístico resultante del cálculo de residuales altimétricos a partir de las cotas de la hoja N° 13j y los DEM.

Cuadro 17. Resumen estadístico de residuales altimétricos calculados.

Hoja	N° datos	DEM	Promedio (m)	Desv. esta. (m)	RMS (m)	Máx.	Min.
13j	87	ASTER	-24.5	28.23	± 32.41	80	-129
		SRTM	-11.0	21.79	± 28.44	54	-76

Fuente: Elaboración propia.

- En la hoja N° 13j se observó que los menores residuales altimétricos fueron reportados por el SRTM y eso se refleja en los diferentes indicadores estadísticos.

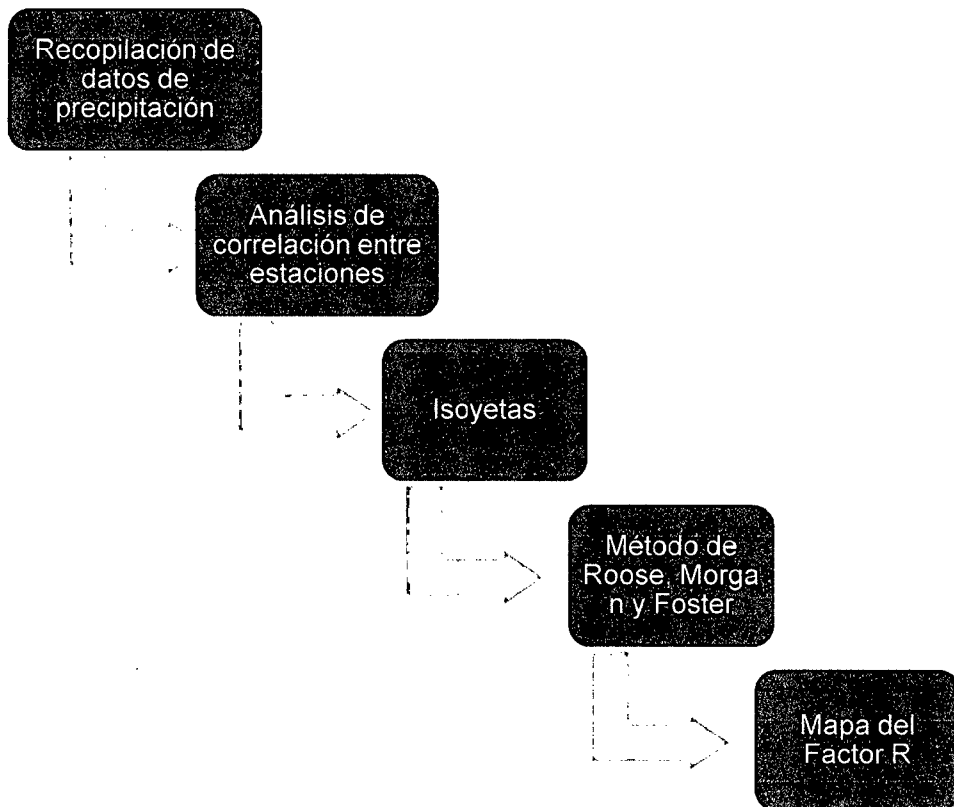
- Los máximos residuales altimétricos se detectó en el ASTER donde su RMS es $\pm 32.41\text{m}$.

- Para el 95% de los datos analizados se observó que los residuales altimétricos se ubican en un rango de ± 12 metros para ASTER y un rango de ± 9 metros para el SRTM.

- En esta prueba se observó que el SRTM es el DEM de mejor calidad.

3.5.2 Segunda fase: Determinación de factores del USLE

3.5.2.1 Determinación del factor R



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Proceso de determinación del factor R.

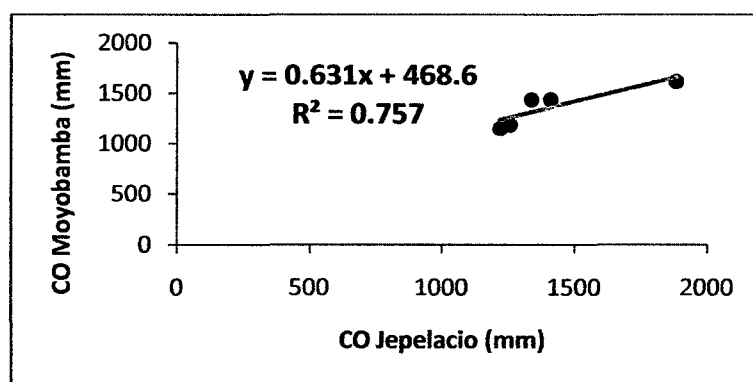
Recopilación de datos de precipitación, se recopiló información de precipitación en mm/mes de 04 estaciones meteorológicas ubicadas dentro y fuera del área de estudio, desde Enero del 2006 a Diciembre del 2010, se trabajó con los promedios anuales de cada estación como se muestra en el cuadro siguiente:

Cuadro 18. Datos de precipitación en mm año⁻¹ de estaciones meteorológicas estudiadas.

Año	Estaciones			
	CO – Moyobamba	CO – Jepelacio	El triunfo	La Flor de Café
2006	1437.5	1337.6	991	1576.9
2007	1617.1	1882.9	1222.9	1984.6
2008	1186.7	1257.1	1138.6	1641.6
2009	1438.5	1409.7	1021	1964.3
2010	1151.4	1219.2	1189	1748.7
Promedio	1366.24	1421.3	1112.5	1783.22

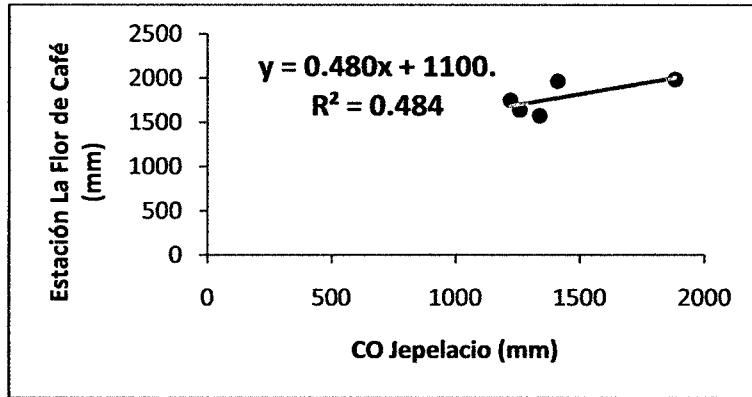
Fuente: Elaboración propia.

Análisis de correlación entre las estaciones, se sometieron los datos de precipitación a un análisis de correlación (coeficiente R^2) tomando como base la estación CO – Jepelacio, encontrándose una buena correlación con la estación CO – Moyobamba ($R^2 = 0.76$), por otro lado, existe una correlación media con la estación La Flor de Café ($R^2 = 0.48$), y baja con la estación El Triunfo ($R^2 = 0.15$).



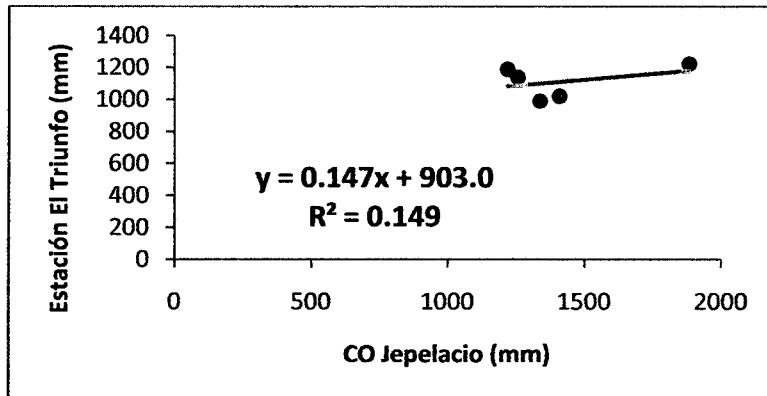
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Correlación entre CO – Jepelacio y CO – Moyobamba.



Fuente: Elaboración propia.

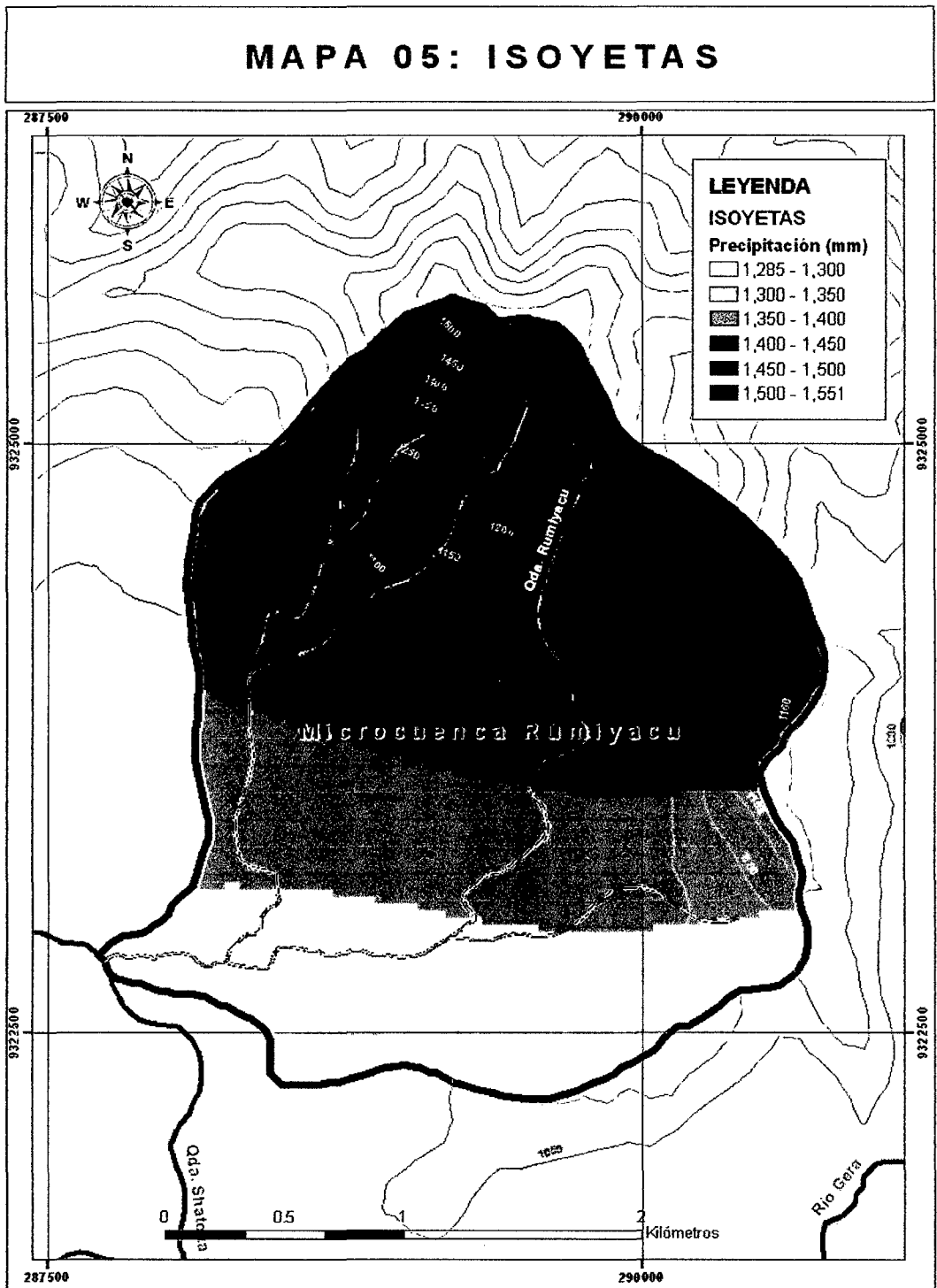
Figura 11. Correlación entre CO – Jepelacio y E. La Flor de Café.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Correlación entre CO – Jepelacio y E. El Triunfo.

Elaboración del mapa de isoyetas, para conocer la precipitación promedio de la cuenca y su distribución espacial, se elaboró el mapa de isoyetas, a través de la herramienta "Spline" del ArcGis 9.3.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 13. Mapa de isoyetas de la microcuenca Rumiyaqu.

Cuadro 19. Distribución espacial de la precipitación en la microcuenca Rumiyacu.

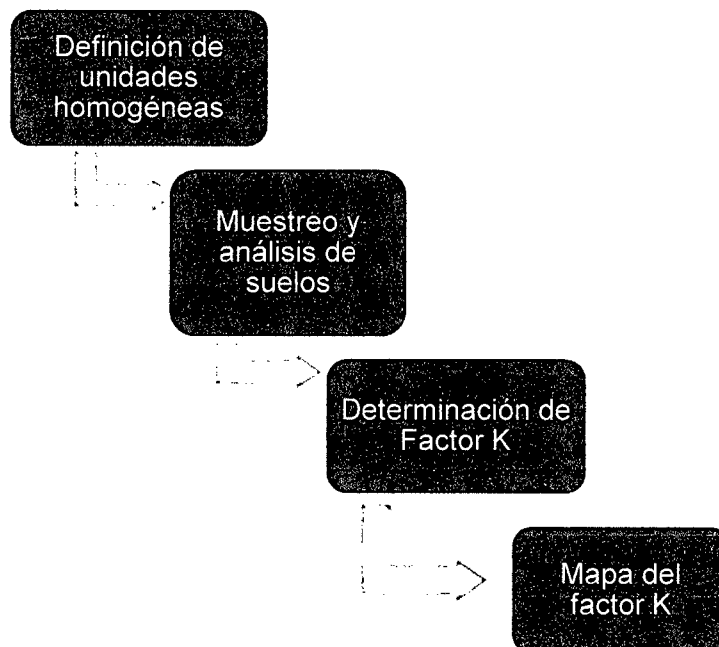
Rango de precipitación (mm)		Isoyetas promedio (mm)	Área (ha)	Área (%)
1285	1300	1292.5	21.15	3.00
1300	1350	1325	144.00	20.41
1350	1400	1375	153.63	21.77
1400	1450	1425	167.04	23.67
1450	1500	1475	145.88	20.67
1500	1551	1525.5	74.00	10.49
TOTAL			705.70	100

Fuente: Elaboración propia.

La precipitación promedio de la microcuenca Rumiyacu por el método de las isoyetas es de $1410.5 \text{ mm año}^{-1}$.

Método de Roose, Morgan y Foster, a las precipitaciones promedio calculadas se les aplicó las ecuaciones de Roose, Morgan y Foster, para determinar los valores del factor R de la microcuenca Rumiyacu.

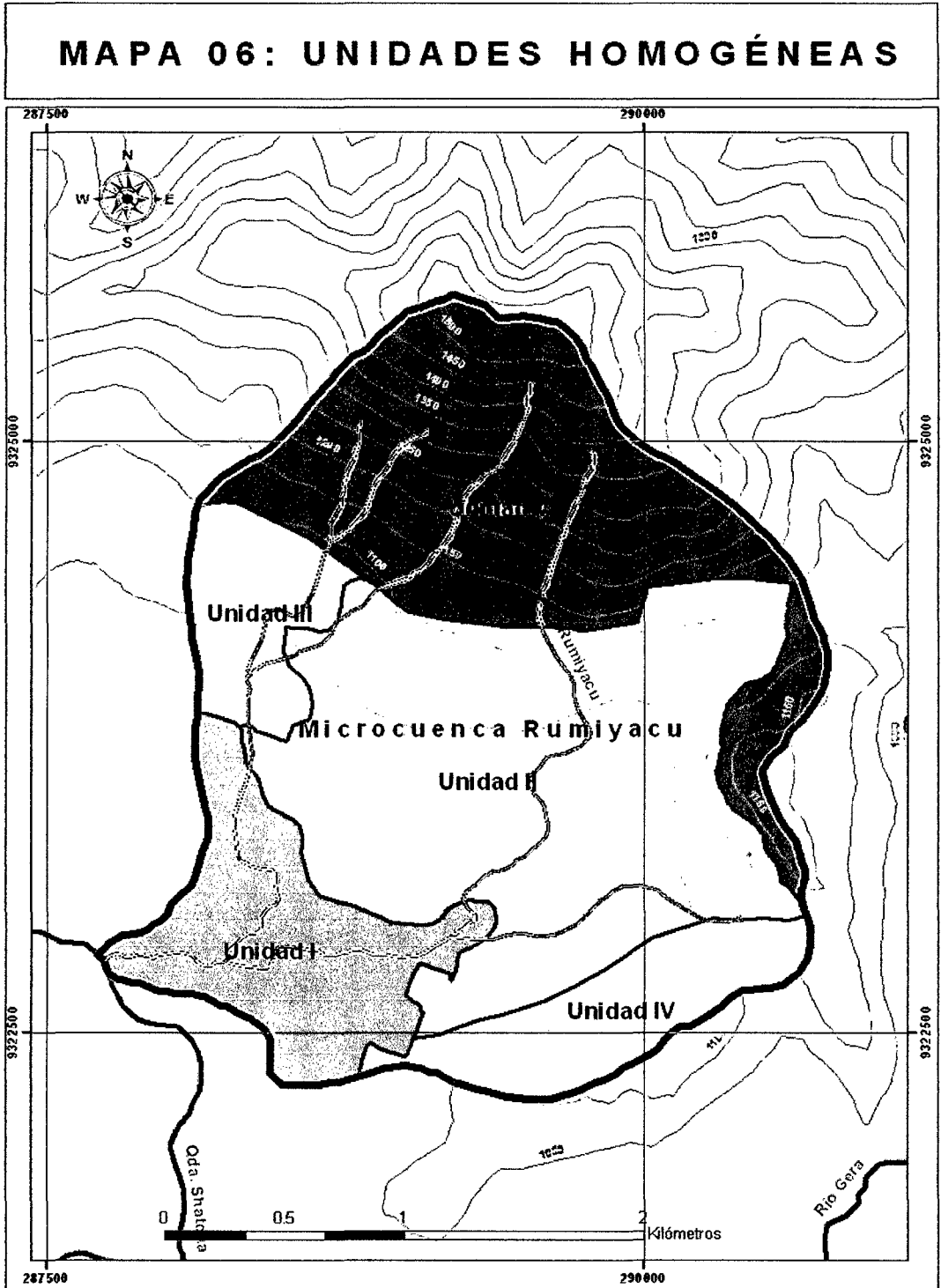
3.5.2.2 Determinación de factor K



Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. Proceso de determinación del factor K.

Definición de unidades homogéneas, se definieron áreas homogéneas tomando como base características de relieve, pendiente y altitud, extraídas del modelo digital de elevaciones – DEM.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Mapa de unidades homogéneas de la microcuenca Rumiayacu.

Al interactuar estos tres factores geográficos, y procesar los datos en el programa ArcGis 9.3, se determinaron 5 unidades geográficamente homogéneas, cuyas características se detallan a continuación.

Cuadro 20. Características de unidades homogéneas.

Unidad	Área (ha)	Área (%)	Altitud Promedio (m.s.n.m.)	Relieve	Pendiente Promedio (Grados)
I	98.8	14.00	975	Plano	2
II	283.8	40.22	990	Semiplano	4
III	46.4	6.58	1000	Semiplano	7
IV	60.5	8.57	1100	Ondulado	9
V	216.2	30.64	1300	Accidentado	20
TOTAL	705.7	100.00

Fuente: Elaboración propia.

Muestreo y análisis de suelos. Se muestrearon los suelos de las 05 unidades definidas en el paso anterior, a través del método zig – zag, obteniéndose en promedio 20 sub – muestras por cada unidad, las cuales se homogenizaron para obtener una muestra compuesta, la misma que fue secada bajo sombra y enviada al laboratorio de análisis de suelos del Instituto de Cultivos Tropicales – Tarapoto; cuyos resultados se muestran a continuación:

Cuadro 21. Resultados de análisis de suelos.

pH	C.E dS/m	CaCO ₃ (%)	M.O (%)	N (%)	P (ppm)	K (ppm)	ANÁLISIS MECÁNICO			CLASE TEXTURAL	CIC	CATIONES CAMBIABLES					Suma de Bases	% Sat. de bases
							Arena	Limo	Arcilla			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ + H ⁺		
							%			meq/100								
I	4.64	0.05	0.00	3.98	0.18	10.59	37	28.24	34.00	37.76	Fra-Arc	7.13	0.40	0.22	0.09	6.41	0.72	10.05
II	4.52	0.04	0.00	3.40	0.15	8.34	43	34.24	24.00	41.76	Arc	6.30	0.13	0.16	0.11	5.90	0.40	6.36
III	4.32	0.10	0.00	2.32	0.10	32.50	59	23.16	25.64	51.20	Arc	2.01	1.06	0.18	0.15	0.61	1.39	69.55
IV	4.34	0.07	0.00	2.37	0.11	4.53	52	23.16	15.64	61.20	Arc	10.89	0.90	0.49	0.13	9.36	1.53	14.05
V	4.30	0.07	0.00	5.44	0.24	5.45	51	40.24	22.00	37.76	Fra-Arc	7.84	0.02	0.16	0.13	7.53	0.31	3.91

Fuente: Instituto de Cultivos Tropicales.

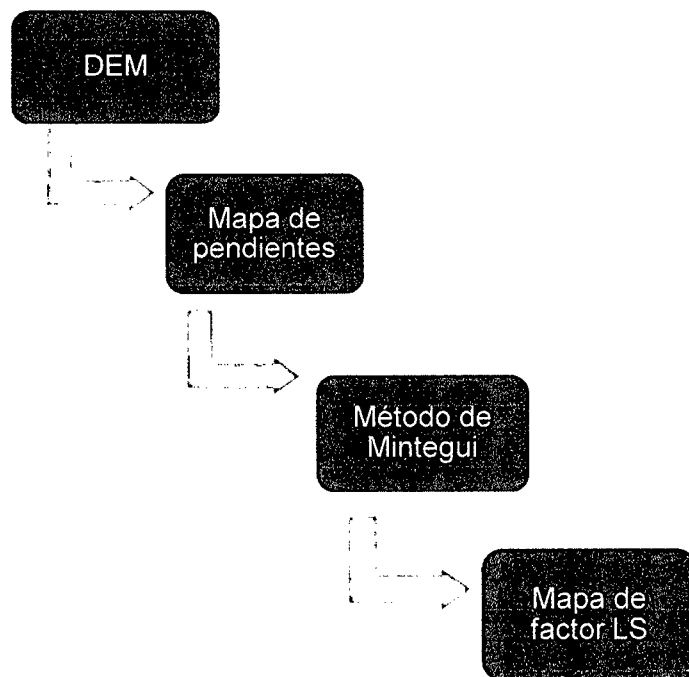
Determinación del factor K, para definir el factor K ($t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$) se empleó la ecuación propuesta por WISCHMEIER (1971), se necesitó contar con los siguientes datos extraídos del análisis de suelos:

Cuadro 22. Datos de suelo necesarios para estimar el factor K.

Unidad	Li (%)	Arena (%)	M.O. (%)	Estructura (Tipo)	Permeabilidad (Tipo)
I	34	28.24	3.98	2	4
II	24	34.24	3.4	1	6
III	25.64	23.16	2.32	1	6
IV	15.64	23.16	2.37	1	6
V	22	40.24	5.44	2	4

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2.3 Determinación de factor LS



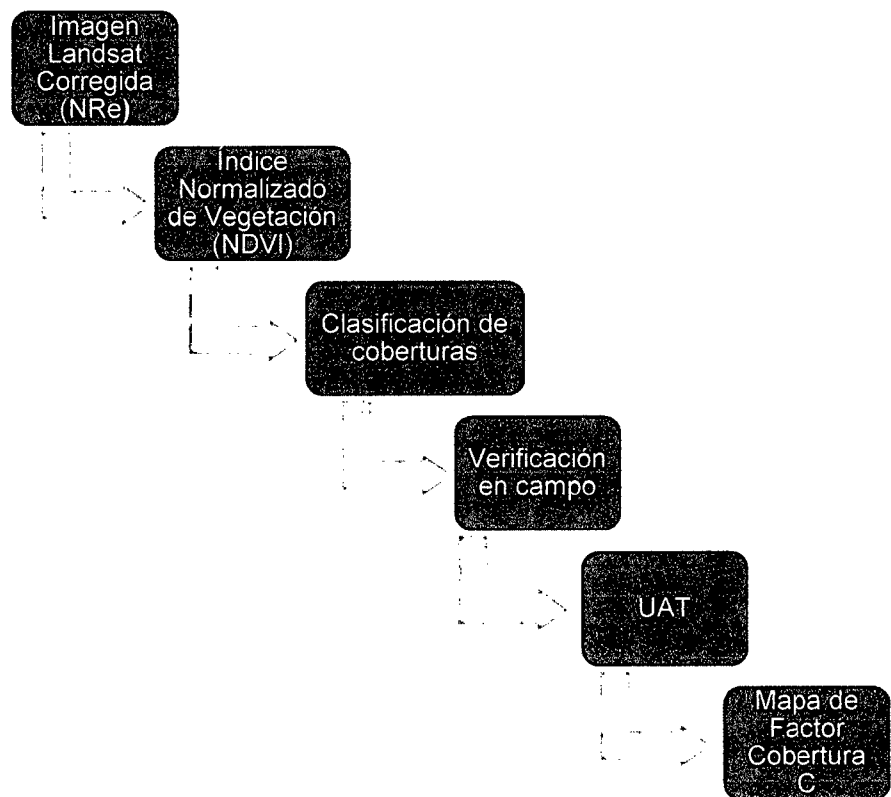
Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Proceso de determinación del factor LS.

Mapa de pendientes, Se elaboró el mapa de pendientes en porcentaje, derivado del DEM, según los rangos propuestos por la Facultad de Hidráulica e Hidrología ETSIM (Madrid).

Método de MINTEGUI (1988), Se calculó el factor LS directamente a partir del mapa digital de pendientes, basados en la relación propuesta por la Facultad de Hidráulica e Hidrología ETSIM (Madrid). Dicha relación fue convertida a expresiones algebraicas, mediante regresión lineal, con el propósito de disponer de una función continua aplicable a cada pixel de la cobertura raster sobre la pendiente del terreno: $LS = 0.009 (p)^2 + 0.0798 (p)$, para pendientes menores o iguales a 30%, y $LS = 0.2558 (p) + 3.248$, para pendientes mayores; ecuaciones obtenidas con coeficientes R^2 de 0.997 y 0.996 respectivamente.

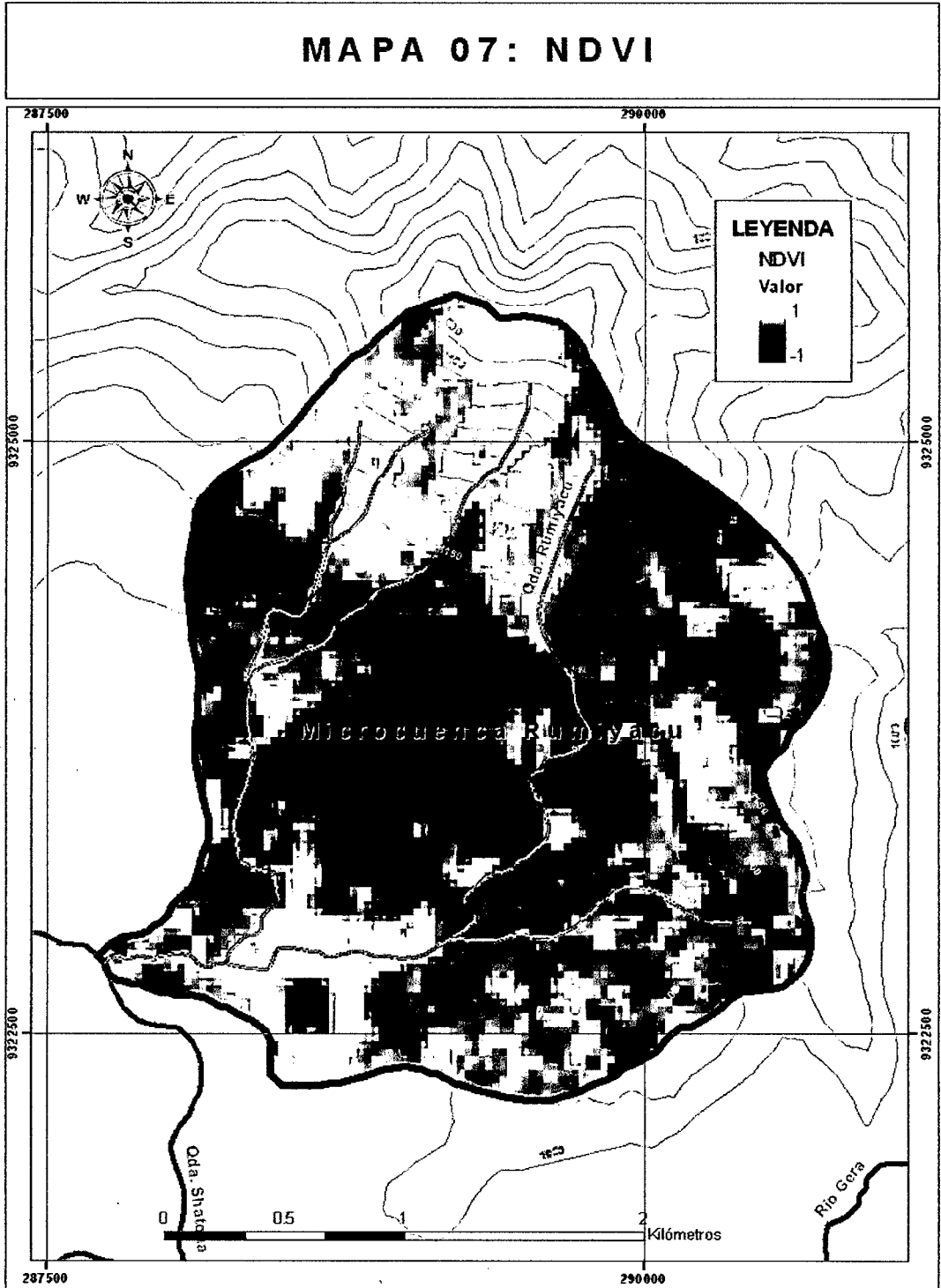
3.5.2.4 Determinación de factor C.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Proceso de determinación del factor C.

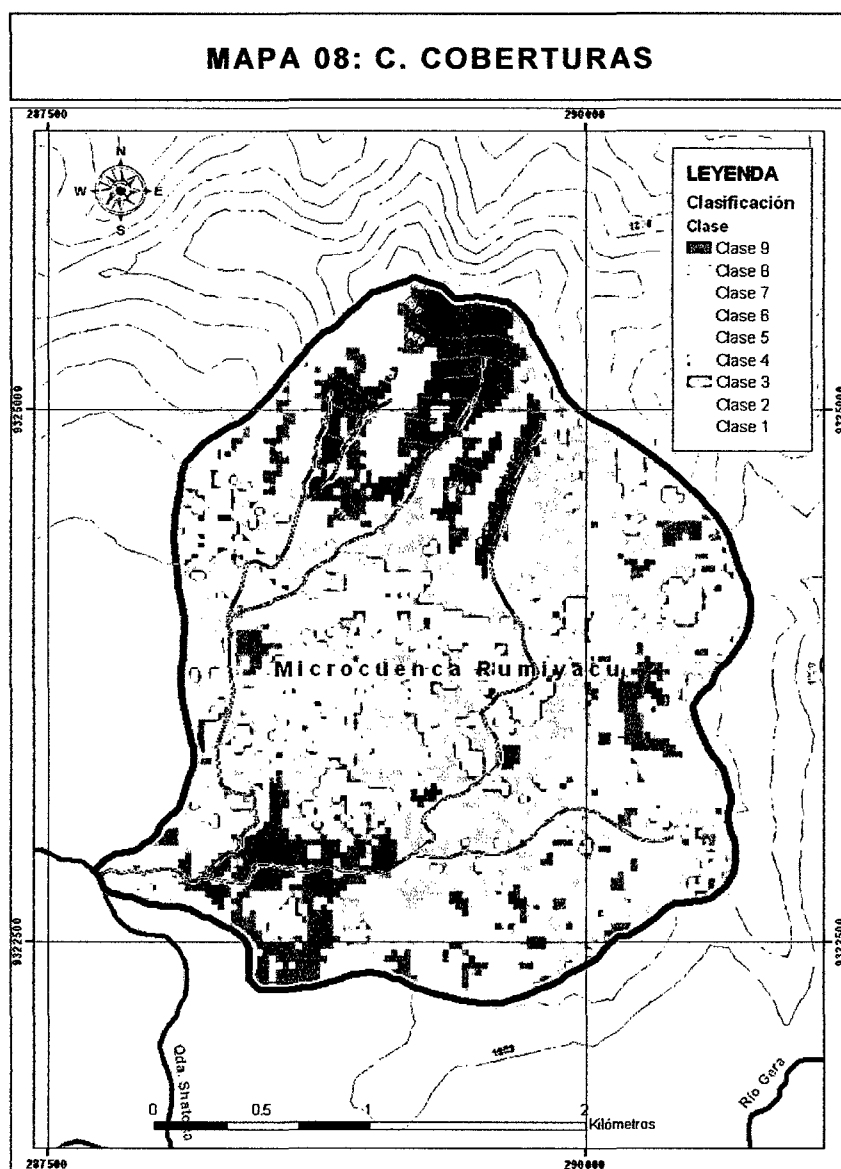
Índice Normalizado de Vegetación, el NDVI se aplicó a la imagen Landsat corregida, a través del programa ENVI 4.6, diferenciándose las coberturas de suelo del área de estudio, según la vigorosidad de la misma. Técnicamente se obtuvieron valores de coberturas que se encuentran entre el intervalo de -1 a +1, dónde aquellos valores cercanos a la unidad positiva pertenecen a vegetación sana, así mismo se desprecia como cobertura vegetal a aquellos valores cercanos a la unidad negativa.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Mapa de índice de vegetación normalizada (NDVI).

Clasificación de coberturas, una vez aplicado el NDVI, se procedió a la delimitación de 09 coberturas homogéneas a través del K- means del método no supervisado en el ENVI 4.6; los cuales en contraste con la imagen Landsat nos permite clasificar de manera previa las diferentes cubiertas del suelo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Mapa de clasificación de coberturas.

Verificación en campo, se recorrieron los distintos lugares de la microcuenca Rumiyacu provistos de un GPS y el mapa de clasificación de coberturas para la verificación y corrección de los límites de las diferentes cobiertas del suelo, así mismo, se las clasificó según su uso actual.

Uso actual de tierras, contrastando la información de gabinete y campo se procedió a elaborar el mapa de Uso Actual de Tierras de la microcuenca Rumiyacu, encontrándose 09 tipos de coberturas vegetales.

3.5.2.5 Determinación de factor P

Se asumió un valor del factor P igual a 1, al considerarse que en las zonas agrícolas de la microcuenca Rumiyacu no se aplica ninguna práctica de conservación de suelos.

3.5.3 Tercera fase: Modelización de factores del USLE

3.5.3.1 Determinación de la pérdida potencial de suelos

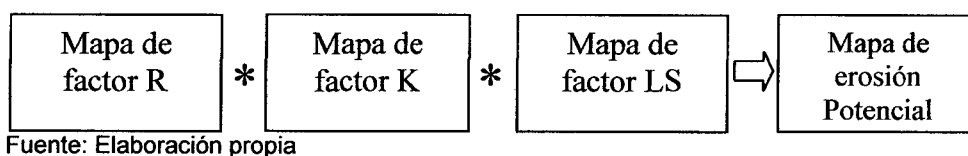


Figura 20. Proceso de determinación de pérdida potencial de suelos.

Con los mapas de los factores R, K y LS en formato raster de 30 m de resolución; se procedió a aplicar la ecuación USLE (WISCHMEIER y SMITH, 1978), obteniéndose así el mapa con los valores de la tasa de pérdida potencial de suelos "A" en $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$.

3.5.3.2 Determinación de la pérdida actual de suelos



Figura 21. Proceso de determinación de pérdida actual de suelos.

Con los mapas de los factores R, K, LS y C en formato raster de 30m de resolución; se procedió a aplicar la ecuación USLE (WISCHMEIER y SMITH, 1978), obteniéndose así el mapa con los valores de la tasa de pérdida actual de suelos "A" en $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$.

3.5.3.3 Tolerancia a la pérdida de suelos

Para conocer los niveles de pérdida de suelos, se consideró el siguiente cuadro, que deriva de el límite de erosión aceptado internacionalmente como admisible, el cual oscila en torno a las $10 - 12\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$.

Cuadro 23. Niveles de erosión.

NIVELES	INTERVALOS
Erosión baja	$A < 5$ t/ha/año
Erosión moderada	$A = 5 - 25$ t/ha/año
Erosión media	$A = 25 - 50$ t/ha/año
Erosión alta	$A = 50 - 100$ t/ha/año
Erosión muy alta	$A = 100 - 200$ t/ha/año
Erosión crítica	$A > 200$ t/ha/año

Fuente: Ramos (2001).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Erosividad de las precipitaciones (factor R)

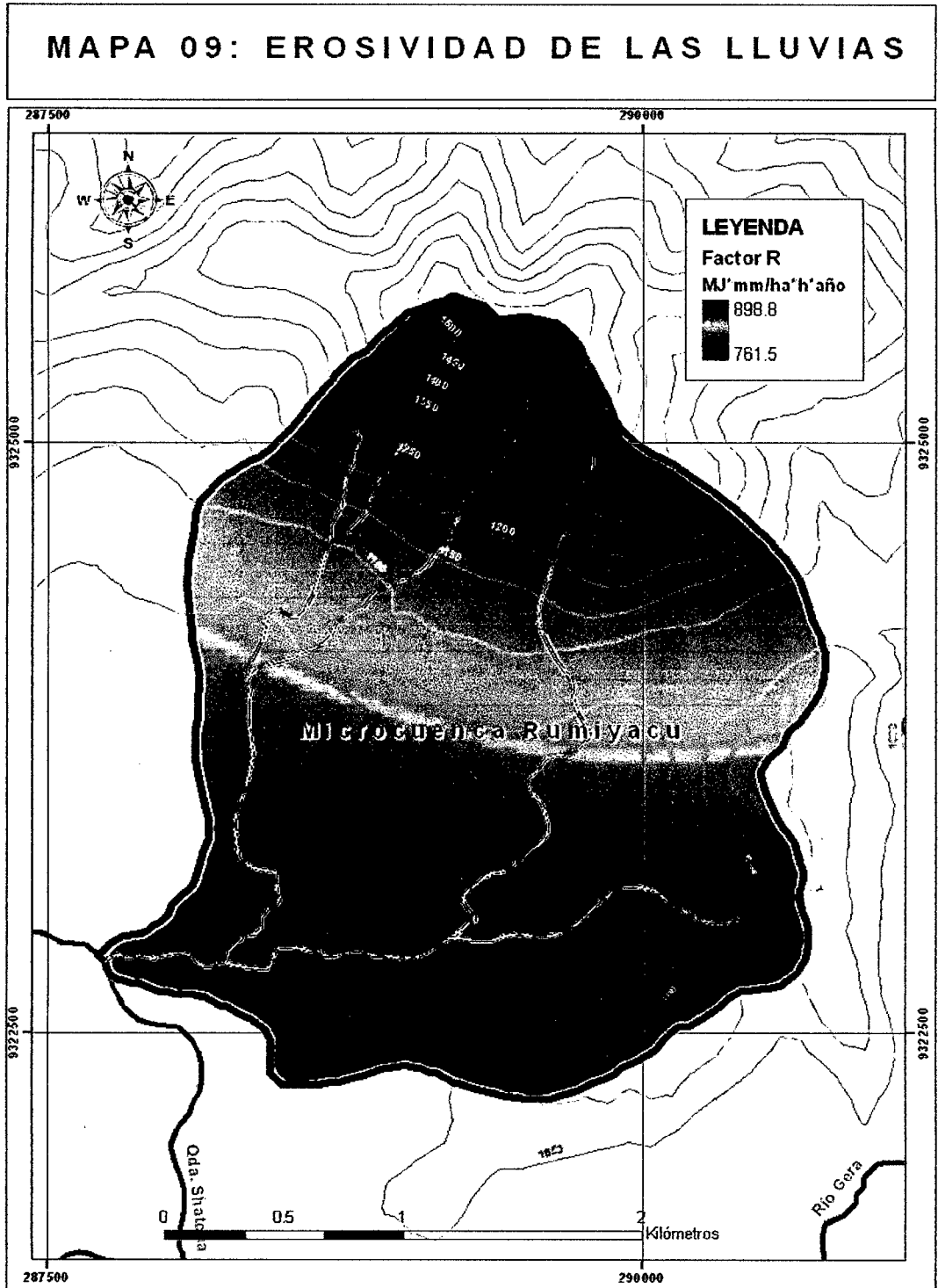
Roose, Morgan y Foster

Con los registros de precipitación acumulada mensual y anual del período 2006 al 2010, se calculó los valores de R para la microcuenca Rumiyaçu, a través del promedio de los valores obtenidos de las ecuaciones propuestas por ROOSE (1995), MORGAN (1997) y FOSTER (1981).

Cuadro 24. Erosividad de las precipitaciones en la microcuenca Rumiyaçu.

Rango de Precipitación (mm)	Promedio (mm)	R – Roose R – Morgan R- Foster			R Promedio
		(MJmm ha ⁻¹ h ⁻¹ año ⁻¹)			
1285 - 1300	1292.5	1118.01	898.95	267.55	761.50
1300 - 1350	1325	1146.13	921.57	274.28	780.66
1350 - 1400	1375	1189.38	956.37	284.63	810.12
1400 - 1450	1425	1232.63	991.17	294.98	839.59
1450 - 1500	1475	1275.88	1025.97	305.33	869.06
1500 - 1551	1525.5	1319.56	1061.12	315.78	898.82

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. Mapa de erosividad de las lluvias en la microcuenca Rumiyaque.

Se observa que el índice de erosividad o factor R, oscila entre 761.5 - 898.8 MJ mm ha⁻¹h⁻¹año⁻¹ para la microcuenca en estudio, los valores más elevados obedecen a las zonas de mayor altitud, y por ende mayor precipitación.

Los valores de R más elevados son los calculados por el método de ROOSE (1995), variando conforme la precipitación aumenta de 1118.01 a 1319.56 MJ mm ha⁻¹h⁻¹año⁻¹, esta diferencia con los otros métodos, se debe a que la ecuación considera a la erosividad como la mitad de la precipitación anual promedio multiplicada por un factor de conversión (MORGAN, 1997).

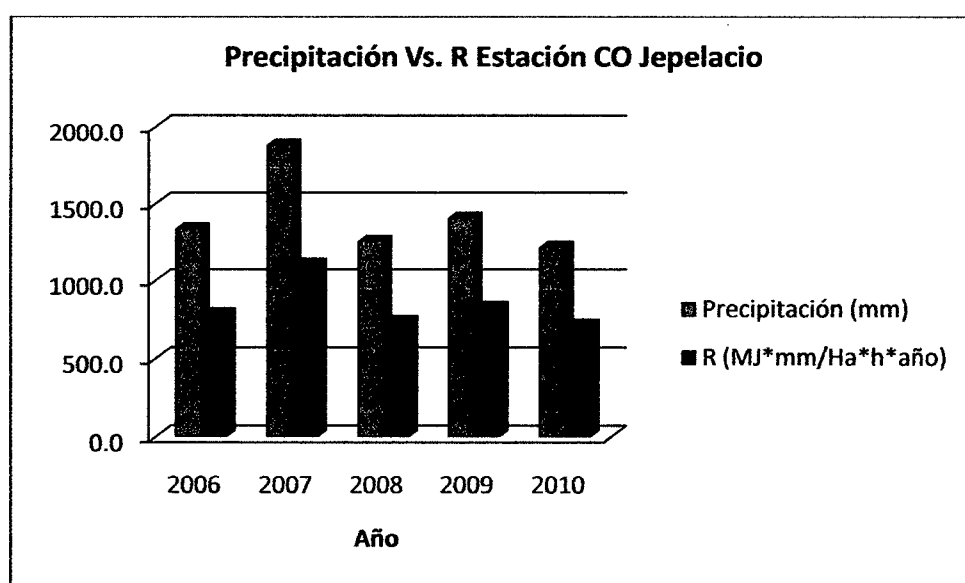
Por el contrario, los índices de erosividad obtenidos con las ecuaciones de Morgan y Foster, oscilan entre 898.95 – 1061.12 MJ mm ha⁻¹h⁻¹año⁻¹ y 267.55 – 315.78 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ respectivamente. Los valores bajos del factor R, en ambos métodos, se deben a que dichas ecuaciones no sólo emplean la precipitación promedio anual sino también el índice I₃₀ (intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos), con una cifra constante de 75 mm/h, que es el reconocido por WISCHMEIER Y SMITH (1978) como el mejor valor para zonas tropicales y de alta precipitación.

LÓPEZ (2007) afirma que en aquellos casos en los que no se dispone de registros de precipitación cada 15 ó 30 minutos, el factor R puede ser estimado mediante el análisis de los valores diarios o mensuales de precipitación, coincidiendo con el presente estudio e investigaciones llevadas a

cabo por LOUREIRO y COUTINHO (2001) en el Algarve (Sur de Portugal) al calcular el índice de erosividad R con datos de precipitación mensuales ($R^2 = 0.89$).

Así mismo, DIODATO (2004) estimó para el centro de Italia, el factor de erosividad de la lluvia y de la escorrentía a partir de tres variables anuales: precipitación, precipitación diaria máxima y precipitación horaria máxima, obteniendo un resultado fiable ($R^2 = 0.87$) y MIKOS *et al.* (2006) encontraron una relación eficiente ($R^2 = 0.87$) para estimar el factor R a partir de valores de precipitación diaria registrados en Eslovenia.

El valor promedio del factor R en la estación CO – Jepelacio, para el periodo analizado ha sido de $837.41 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con un rango de $718.31 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en 2010 a $1109.45 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en 2007.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 23. Relación entre la precipitación y el factor R en la E. CO – Jepelacio.

Estudios realizados por LÓPEZ (2007) señala que existe una baja correlación entre los valores de precipitación y erosividad (R calculado considerando I_{30}), por la fuerte variabilidad de la erosividad de las tormentas en función de la precipitación total registrada.

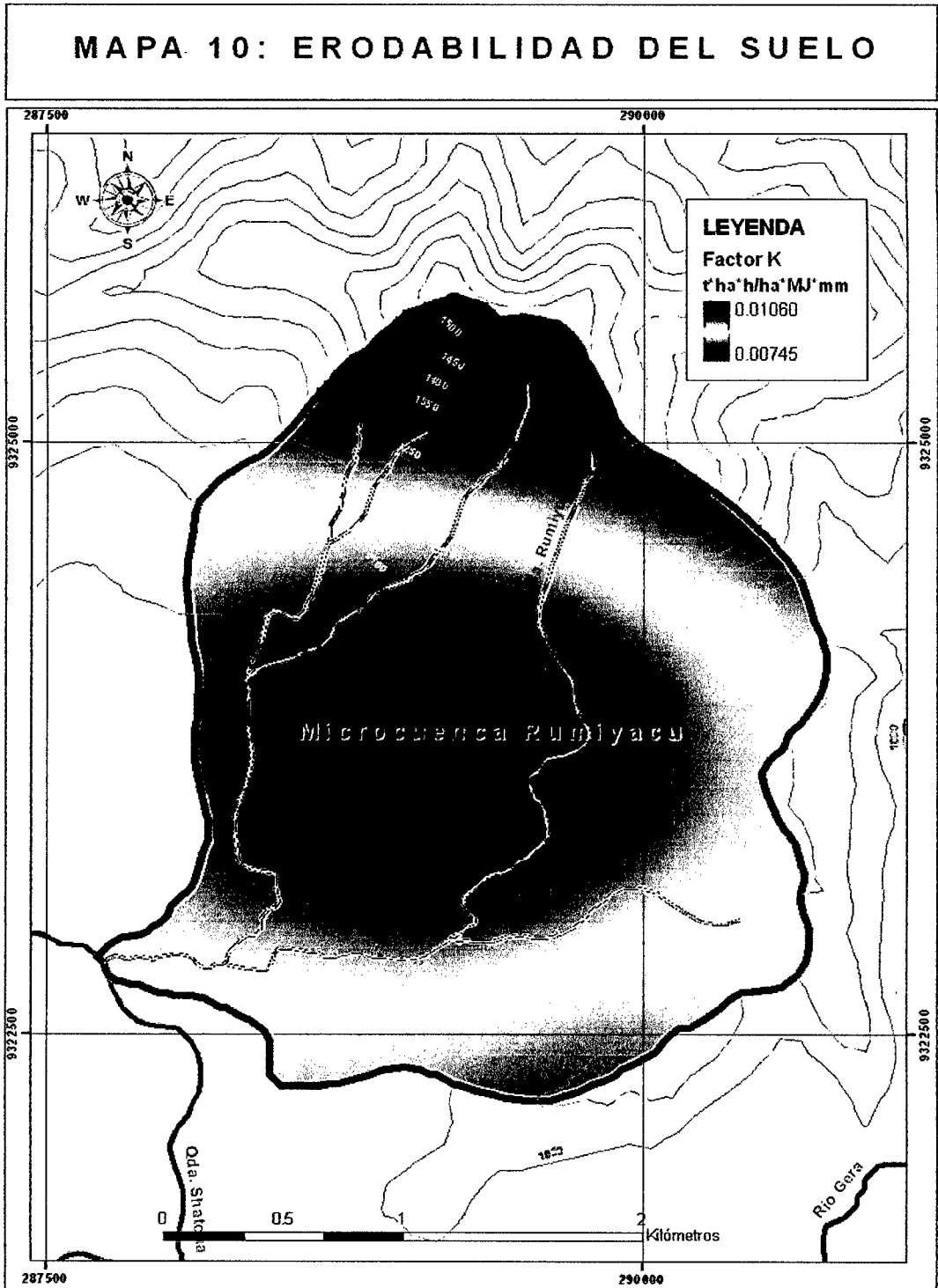
4.2 Índice de erodabilidad del suelo (factor K)

Para determinar los valores de erodabilidad del suelo (factor K) se utilizó la ecuación propuesta por WISCHMEIER Y SMITH (1978) el cual se basa en 4 parámetros: estructura, permeabilidad, textura y materia orgánica, dichos datos se obtuvieron después de muestrear los suelos de 05 unidades geográficamente homogéneas y adquirir los resultados del análisis, llevados a cabo en el laboratorio de suelos del Instituto de Cultivos Tropicales - Tarapoto.

Cuadro 25. Erodabilidad del suelo de la microcuenca Rumiayacu.

Und.	Li (%)	Arena (%)	M.O. (%)	Est. (Tipo)	Perm. (Tipo)	M (%)	K ($t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$)
I	34.00	28.24	3.98	2	4	960.2	0.00886
II	24.00	34.24	3.40	1	6	821.8	0.01060
III	25.64	23.16	2.32	1	6	593.8	0.00948
IV	15.64	23.16	2.37	1	6	362.2	0.00780
V	22.00	40.24	5.44	2	4	885.3	0.00745

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 24. Mapa de erodabilidad del suelo en la microcuenca Rumiyacu.

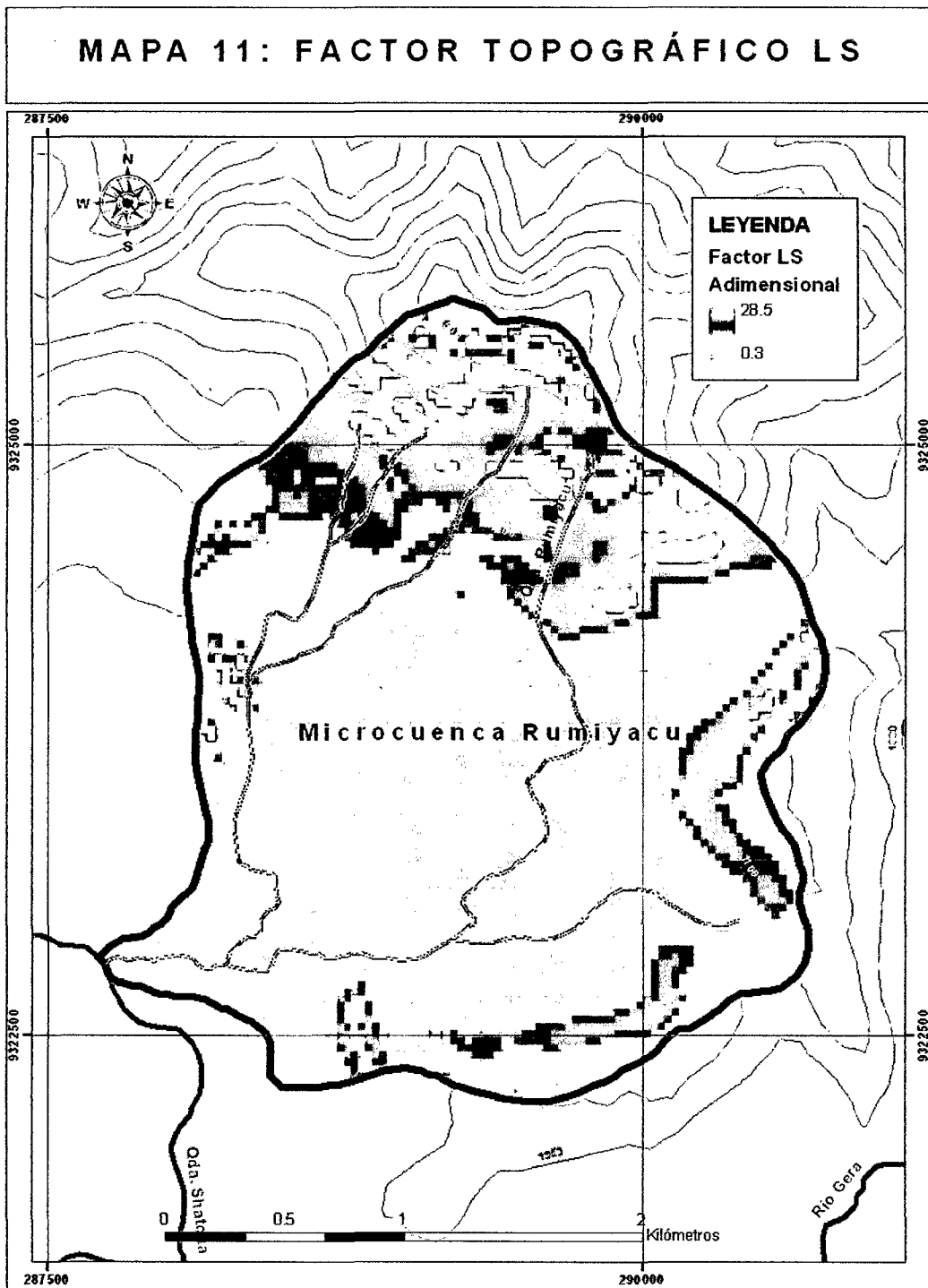
El factor K calculado tiene un valor medio de $0.008 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, y varía en el rango de $0.00745 - 0.01060 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Los suelos con baja cantidad de materia orgánica (2.32 – 3.40%), poseen altas tasas de factor K (0.00948 y $0.01060 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, respectivamente), mientras que los suelos con alta cantidad de materia orgánica (5.44%), presentan bajas tasas de erodabilidad ($0.00745 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$).

LÓPEZ (2007) afirma que las zonas de más alta erodabilidad corresponden a suelos con agregados granulares y prismáticos muy groseros, y bajo contenido en materia orgánica, mientras que aquellas de baja erodabilidad aparecen en suelos con agregados de estructura granular y migajosa media, grosera y alto contenido en materia orgánica, coincidiendo con los suelos de la microcuenca Rumiyacu, donde los suelos de las unidades I y V son los que presentan más altos contenidos de materia orgánica 3.8% y 5.94%, respectivamente, así mismo presentan una estructura granular migajosa fina, y bajos índices de erodabilidad 0.00886 y $0.00745 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

4.3 Factor de longitud y gradiente de pendiente (factor LS)

Método MINTEGUI (1983)

Se determinó el factor topográfico LS a partir del mapa de pendientes en porcentaje, derivado del DEM SRTM de 90 m de resolución espacial, dichos valores se clasificaron según los rangos propuestos por la Facultad de Hidráulica e Hidrología ETSIM (Madrid).



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. Mapa de longitud y gradiente de pendiente de la microcuenca Rumiyacu.

El mapa obtenido para el factor topográfico LS presenta un valor medio y máximo de 14.4 y 28.5, respectivamente. Los valores máximos aparecen asociados con áreas de fuerte pendiente, los rangos del factor LS, varían entre 0.3 – 28.5 (adimensional).

Las investigaciones efectuadas por LÓPEZ (2007) demuestran que realizar el cálculo de LS, considerando el valor de la longitud de la pendiente, se podría llegar a alcanzar valores que superan los propuestos por MINTEGUI (1983), como es el caso de un valor máximo LS de 61.3, en investigaciones realizadas al norte de España.

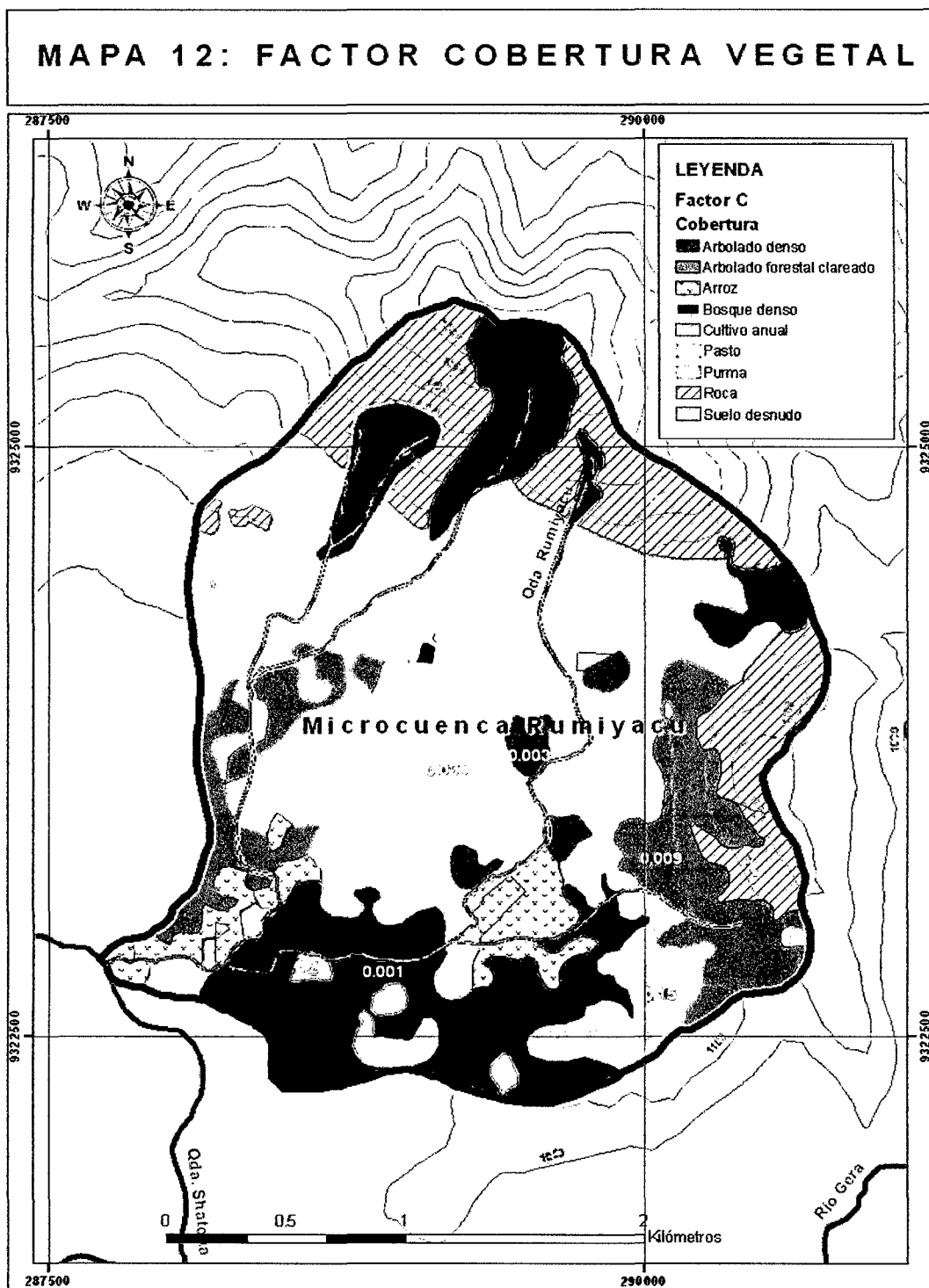
4.4 Factor de cobertura vegetal (factor C)

El factor C se determinó contrastando el mapa de Uso Actual de Tierras y el cuadro de asignación de valores C para las diferentes coberturas vegetales, propuesto por WISCHMEIER (1978) los valores fueron adaptados a las coberturas encontradas en la microcuenca Rumiyacu:

Cuadro 26. Valores del factor C para la microcuenca Rumiyacu.

Uso	Factor C
Arbolado denso	0.003
Arbolado forestal clareado	0.009
Arroz	0.6
Bosque denso	0.001
Cultivo anual	0.25
Pasto	0.15
Purma	0.035
Roca	0
Suelo desnudo	1

Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Mapa de factor cobertura vegetal de la microcuenca Rumiyacu.

El mapa resultante del factor C para el conjunto de la zona de estudio, presenta un valor medio de 0.035, cifra similar asignada a la purma. Las cubiertas de bosque denso y arbolado denso presentan el mayor grado de protección frente a la pérdida de suelo con un valor del factor C de 0.001 y 0.003 respectivamente.

A los lugares con presencia de afloramientos rocosos se les asignó un valor C de cero, lo que significa que no sufren ningún tipo de erosión por efecto de los procesos climáticos. Por el contrario, a los lugares con presencia de cárcavas y suelos desnudos se les asignó un valor C igual a 1, por encontrarse en la mayoría de los casos sin ningún tipo de cubierta vegetal y exponerse totalmente a los procesos erosivos de la zona, coincidiendo con investigaciones realizadas por ANTEZANA (2001) y LÓPEZ (2007) en la cuenca Taquiña – Bolivia y cuenca Estaña – España, respectivamente.

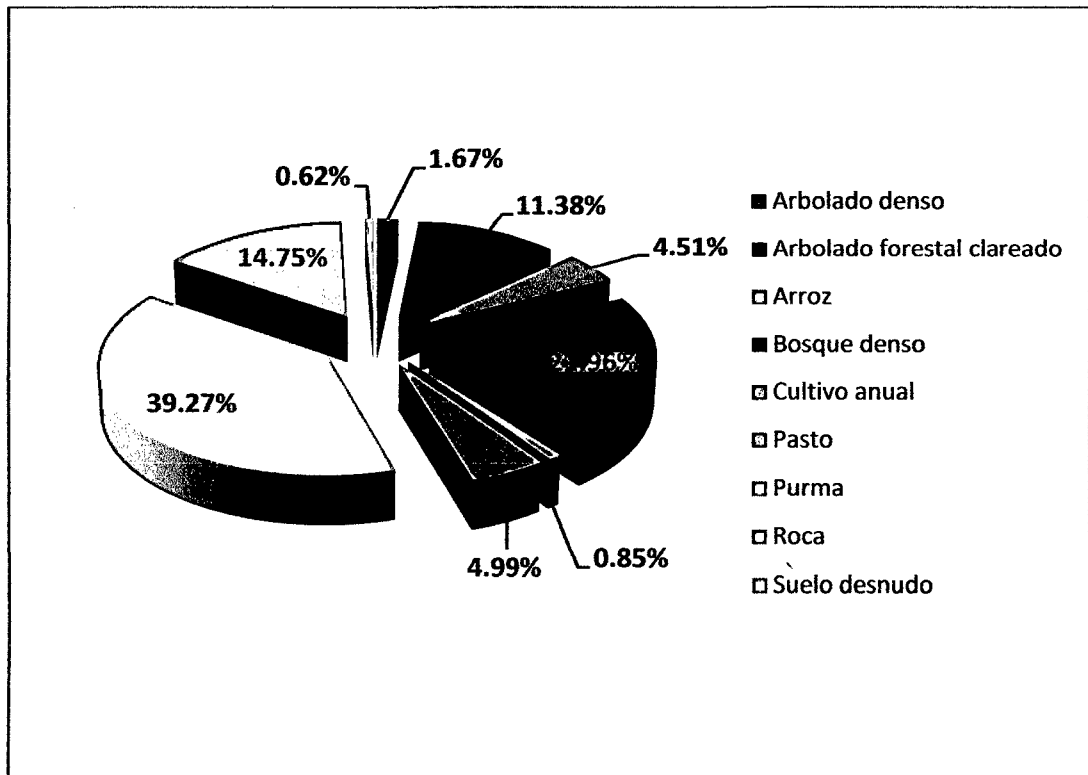
El resto de las cubiertas vegetales presentan valores intermedios y parecidos entre sí, mientras que los arrozales y cultivos anuales presentan la menor protección frente a la erosión, con valores del factor C de 0.6 y 0.25, respectivamente.

A continuación se muestra la distribución espacial de las coberturas vegetales en la microcuenca Rumiyaçu.

Cuadro 27. Área total de la microcuenca en función al uso del suelo.

Uso	Área (ha)	Área (%)
Arbolado denso	11.8	1.67
Arbolado forestal clareado	80.3	11.38
Arroz	31.8	4.51
Bosque denso	155.0	21.96
Cultivo anual	6.00	0.85
Pasto	35.20	4.99
Purma	277.1	39.27
Roca	104.1	14.75
Suelo desnudo	4.40	0.62
TOTAL	705.7	100.00

Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.

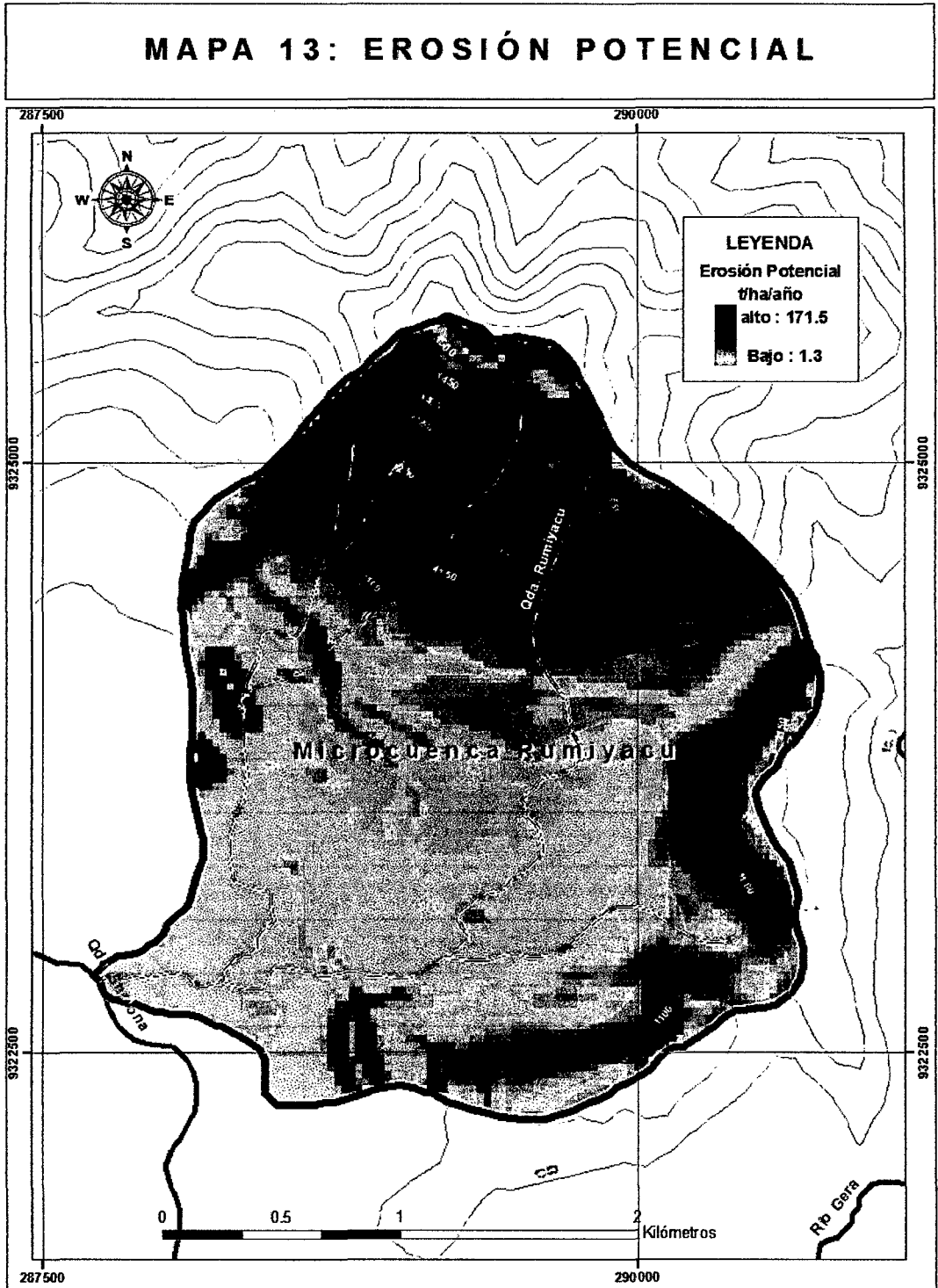
Figura 27. Área total de la microcuenca en función al uso del suelo.

De la figura anterior se aprecia que, más del 60% (423.42 ha) de la microcuenca ha sufrido la intervención del hombre, ya sea para incremento de áreas de café, pasto, arroz y cultivos anuales. Las rocas superficiales cubren un 15% del área total de la microcuenca (104.1 ha).

Se observa que 155 ha de bosque denso (22%), se encuentran en los alrededores de las cabeceras de quebradas, ubicadas en las partes altas de la microcuenca, como consecuencia de ello, se garantiza que las fuertes precipitaciones y pendientes pronunciadas no ocasionen grandes pérdidas de suelos en la misma, y más aún no influyan en el régimen hídrico, propio de la microcuenca.

4.5 Erosión potencial de suelos

El producto de los factores de erosividad de la lluvia, erodabilidad del suelo, y topográfico, (R, K y LS, respectivamente), permite obtener el mapa de pérdida de suelo potencial, o máxima pérdida de suelo posible.



Fuente: Elaboración propia.

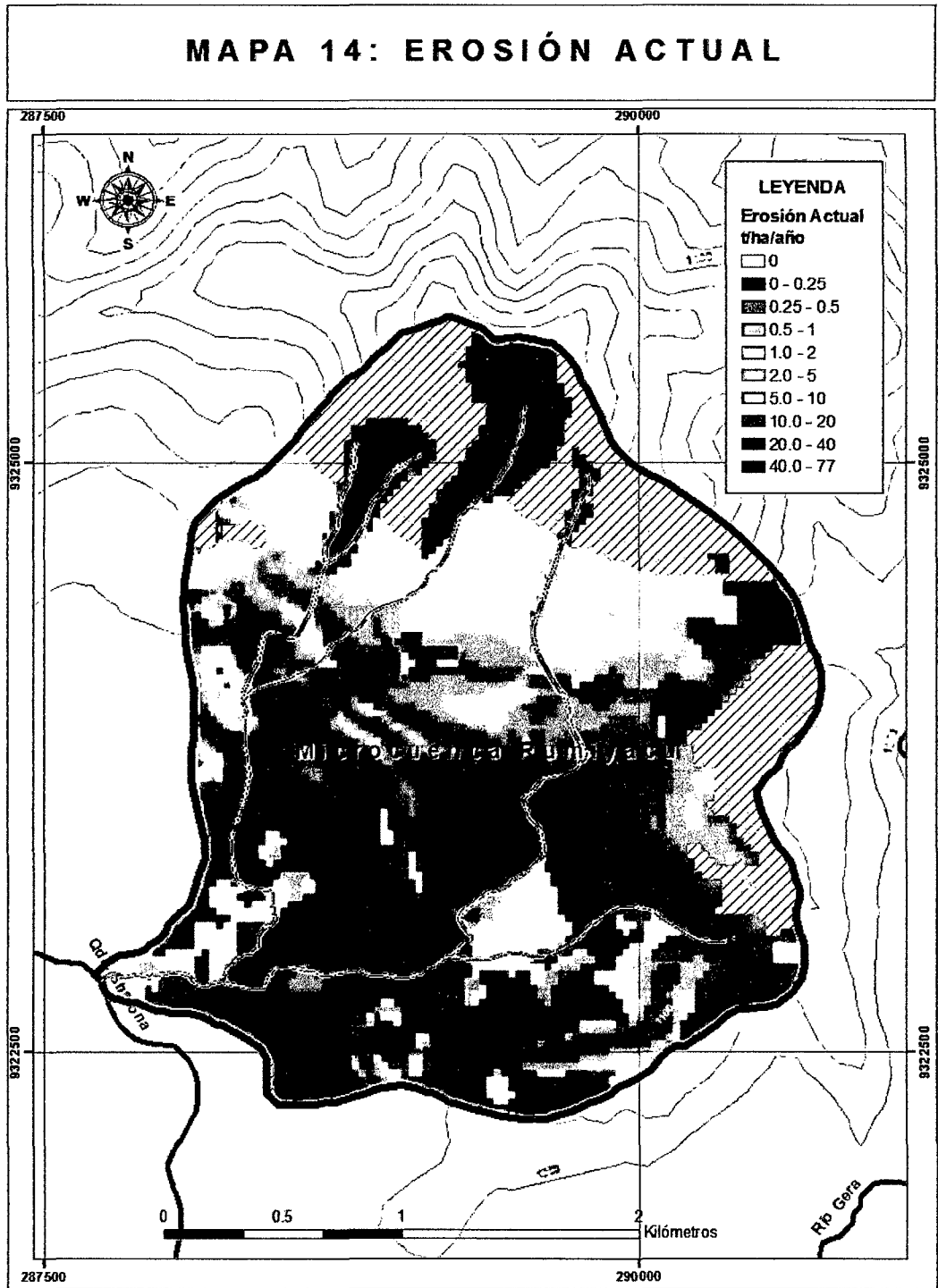
Figura 28. Mapa de erosión potencial de suelos de la microcuenca Rumiayacu

Este mapa refleja la pérdida de suelo teórica que tendría lugar ante la ausencia de cualquier tipo de cubierta vegetal, así como de las medidas de conservación del suelo.

La erosión potencial de los suelos de la microcuenca Rumiyaçu alcanza los $171.5 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$, una cifra significativamente alta debido a que no se está teniendo en cuenta la protección que ejerce la cobertura vegetal ante las fuertes precipitaciones sobre el suelo, sin embargo, nos muestra un panorama futuro catastrófico de la zona de estudio, al no realizar prácticas conservacionistas de suelos y continuar deforestando desmedidamente los bosques de la microcuenca.

Investigaciones realizadas en la Cuenca Güira – Cuba, por ALONSO *et. Al* (2007), demuestran una gran correlación ($R^2 = 79.96$) entre la erosión potencial y el factor LS, por el contrario existe una baja correlación entre la erosión potencial y el factor R ($R^2 = 14.85$), debido a que la erosividad de las lluvias depende del comportamiento de las precipitaciones, magnitud que es sensible a variaciones espaciales en el orden de los kilómetros, no siendo así la topografía cuya variabilidad esta en el orden de unos pocos metros.

4.6 Erosión actual de suelos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 29. Mapa de erosión actual de suelos de la microcuenca Rumiayacu.

El producto de los factores de erosividad de la lluvia, erodabilidad del suelo, factor topográfico y la cubierta del suelo, permite obtener el mapa de pérdida de suelo actual en la microcuenca Rumiyacu.

El mapa de pérdida de suelo anual calculado mediante los seis factores del modelo USLE presenta un valor medio de $1.1 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con una pérdida total de suelo de $776.27 \text{ t año}^{-1}$ para la microcuenca Rumiyacu.

Un área de 669.69 ha (94% de la cuenca) presenta niveles de erosión bajo, variando en el rango de $0 - 5 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, 25.11 ha (4%) pierde entre $5 - 25 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de suelo, o lo que representa niveles moderados de erosión y sólo 10.9 ha (2%) se encuentra en el nivel de erosión media y alta (con pérdidas anuales de suelo que varían en el rango de $25 - 77 \text{ t ha}^{-1}$).

WISCHMEIER Y SMITH (1978) consideran que las pérdidas tolerables para la zona tropical es de $12 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y RENARD *et al.* (1991) sostiene que erosión tolerable se refiere a la proporción máxima de pérdida de suelo que pueda ocurrir y aún permita que la productividad del cultivo sea económicamente sostenida; para la microcuenca Rumiyacu, se ha estimado que un 98% (691.65 ha) del terreno no ha sobrepasado dicho límite y por tanto las tasas de pérdida no han superado los procesos de formación de suelos, por el contrario, 25.11 ha (2%) de la microcuenca no permiten que la productividad de los cultivos sea económicamente sostenible por pérdidas de suelo que sobrepasan las $12 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

4.7 Validación de resultados

Los resultados obtenidos de pérdida de suelo por erosión hídrica mediante la aplicación de la metodología USLE, fueron comparados con los resultados de los análisis de suelo (materia orgánica, textura y estructura) y el análisis del horizonte superficial en campo.

Cuadro 28. Validación de resultados.

Nivel de Erosión	Uso de suelo	M.O (%)	Textura	Estructura	Horizonte	Rango (t ha ⁻¹ año ⁻¹)
Baja	Bosque denso	4.5	Franco	3: Granular	O, A, B, C	0 – 5
Moderada	Purma	3.2	Fr- Arc	2: Granular y Migajosa	A, B, C	5–25
Media y Alta	Suelo desnudo	1.9	Arcilla	1: Migajosa	B,C	25 –77

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro anterior, refleja la similitud de los resultados obtenidos en el análisis predictivo USLE con la realidad en el campo; los bosques y arbolados densos presentan bajos índices de erosión (menor a 5 t ha⁻¹ año⁻¹), a pesar de ser las zonas que mayor precipitación reciben durante el año, este hecho se debe al amortiguamiento de la caída de gotas de lluvia que ejercen las hojas, además de presentar una cubierta al ras del suelo por parte del horizonte O bien desarrollado (puede alcanzar hasta 10 cm de espesor).

Por el contrario, las purmas de la microcuenca Rumiyacu, son de porte bajo, con texturas medias y un perfil de suelo joven (A = 25 cm, B y C), su contenido de materia orgánica es media (3.2%); presentan una erosión

moderada ($5 - 25 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), la cual se ve fuertemente influenciada por las pendientes altas de estas zonas.

A pesar de tener una textura fina, los suelos desnudos y aquellas zonas de cárcavas presentan niveles de erosión media y alta ($25 - 77 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), este inexorable proceso se debe a la escasa cobertura vegetal presente en dichas áreas; son las zonas más vulnerables a los fenómenos erosivos de la microcuenca Rumiyacu.

V. CONCLUSIONES

1. Se logró determinar el índice de erosividad de las lluvias o factor R, a través del promedio de los métodos propuestos por ROOSE (1995), MORGAN (1997) y FOSTER (1981), obteniéndose un rango de 718.31 a 1109.45 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ año⁻¹ para la microcuenca Rumiyacu.
2. Se estimó el índice de erodabilidad del suelo o factor K de la cuenca en estudio, mediante la ecuación propuesta por WISCHMEIER y SMITH (1978), con valores que oscilan entre 0.00745 a 0.01060 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹.
3. El índice topográfico LS o factor de longitud y gradiente de la pendiente, se determinó con el método de MINTEGUI (1983), obteniéndose valores que varían dentro del rango de 0.3 a 28.5 para el área de estudio.
4. Se determinó el índice cobertura vegetal o factor C, obteniéndose 9 tipos de usos principales en la microcuenca, los valores del factor C para cada uno de los usos varían desde 0 (roca) hasta 1 (bosque denso).

5. Se estimó la pérdida potencial de suelos de la microcuenca Rumiyacu, alcanzándose valores anuales medios de 35.9 t ha^{-1} , lo que representa una pérdida total de $25\,334.63 \text{ t año}^{-1}$.
6. Se logró estimar y validar la pérdida actual de los suelos de la microcuenca Rumiyacu, obteniéndose valores que oscilan entre 0 y $77 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, y una pérdida media anual de 1.1 t ha^{-1} , cifra que define pérdidas totales de suelo en $776.27 \text{ t año}^{-1}$.
7. El 98% (691.65 ha) del área de la microcuenca presenta niveles de erosión que se encuentran por debajo de los límites tolerables y sólo el 2% (25.11 ha) se encuentra con graves problemas de erosión.

VI. RECOMENDACIONES

1. Realizar labores de control del agua de escorrentía, en zonas de cárcavas (cuenca media), a través de barreras de costales, fajas de césped y barreras de paja y ramas.
2. En zonas con cultivos anuales instalados en tierras de fuerte pendiente (sur de la cuenca), mantener los rastrojos y materia seca del suelo para amortiguar el impacto de las gotas de lluvia.
3. En suelos destinados a uso ganadero y ubicados en lomadas (zona sur oriental de la cuenca), se debe implementar prácticas silvopastoriles, para evitar el sobrepastoreo y por ende la compactación del suelo, reduciendo significativamente la escorrentía.
4. Aprovechar de manera más eficiente las zonas cubiertas por purmas ubicadas en laderas (130.1 ha), implementando la reforestación con especies maderables de alto valor económico, capaces de generar diversos beneficios como: secuestro de carbono, materia prima, mejoramiento de suelos, etc.
5. Fortalecer las capacidades de los habitantes de la microcuenca Rumiyacu, en gestión integral de los recursos naturales.

6. Transferir nuevas tecnologías en prácticas culturales conservacionistas y buenas prácticas agrícolas.
7. Reforestar las áreas adyacentes a las quebradas, con especies forestales propias de la zona.

VII. ABSTRACT

My objective with this research project was to estimate the amount of lost soil due to water action in the Rumiyacu watershed using the universal soil loss equation (USLE), GIS and remote sensing techniques, and evaluating the interaction between the main factors in erosion: rainfall erosivity (R factor), soil erodibility (K factor), topography (LS factor), vegetation (C factor) and conservation practices (P factor).

By applying the methodology proposed by ROOSE (1995), MORGAN (1974) and FOSTER (1981), I found values ranging from 761.5 - 898.8 MJ mm ha⁻¹h⁻¹yr⁻¹ for the R factor. Additionally, using the formula developed by Wischmeier (1978), including texture, MO, structure and permeability, and values from soil analysis of 05 homogeneous units, I estimated the erodibility is in the range of 0.00745 – 0.01060 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹. For the LS factor, I found values between 0.3 and 28.5, using slope map information and Mintegui's methodology (1993). Likewise, I estimated the factor C to be in the range of 0-1 by assigning each land use its corresponding value according to those proposed by Wischmeier and Smith (1978). Finally, I assumed a P factor value of 1 given that in the agricultural areas of Rumiyacu watershed there are not soil conservation practices being applied.

In order to estimate the potential loss of soil in Rumiayacu watershed, I simulated a completely free (with no vegetation) and found average annual values as high as 35.9 t ha^{-1} , which equals to a total loss of $25\,334.63 \text{ t yr}^{-1}$.

I validated these results by using the USLE predictive methodology and found values between 0 and $77 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, and an average annual loss of 1.1 t ha^{-1} (total soil loss 776.27 t yr^{-1}). My results let me estimate that 98% of the watershed area has erosion rates below tolerable limits, and only 2% has severe erosion problems.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTEZANA, J. 2001. Calibración de los factores de erosión utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo revisado "RUSLE" en sistemas de producción agrícola de la cuenca Taquiña. Centro de Levantamientos Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos. Taquiña, Bolivia. 77 p.

BROWNING, G.M., PARISH, C.L., GLASS, J.A. 1947. A method for determining the use and limitation of rotation and conservation practices in control of soil erosion in Iowa. SOIL SCI. Soc. Am. Pro. 23, 249–264 p.

CHANDER, G. y MARKHAM, B. 2003. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration: Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges, IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing, VOL. 41, N°. 11. California, Estados Unidos.

COOK, H.L. 1936. The nature and controlling variables of the water erosion process. SOIL SCI. Soc. Am. Proc. 1, 60–64 p.

- DESIR, G., MARÍN, C. 2007. Factors controlling the erosion rates in a semi-arid zone, Bardenas Reales, España. *Catena* 71, 31–40 p.
- DE SANTISTEBAN, L.M., CASALÍ, J., LÓPEZ, J.J. 2006. Assessing soil erosion rates in cultivated areas of Navarre (Spain). *Earth Surf. Proc. Land.* 31, 487–506 p.
- FALLOU, F.A. 1862. *Pedologie oder allgemeine und besondere Bodenkunde*. G. Schönfeld's Buchhandlung, Dresden. 220 p.
- FELICÍSIMO, A. 1994. *Modelos digitales de terreno: Introducción y aplicación en las ciencias ambientales* Sevilla, España. 122 p.
- FRANKLIN, E. (1987). Geomorphometric processing of digital elevation models. *Computers & Geosciences*. 603- 609 p.
- LÓPEZ, M., NAVAS, A. 2007. Modelos de predicción de la erosión y transporte del suelo. *Geo-Temas* 269–271 p.
- MACHÍN, J., NAVAS, A. 1995. Land evaluation and conservation of semiarid agrosystems in Zaragoza (NE Spain) using an expert evaluation system and GIS. *Land Degrad. Zaragoza, España*. 203–214 p.

- MORGAN, R.P.C. 1995. Soil Erosion and Conservation, 2° Edition. Longman Group and J. Wiley & Sons, Essex, 198 p.
- NAVAS, A. 1993. Soil losses under simulated rainfall in semiarid shrublands of the Ebro valley. *Soil Use Manage.* 152–157 p.
- NAVAS, A. 1995. Cuantificación de la erosión mediante el radioisótopo cesio 137. *Sociedad Española de Geomorfología. Cuadernos Técnicos de la SEG, N° 8.* Edit Geoforma.. Logroño, 16 p.
- NOLAN, S.C., VAN VILET, L.J.P., GODDARD, T.W., FLESCHE, T.K. 1997. Estimating storm erosion with a rainfall simulator. *Can. J. SOIL SCI.* 77, 669–676 p.
- OLDEMAN, L.R. 1994. The global extent of soil degradation. En: Greenland, D.J., Szabolcs, I. (Eds.), *Soil Resilience and Sustainable Land Use.* CAB International, Wallingford, UK, 99–118 p.
- PORTA, J., LÓPEZ-ACEVEDO, M., ROQUERO, C. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente.* 3ª Edición. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 960 p.
- RAMOS, C. 2001. Modelamiento ambiental para análisis de susceptibilidad erosiva en la cuenca media y alta del río Cañete y determinación del

mapa de erosión. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
30 p.

RENARD, K.G., FOSTER, G.R., WEESIES, G.A., PORTER, J.P. 1991. RUSLE
– Revised universal soil loss equation. J. Soil Water Conserv. 46(1),
30–33 p.

SALLES, C., POESEN, J. 2000. Rain properties controlling soil splash
detachment. Hydrol. Process. 14, 271–282 p.

SMITH, D.D. 1941. Interpretation of soil conservation data for field use. Agr.
Eng. 22, 173–175 p.

SOBRINO, J. (2000). “Teledetección”. Ed. Servicios de Publicaciones,
Universidad de Valencia, Valencia, España. 467p.

SPRENGEL, C. 1837. Die Bodenkunde, oder die Lehre vom Boden nebst einer
vollständigen Anleitung zur chemischen Analyse der Ackererden.
Immanuel Müller, Leipzig, Alemania, 450 p.

SUÁREZ, C. 1979. Conservación de suelos. Instituto Interamericano de
Cooperación Agrícola. San José, Costa Rica. 315 p.

VAN DIJK, A. 2002. Measurements of rain splash on bench terraces in a humid
tropical steep-land environment. Hydrol. Process. 17, 513–535 p.

ZINGG, A.W. 1940. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. Agr. Eng. 21, 59–64 p.

IX. ANEXOS

ANEXO A. Cálculo del factor erosividad de lluvias

A.1 Precipitación mensual y anual (mm) para el período 2006 – 2010

Estación CO Jepelacio

Meses													Total	Promedio Mensual
Años	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre		
2006	160.8	155.8	142.5	158.8	72.2	79.8	79.0	122.7	132.0	53.6	50.8	129.6	1337.6	111.5
2007	52.1	147.9	244.0	184.8	138.9	75.5	92.4	50.7	195.1	190.0	172.8	338.7	1882.9	156.9
2008	137.2	128.8	131.6	152.6	181.0	20.0	96.5	75.8	48.9	103.7	104.7	76.3	1257.1	104.8
2009	120.5	127.7	153.6	58.4	144.9	119.8	26.5	87.6	116.0	182.2	75.7	196.8	1409.7	117.5
2010	24.0	88.6	135.5	170.3	109.3	58.7	104.2	43.0	87.5	158.2	116.2	123.7	1219.2	101.6
Promedio	98.9	129.8	161.4	145.0	129.3	70.8	79.7	76.0	115.9	137.5	104.0	173.0	1421.3	118.4

Estación CO Moyobamba

Meses													Total	Promedio Mensual
Años	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre		
2006	154.3	185.4	151.8	161.9	58.0	40.8	65.7	95.6	134.2	111.3	44.1	234.4	1437.5	119.8
2007	79.5	156.3	266.5	164.2	114.3	52.3	56.0	112.6	120.4	232.6	78.3	184.1	1617.1	134.8
2008	106.0	138.9	167.5	181.4	87.3	29.7	123.6	24.3	24.8	60.4	135.7	107.1	1186.7	98.9
2009	188.6	113.1	142.8	51.7	224.2	115.4	32.5	60.9	92.1	117.9	71.4	227.9	1438.5	119.9
2010	54.2	96.2	125.1	89.7	110.9	38.8	69.9	38.6	103.4	116.1	209.8	98.6	1151.4	95.9
Promedio	116.5	138.0	170.7	129.8	118.9	55.4	69.5	66.4	95.0	127.7	107.9	170.4	1366.2	113.9

Estación El Triunfo

Meses													Total	Promedio Mensual
Años	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre		
2006	190.0	61.0	194.0	54.0	31.0	85.0	69.0	46	55.0	76.0	28.0	102.0	991.0	82.6
2007	0.0	180.8	299.6	172.4	76.5	51.3	43.4	59.8	86.0	60.3	148.9	43.9	1222.9	101.9
2008	71.7	56.0	162.2	148.4	170.8	43.0	91.3	51.3	135.1	26.2	115.6	67.0	1138.6	94.9
2009	28.0	149.9	138.1	205.7	165.6	43.7	15.8	57.1	24.9	29.2	41.4	121.6	1021.0	85.1
2010	107.1	199.3	168.9	216.0	145.3	157.9	43.5	30.9	27.9	43.8	26.9	21.7	1189.2	99.1
Promedio	79.4	129.4	192.6	159.3	117.8	76.2	52.6	49.0	65.8	47.1	72.2	71.2	1112.5	92.7

Estación La Flor de Café

Meses													Total	Promedio Mensual
Años	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre		
2006	115.7	202.5	94.6	168.3	96.1	145.7	106.1	137.7	164.3	91.0	48.2	206.7	1576.9	131.4
2007	73.8	110.0	283.1	297.7	190.9	91.6	157.7	57.5	100.2	218.6	82.1	321.4	1984.6	165.4
2008	111.0	99.0	77.3	260.8	168.3	79.2	254.4	66.3	144.8	173.9	146.4	60.2	1641.6	136.8
2009	110.7	155.9	243.1	102.1	189.9	116.8	68.2	84.2	212.6	300.9	78.1	301.8	1964.3	163.7
2010	55.8	77.8	222.7	272.2	234.5	168.8	65.0	120.6	156.7	182.2	117.9	74.5	1748.7	145.7
Promedio	93.4	129.0	184.2	220.2	175.9	120.4	130.3	93.3	155.7	193.3	94.5	192.9	1783.2	148.6

A.2 Fotografías



Figura 30. Tomando puntos de control de la cuenca.



Figura 31. Realizando muestreo de suelos.



Figura 32. Estación meteorológica CO - Jepelacio.



Figura 33. Cultivos anuales en zonas de alta pendiente.



Figura 34. Raíces expuestas por erosión laminar.



Figura 35. Zona de cárcavas.



Figura 36. Escasa presencia de rastrojos en cultivos anuales.



Figura 37. La deforestación en la microcuenca Rumiycacu va en aumento.