

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA



Predicción de la erosión hídrica del suelo aplicando el método
USLE en la subcuenca río Negro, Rioja, San Martín

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL

AUTORES

Cristian Alex Alarcón Linares

Bedith Sánchez Altamirano

ASESOR

Carlos Hugo Egoávil De la Cruz

Rioja, Perú

2023

METADATOS COMPLEMENTARIOS**Datos de los Autores****Autor 1**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Autor 2

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Autor 3

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Autor 4

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Datos de los Asesores**Asesor 1**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (Obligatorio)	

Asesor 2

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (Obligatorio)	

Datos del Jurado**Presidente del jurado**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Segundo miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Tercer miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Datos de la Obra

Materia*	
Campo del conocimiento OCDE Consultar el listado:	
Idioma	
Tipo de trabajo de investigación	
País de publicación	
Recurso del cual forma parte (opcional)	
Nombre del grado	
Grado académico o título profesional	
Nombre del programa	
Código del programa Consultar el listado:	

***Ingresar las palabras clave o términos del lenguaje natural (no controladas por un vocabulario o tesauro).**



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 042 - 2023/UCSS/FIA/DI

Siendo las 09:00 a.m. del martes 31 de octubre de 2023, a través de la plataforma virtual zoom de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis integrado por:

- | | |
|--------------------------------------|-----------------|
| 1. Katerin Manuelita Encina Oliva | Presidente |
| 2. Maximiliana Irene Castro Medina | Primer miembro |
| 3. Berthin Renzo Ticona Cortavitarte | Segundo miembro |
| 4. Carlos Hugo Egoávil De la Cruz | Asesor(a) |

Se reunieron para la sustentación virtual de la tesis titulada **Predicción de la erosión hídrica del suelo aplicando el método USLE en la subcuenca río Negro, Rioja, San Martín**, que presentan los bachilleres en Ciencias Ambientales, **Cristian Alex Alarcón Linares y Bedith Sánchez Altamirano**, cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

Terminada la sustentación y luego de deliberar, el jurado acuerda:

APROBAR

DESAPROBAR

La tesis, con el calificativo de **MUY BUENA** y eleva la presente acta al decanato de la Facultad de Ingeniería Agraria, a fin de que se declare EXPEDITA para conferirle el TÍTULO de INGENIERO AMBIENTAL.

Lima, 31 de octubre de 2023.

Katerin Manuelita Encina Oliva
Presidente

Maximiliana Irene Castro Medina
1° miembro

Berthin Renzo Ticona Cortavitarte
2° miembro

Carlos Hugo Egoávil De la Cruz
Asesor

Anexo 2

CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR(A) DE TESIS_CON INFORME DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ANTIPLAGIO

Rioja, 10 de enero de 2024

Señor(a),
Wilfredo Mendoza Caballero
Jefe del Departamento de Investigación
Facultad de Ingeniería Agraria

Reciba un cordial saludo.

Sirva el presente para informar que **la tesis**, bajo mi asesoría, con título: "Predicción de la erosión hídrica del suelo aplicando el método USLE en la subcuenca río Negro, Rioja, San Martín", presentado por Cristian Alex Alarcón Linares (código de estudiante 2014101798 y DNI 71620388) y Bedith Sánchez Altamirano (código de estudiante 2014101875 y DNI 73190649) para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental ha sido revisado en su totalidad por mi persona y **CONSIDERO** que el mismo se encuentra **APTO** para ser sustentado ante el Jurado Evaluador.

Asimismo, para garantizar la originalidad del documento en mención, se le ha sometido a los mecanismos de control y procedimientos antiplagio previstos en la normativa interna de la Universidad, **cuyo resultado alcanzó un porcentaje de similitud de 14 %** (catorce por ciento).* Por tanto, en mi condición de asesor(a), firmo la presente carta en señal de conformidad y adjunto el informe de similitud del Sistema Antiplagio Turnitin, como evidencia de lo informado.

Sin otro particular, me despido de usted. Atentamente,



Firma del Asesor (a)
DNI N°: 09887433
ORCID: 0000-0002-8496-7205
Facultad de Ingeniería Agraria - UCSS

* De conformidad con el artículo 8°, del Capítulo 3 del Reglamento de Control Antiplagio e Integridad Académica para trabajos para optar grados y títulos, aplicación del software antiplagio en la UCSS, se establece lo siguiente:

Artículo 8°. Criterios de evaluación de originalidad de los trabajos y aplicación de filtros

El porcentaje de similitud aceptado en el informe del software antiplagio para trabajos para optar grados académicos y títulos profesionales, será máximo de veinte por ciento (20%) de su contenido, siempre y cuando no implique copia o indicio de copia.

DEDICATORIA

A mis padres Iván Alarcón García y Perpetua Linares Fernández por haberme formado con principios y valores. A mi hermano Carlos Alarcón Linares por su apoyo incondicional; y a quienes me motivaron constantemente para alcanzar mis objetivos.

A Lelis Díaz Torres y Briana Kaory Alarcón Díaz por brindarme la fuerza necesaria para poder seguir adelante y así lograr mis metas.

A mis familiares y amigos, por ser un gran pilar para poder formarme como persona y asimismo ser un gran apoyo para poder culminar esta fase de mi vida.

Cristian Alex Alarcón Linares

Dedico el presente trabajo de investigación a Dios, a mis padres Alexander Sánchez Linares y Betty Altamirano Montero, a mis hermanos (Maura y Alexander) mi sobrinita (Maya) y a mis abuelitas Agustina y Maura, quienes son mi mayor tesoro y pieza fundamental en mi vida.

Bedith Sánchez Altamirano

AGRADECIMIENTO

Agradecimiento en primer lugar a Dios por prestarnos la vida y guiarnos siempre por el camino del bien.

A la Universidad Católica Sedes Sapientiae, por habernos acogido con amor durante nuestro periodo de estudio universitario y por brindarnos la formación profesional y personal.

Al Ing. Carlos Hugo Egoávil De la Cruz por su apoyo y perseverancia para poder concretizar esta investigación.

Al Ing. Esaú Medina Corrales por el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación.

A nuestros familiares por acompañarnos en toda la investigación, un agradecimiento especial a cada uno de ellos.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE APÉNDICES	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	4
1.1. Antecedentes	4
1.1.1. Nivel internacional	4
1.1.2. Nivel nacional	8
1.1.3. Nivel Regional	15
1.2. Bases teóricas especializadas	16
1.2.1. Cuenca	16
1.2.2. Parámetros geomorfológicos de una cuenca	16
1.2.3. Precipitación	19
1.2.4. Suelo	20
1.2.5. Degradación de suelos	20
1.2.6. Erosión hídrica	21
1.2.7. Tipos de erosión hídrica	22
1.2.8. Erosión hídrica del suelo	23
1.2.9. Factores que intervienen en la erosión hídrica	24
1.2.10. Actividades antrópicas que ocasionan la pérdida de suelo	24
1.2.11. Modelos de evaluación de erosión hídrica	25
1.2.12. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)	25
1.2.13. Erosión hídrica actual	33
1.2.14. Erosión hídrica potencial	33
1.2.15. Sistema de Información Geográfica (SIG)	34
1.2.16. Elementos Del SIG	34

1.2.17. Teledetección	35
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	36
2.1. Diseño de la investigación	36
2.2. Lugar y fecha	36
2.2.1. Clima	36
2.2.2. Ecología	37
2.3. Materiales y equipos	39
2.4. Población y muestra	39
2.5. Técnicas e instrumentos	41
2.6. Descripción de la investigación	41
2.7. Identificación de las variables y su mensuración	55
2.8. Análisis estadístico de datos	57
CAPÍTULO III: RESULTADOS	58
3.1. Estimar el índice de erosividad (R) en la Subcuenca del río Negro	58
3.2. Calcular el valor de la erodabilidad del suelo (K), en la Subcuenca del río Negro.	61
3.3. Definir la longitud y gradiente de la pendiente (LS), en la Subcuenca del río Negro	64
3.4. Determinar la cobertura vegetal (C), en la Subcuenca del río Negro.	67
3.5. Identificar las prácticas de conservación del suelo (P)	69
3.6. Predecir de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca del río Negro	69
CAPÍTULO IV: DISCUSIONES	72
4.1. Estimación del índice de erosividad (R) en la subcuenca del río negro	72
4.2. Cálculo del valor de erodabilidad del suelo (K) en la subcuenca del río Negro.	73
4.3. Definir la longitud y gradiente de la pendiente (LS), en la subcuenca del río Negro	73
4.4. Determinación de cobertura vegetal (C), en la subcuenca del río Negro.	74
4.5. Identificación de prácticas de conservación de suelo (P), en la subcuenca del río Negro.	75
4.6. Predicción de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca del río Negro	75
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	77
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES	79
REFERENCIAS	81
TERMINOLOGÍA	94
APÉNDICES	96

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Características de la cuenca en función a Kc</i>	18
Tabla 2. <i>Características de la cuenca, con valores de factor de forma</i>	19
Tabla 3. <i>Nivel de erosión hídrica según la FAO</i>	26
Tabla 4. <i>Clasificación del factor R</i>	28
Tabla 5. <i>Clasificación de la erodabilidad según USDA</i>	30
Tabla 6. <i>Características de la cobertura vegetal según el valor del NDVI</i>	32
Tabla 7. <i>Estaciones Meteorológicas empleadas en la investigación</i>	40
Tabla 8. <i>Parámetros geomorfológicos de la subcuenca del río Negro</i>	46
Tabla 9. <i>Factores del método USLE</i>	47
Tabla 10. <i>Serie de suelos presentes en el área de estudio</i>	53
Tabla 11. <i>Cuadro de valores del factor LS</i>	54
Tabla 12. <i>Resumen de variables de estudio</i>	57
Tabla 13. <i>Valores del factor R en la subcuenca del río Negro</i>	58
Tabla 14. <i>Valores de factor K en la subcuenca del río Negro</i>	61
Tabla 15. <i>Valores del factor LS en la subcuenca del río Negro</i>	64
Tabla 16. <i>Pérdida de suelo en la subcuenca del río Negro</i>	69

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Causas socio-económicas y ambientales que influyen en la degradación de los suelos	21
<i>Figura 2.</i> Mapa de ubicación de la Subcuenca del río Negro	38
<i>Figura 3.</i> Correlación entre estación patrón y estación Rioja	48
<i>Figura 4.</i> Correlación entre estación patrón y estación Naranjillo.....	49
<i>Figura 5.</i> Correlación entre estación patrón y estación Japelacio	49
<i>Figura 6.</i> Correlación entre estación patrón y estación Moyobamba.....	50
<i>Figura 7.</i> Correlación entre estación patrón y estación Leymebamba	50
<i>Figura 8.</i> Correlación entre estación patrón y estación Soritor.....	51
<i>Figura 9.</i> Correlación entre estación patrón y estación Rodríguez de Mendoza	51
<i>Figura 10.</i> Distribución del factor R por cada estación generada	59
<i>Figura 11.</i> Mapa de erosividad en la subcuenca del río Negro.....	60
<i>Figura 12.</i> Valores de K según el tipo de serie de suelo en la subcuenca del río Negro	62
<i>Figura 13.</i> Mapa de erodabilidad del suelo en la subcuenca del río Negro	63
<i>Figura 14.</i> Distribución del factor LS vs el área en la subcuenca del río Negro	65
<i>Figura 15.</i> Mapa del factor LS en la subcuenca del río Negro	66
<i>Figura 16.</i> Mapa del factor C en la subcuenca del río Negro	68
<i>Figura 17.</i> Nivel de erosión con respecto al área en la subcuenca del río Negro	70
<i>Figura 18.</i> Mapa de pérdida de suelo en la subcuenca del río Negro	71

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Distribución de puntos de muestreo del suelo en el área de estudio	96
Apéndice 2. Extracción de muestras de suelos en los puntos determinados	97
Apéndice 3. Etiquetado de muestras de suelo	97
Apéndice 4. Proceso de Trituración, tamizaje y envasado de muestras de suelo.....	98
Apéndice 5. Determinación de textura del suelo	98
Apéndice 6. Datos de precipitación mensual (mm) por cada estación meteorológica	99
Apéndice 7. Precipitación promedio de estaciones meteorológicas.....	106
Apéndice 8. Correlación entre estación patrón y estaciones meteorológicas.....	107
Apéndice 9. Resultados del cálculo del IMF anual	108
Apéndice 10. Resultado del IMF por cada estación meteorológica	109
Apéndice 11. Mapa de isoyetas en base al IMF de las estaciones meteorológicas	110
Apéndice 12. Distribución de estaciones puntuales dentro de la subcuenca.....	111
Apéndice 13. Mapa de distribución de estaciones generadas.....	112
Apéndice 14. IMF por cada estación meteorológica generada dentro de la subcuenca	113
Apéndice 15. Mapa de isoyetas dentro de la subcuenca.....	114
Apéndice 16. Mapa de Distribución de la serie de suelos dentro de la subcuenca	115
Apéndice 17. Resultado de análisis de las muestras de suelo	116
Apéndice 18. Actualización de la serie de suelos de la subcuenca	117
Apéndice 19. Mapa del Subfactor F	118
Apéndice 20. Mapa Subfactor M.....	119
Apéndice 21. Mapa Factor L	120
Apéndice 22. Mapa Factor S	121
Apéndice 23. Mapa del NDVI en la subcuenca del río Negro	122

RESUMEN

La presente investigación se desarrolló en la Subcuenca del río Negro con el propósito predecir la pérdida de suelo por la erosión hídrica, empleando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos – USLE, en donde se interactuó los elementos promotores de la erosión del suelo, tales como: erosividad de lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), topografía (LS), cobertura vegetal (C) y prácticas conservacionistas (P). Para el factor R se empleó datos de precipitación mensual donde se analizó bajo el método del Índice Modificado de Fournier donde, el factor K se obtuvo aplicando la ecuación de Williams donde se empleó la información de la serie de suelos del Alto Mayo y su actualización con el muestreo de suelos en el área de estudio, para el factor LS se utilizó las fórmulas de Renard empleando un DEM de 30 m de pixel y aplicando los valores de Mintegui para su caracterización, con respecto al factor C, se empleó la metodología del NDVI propuesto por Rouse *et al.* (1974) y luego se aplicó la fórmula de Van Der Knijff *et al.* (2000) y por último, para el factor P se asumió el valor de 1, ya que en el área de estudio no se identificó prácticas de conservación de suelos. Los resultados obtenidos mostraron que la erosividad varió desde 4 389,40 hasta 4 487,38 $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$; los valores de la erodabilidad del suelo oscilaron desde 0,014 a 0,022 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$, para el factor Topográfico se obtuvo que en la subcuenca el 30,2 % cuenta con pendientes entre 3 a 12 %; y el 0,2 % cuenta con pendientes mayor a 100 % y para el factor de cobertura vegetal se obtuvo valores desde 0,19 a 0,60. Finalmente, multiplicando los parámetros del modelo USLE en el área de estudio, los resultados determinaron que la erosión leve osciló entre 0,380 – 49,841 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ con un área de 17 065,26 ha; asimismo, con un nivel de erosión muy alta, los valores oscilaron de 699,896 – 1 802,164 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ con un área de 19,01 ha; esta última se justifica por las fuertes pendientes en la parte alta de la subcuenca y las actividades de agropecuarias presentes en el área de estudio.

Palabras clave: Actividades Agropecuarias, erosión hídrica, erosión del suelo, NDVI, serie de suelos.

ABSTRACT

The present research was developed in the Negro River Subbasin with the purpose of predicting soil loss due to water erosion, using the Universal Soil Loss Equation – USLE, where the elements that promote soil erosion were interacted, such as: rain erosivity (R), soil erodibility (K), topography (LS), vegetation cover (C) and conservation practices (P). For the R factor, monthly precipitation data was used where it was analyzed under the Modified Fournier Index method where the K factor was obtained by applying the Williams equation where the information from the Alto Mayo soil series was used and its update with the soil sampling in the study area, for the LS factor the Renard formulas were used using a DEM of 30 m pixel and applying the Mintegui values for its characterization, with respect to the C factor, the NDVI methodology was used proposed by Rouse *et al.* (1974) and then the formula of Van Der Knijff *et al.* (2000) and finally, for the P factor the value of 1 was assumed, since no soil conservation practices were identified in the study area. The results obtained showed that erosivity varied from 4 389,40 to 4 487,38 MJ*mm*ha⁻¹*year⁻¹; the soil erodibility values ranged from 0,014 to 0,022 t*ha⁻¹*MJ⁻¹*mm⁻¹, for the Topographic factor it was obtained that in the subbasin 30,2% have slopes between 3 to 12%; and 0,2% have slopes greater than 100% and values from 0,19 to 0,60 were obtained for the vegetation cover factor. Finally, multiplying the parameters of the USLE model in the study area, the results determined that slight erosion ranged between 0,380 – 49,841 t*ha⁻¹*year⁻¹ with an area of 17 065,26 ha; Likewise, with a very high level of erosion, the values ranged from 699,896 – 1 802,164 t*ha⁻¹*year⁻¹ with an area of 19,01 ha; The latter is justified by the steep slopes in the upper part of the subbasin and the agricultural activities present in the study area.

Keywords: Agricultural Activities, water erosion, soil erosion, NDVI, soil series.

INTRODUCCIÓN

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2011), hace referencia que el crecimiento poblacional a nivel mundial está en aumento, donde para el año 2050 pronostica que la población llegará a 9 100 millones de habitantes y ocasionará que la demanda de alimentos ascienda a un 60 %; así mismo, la agricultura debe suplir a esta demanda para satisfacer las necesidades alimenticias de la población; sin embargo, esta actividad trae graves consecuencia para el suelo, debido al uso intensivo de este recurso, sumado a esto, la aplicación constate de productos químicos industrializados (herbicidas, fungicidas y plaguicidas), ocasionando que el rendimiento de los cultivos disminuyan (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2015). Actualmente la pérdida de suelo, por efecto de la erosión, asciende a 75 mil millones de toneladas a nivel mundial, convirtiéndose en un problema de interés para los gobiernos (FAO, 2017).

La erosión del suelo se encuentra influenciado por diferentes factores, dentro de ellos la cobertura vegetal que juega un rol muy importante, evitando deslizamientos y favoreciendo a la regulación hídrica (García, 2004). La precipitación es otro factor a tener en cuenta, ya que, por acción de la salpicadura de las gotas de agua en la superficie, causa desprendimiento de partículas que son transportadas a las partes bajas, por escurrimiento superficial y variaciones de pendiente (Dumas, 2012). La pérdida de suelo por erosión hídrica en el territorio peruano es un problema que se origina a consecuencia de factores antrópicos como: el sobrepastoreo, las malas prácticas agrarias, la deforestación, entre otros (Centro Peruano de Estudios Sociales, 2015). En el año 2018 se logró estimar que en el Perú hubo una degradación de alrededor de 22 248 100 ha de áreas agrícolas (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2020); asimismo, en la provincia de Rioja entre los años 2000 al 2021, se ha perdido aproximadamente 24 102 ha de suelos fértiles a causa de la degradación (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2022).

Frente a esta realidad ambiental peruana, es necesario calcular o predecir las pérdidas de suelo por erosión hídrica y así poder orientar la toma decisiones a fin de reducir dicha

erosión; así como también, contribuir a mejorar o mantener la productividad de los suelos (Echavarría *et al.*, 2020). Según Tauta *et al.* (2018), menciona que diferentes investigadores proponen diversas técnicas para estimar la erosión del suelo, donde sobresale la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), la cual es la más admitida entre los profesionales encargados de la gestión de cuencas, para fines de producción o de conservación; y que, con ayuda de los sistemas de información geográfica (SIG) y teledetección, permiten una adecuada toma de decisiones, usos sostenibles de recursos naturales y planificación ambiental, considerando que estas decisiones tienen impacto en la conservación, adaptación y mitigación en la pérdida del suelo para un área determinada (Hill *et al.*, 2014).

La subcuenca del río Negro ubicada en la provincia de Rioja, departamento de San Martín, no es ajena a esta problemática, ya que las actividades antrópicas como la ganadería, agricultura (por inadecuadas prácticas en el manejo de suelos); además del clima, composición del suelo y cobertura vegetal, facilitan la pérdida de los suelos por erosión promoviendo un desequilibrio hídrico en cantidad y calidad, lo que conlleva al deterioro del ecosistema y afecta el bienestar de las poblaciones dentro de la subcuenca. En atención al impacto y la problemática ambiental que genera la erosión hídrica en el suelo y el desconocimiento de la cuantificación de la pérdida de suelo por unidad de superficie; el presente trabajo de investigación plantea como objetivo predecir la erosión hídrica del suelo aplicando el método USLE en la subcuenca del río Negro, provincia de Rioja, departamento de San Martín; el cual, dicha información servirá como instrumento de gestión para la toma de decisiones en la conservación y manejo del suelo de la subcuenca.

OBJETIVOS

Objetivo general

Predecir la pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando el método USLE en la subcuenca del río Negro de la provincia de Rioja.

Objetivos específicos

- Estimar el índice de erosividad (R) en la subcuenca del río Negro.
- Calcular el valor de la erodabilidad del suelo (K), en la subcuenca del río Negro.
- Definir la longitud y gradiente de la pendiente (LS), en la subcuenca del río Negro.
- Determinar la cobertura vegetal (C), en la subcuenca del río Negro.
- Identificar las prácticas de conservación del suelo (P), en la subcuenca del río Negro.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Nivel internacional

Pham *et al.* (2018) realizaron un estudio denominado “Ecuación Universal Integrada de Pérdida de Suelo (USLE) y Sistema de Información Geográfica (SIG) para la Estimación de la Erosión del Suelo en una Cuenca Sap, Vietnam central”, cuyo objetivo fue estimar la erosión del suelo en la cuenca del río Sap, distrito de A Luoi, provincia de Thua Thien Hue, Vietnam, empleando la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) y el Sistema de Información Geográfica (SIG). Para la determinación de los diferentes factores del USLE, los autores recopilaron información de precipitación de 253 estaciones meteorológicas con un periodo de 54 años, raster DEM de 30 m de resolución de la misión SRTM, imágenes satelitales de Landsat 8, datos de uso de tierra del área de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Instituto de Investigación de Fertilizantes de Vietnam (SFRI) y el Instituto Nacional de Vietnam de Planificación Agrícola y Proyección (NIAPP); asimismo, para el procesamiento de la información espacial, emplearon el Software ArcGIS 9.3 y mapas a escala 1/50 000. Para el cálculo de factor R, emplearon datos meteorológicos de precipitación anual (mm) para un periodo desde 2005 al 2015 y aplicaron la fórmula de Nguyen (1996) y procesaron la información en el software ArcGIS 9.3. Para el factor K, extrajeron información de los tipos de suelo de la provincia de Thua Thien Hue, generado por NIAPP a una escala de 1/100 000 y posteriormente compararon con los valores propuestos por Vietnam Central; para el valor de LS, emplearon un DEM de 30 m de resolución, donde para su clasificación emplearon la fórmula propuesta por Moore *et al.* (1992). El factor C fue calculado empleando la metodología del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), donde extrajeron la reflectancia espectral superficial en la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la reflectancia espectral superficial en la banda rojas (RED) del satélite Landsat 8; finalmente, encontraron el valor del factor P al utilizar los datos de uso de suelo del área de estudio en donde realizaron la interpolación según la pendiente

al DEM de 30 m de resolución, con ayuda del software ArcGIS 9.3. Los resultados determinaron que el área aproximada del ámbito de estudio fue de 33 542 ha y los valores para el factor R fueron de 1 634 a 1 732 MJ*mm*ha*hora⁻¹*año⁻¹; el valor para el factor K osciló entre 0,18 a 0,32 t*ha⁻¹; el factor LS osciló de 0 a 30, donde también identificaron que gran parte de la cuenca presenta pendientes muy empinadas; además, el valor para el factor C osciló entre 0,16 y 0,69 y por último el valor para el factor P presentó valores de entre 0,003 a 1,00. Los autores concluyeron que la tasa promedio de pérdida de suelo, fue de aproximadamente 13 t*ha*año⁻¹ y que la medida de pérdida de suelo en Vietnam central fue más alta que en otras zonas montañosas en el norte de país.

Ganasri y Ramesh (2016) en el estudio “Evaluación de la erosión del suelo por el modelo RUSLE utilizando sensores remotos y GIS: un estudio de caso de la cuenca de Nethravathi”, tuvieron como objetivo calcular el riesgo de erosión en la cuenca de Nethravathi ubicada suroeste de la India, integrando el modelo RUSLE con la teledetección y el SIG. Para el estudio los autores recopilaron datos de imágenes satelitales de 23,5 m y raster DEM de 30 m de resolución, obtenidos del software Bhuvan, datos del tipo de suelo obtenidos de la Oficina Nacional de Estudio de Suelos y Planificación del uso de la tierra y datos de precipitación de 12 estaciones meteorológicas. Para dicho estudio los autores empezaron con la delimitación del área utilizando el DEM de 30 m de resolución, empleando el software ArcGIS 9,3; posteriormente, determinaron el factor R utilizando los datos de precipitación mensual de las estaciones meteorológicas para un periodo de 10 años, con la cual generaron las isoyetas y aplicaron la fórmula de Wischmeier y Smith (1978); para el Factor K, utilizaron los valores de textura y materia orgánica del suelo de la Oficina Nacional de Estudio de Suelos y Planificación del Uso de la Tierra, luego lo interpolaron y aplicaron la fórmula de Wischmeier y Smith (1978), reclasificándole en el software ArcGIS 9,3; seguidamente, para el cálculo del factor LS emplearon un DEM de 30 metros de resolución, con la finalidad de obtener un raster de pendientes; posteriormente, con ayuda de la herramienta Slope del software ArcGIS 9,3, fue reclasificada; el factor C fue calculada realizando una clasificación supervisada y corroborada con el mapa de cobertura de uso de suelo; finalmente, no encontraron información de prácticas de conservación del suelo y asumieron el valor de 1 para el factor P. Los resultados establecieron que el área de estudio aproximada fue de 3 128,72 km²; asimismo, los valores de los parámetros del USLE para R, osciló entre 2 948,16 y 4 711,4 MJ*mm*ha*hr⁻¹*año⁻¹; para el factor K, los datos variaron de

0,10 y 0,44 $t \cdot h \cdot ha \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$, para el factor de topografía LS fue entre 0 a 1 240; también, clasificaron el suelo en seis tipos a los cuales asignaron valores para el factor C, que varió de 0 a 0,63. Finalmente concluyeron que la pérdida media anual de suelo en el área de estudio empleando el modelo RUSLE ascendió a la cantidad aproximada de 4 73,339 $t \cdot año^{-1}$; donde consideraron que el 18 % del área total tuvo alta y muy alta erosión.

Gelagay y Minale (2016) en el artículo de investigación denominado “Estimación de la pérdida de suelo utilizando SIG y técnicas de teledetección: un caso de la cuenca hidrográfica de Koga, noroeste de Etiopía”, tuvieron como objetivo predecir y mapear la pérdida potencial de suelo mediante el uso de SIG y técnicas de teledetección en la cuenca hidrográfica de Koga. Para que concreten la investigación recolectaron información geoespacial como modelo de elevación digital (DEM) ASTER de 30 m de resolución, mapa de cobertura de suelo obtenido Servicio Mundial de Cobertura del Suelo, mapa de suelos a escala 1:250 000 tomada del plan maestro de la cuenca del río Nilo, imagen satelital multiespectral de 30 m de resolución del 2013 obtenida de la Autoridad Cartográfica de Etiopía, mapa topográfico tomado de la Oficina de Agricultura de Etiopia a escala 1:50 000 y datos de precipitación media anual de cuatro estaciones meteorológicas con un registro de 13 años, de la Agencia Meteorológica Nacional de Etiopia. Con la información obtenida calcularon cada uno de los parámetros del modelo USLE, donde para el factor R emplearon los datos de precipitación media anual y aplicaron la fórmula propuesta por Hurni (1985) e interpolaron en el software ArcGIS 10,1 creando el mapa de isoyetas; en cuanto al factor K, extrajeron información del mapa de suelos (textura y materia orgánica), a la cual reclasificaron y asignaron valores en función del tipo de suelo; para el factor LS utilizaron un DEM corregido de 20 m de resolución espacial, a la que corrigieron y generaron un raster de dirección y acumulación de flujo, para luego encontrar la pendiente del área de estudio y aplicar la ecuación de Simms *et al.* (2003); con respecto al cálculo del factor C, los autores emplearon el software ArcGIS 10.1 para realizar una clasificación no supervisada con ayuda de la imagen satelital de 30 m de resolución, donde identificaron los principales tipos de cobertura de suelo y así generaron un mapa de cobertura de suelo más exacta; finalmente, para P utilizaron el shape de uso de tierra y el raster de pendiente a la cual clasificaron asignando valores de acuerdo a la practicas de manejo locales. Los resultados mostraron un área de estudio de 28 000 ha, además, el valor del factor de erosividad osciló de 715,58 a 945,4 $MJ \cdot mm^{-1} \cdot ha^{-1} \cdot hr^{-1} \cdot año^{-1}$; el factor K fue de 0,15 a 0,25 $t \cdot h \cdot ha \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$; para el

parámetro C obtuvieron valores desde 0,0014 a 0,1 (dependiendo del tipo de cobertura que presentó el área de estudio); los valores para el factor LS fueron desde 0 a 109; y por último, para el factor P asignaron el valor de 1 para la parte media y alta de la cuenca, y para la parte baja, el valor asignado fue de 0,1 (de acuerdo al tipo de conservación realizado en el área de estudio). Los autores concluyeron que la pérdida de suelo total anual en el área de estudio fue de 255 a 283 t*ha⁻¹*año⁻¹, con una media anual de 265 t*ha⁻¹*año⁻¹, y en la parte más inclinada de la cuenca, la pérdida media anual de suelo fue de 47 t*ha⁻¹*año⁻¹.

Devatha *et al.* (2015) desarrolló la investigación denominada “Estimación de la pérdida de suelo utilizando el modelo USLE para la cuenca hidrográfica de Kulhan, Chattisgarh - Un estudio de caso”, cuyo objetivo fue predecir la tasa de pérdida anual de suelo, aplicando el método USLE en la cuenca Kulhan, con ayuda de técnicas de teledetección y Sistema de Información geográfica (SIG). La investigación fue de tipo no experimental y emplearon como población a toda el área de la cuenca. Para dicho trabajo los investigadores recolectaron los registros de precipitación anual, modelos de elevación digital (DEM) de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de 90 m de resolución, imágenes satelitales Landsat 8; como también, los números de toposheets con escala de 1:50 000 y data geoespacial de la clasificación y serie de suelo. Para el cómputo de los parámetros del modelo USLE, los autores primero determinaron el área de estudio e identificaron el sistema de drenaje empleando hojas topográficas; posteriormente, para que encuentren el valor de la erosividad (R), recurrieron a los datos de precipitación anual (mm) de las estaciones dentro del área de estudio y aplicaron la técnica de interpolación a través de la visión SIG en el software ArcMap; asimismo, para el factor K (erosionabilidad del suelo) obtuvieron datos de textura y contenido de materia orgánica del mapa de clasificación de uso de tierra y la serie de suelos e interpolaron con el área de estudio y lo clasificaron según la normativa USDA; por otra parte, para el factor LS emplearon un DEM SRTM de 90 m de resolución espacial, a la cual lo especificaron según el ángulo de pendiente y la longitud de la misma; para la determinación del Factor C (Cobertura Vegetal), utilizaron imágenes satelitales de 30 m de resolución del satélite Landsat, donde realizaron una clasificación en función de la vegetación y asignaron valores según la cobertura presente en la cuenca; finalmente, para el Factor P (Prácticas de Conservación), emplearon la información obtenida en el factor C y a esto asignaron valores interpolándolo con la pendiente del área de estudio. Todo el proceso lo realizaron con ayuda del software SIG ArcMap. Los resultados obtenidos determinaron

que el área para la cuenca de estudio fue de 935 km², para el factor R encontraron valores que oscilan de 90,54 a 180,112 MJ*mm*ha⁻¹*h⁻¹, el factor K varió de 0,33 a 0,14 t*ha*h*ha⁻¹, el factor LS de 0,11 a 68,215; el valor del factor C varió de 0 a 0,4 y por último los valores del factor P fueron de 0,1 y 1; asimismo, la pérdida de suelo anual en el área de estudio fue de 556 t*ha*año⁻¹, con una pérdida media de 0,1783 t*ha*año⁻¹. El estudio concluyó que el 83,97 % del total del área presentó riesgo de erosión leve y solo el 0,45 % del total del área en riesgo muy severo.

1.1.2. Nivel nacional

Calle (2021) realizó la investigación denominada “Efecto de los cambios de uso de suelo en el aumento de la erosión hídrica a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos en la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas Namballe”, donde el objetivo fue predecir el efecto ocasionado por la erosión hídrica a consecuencia del cambio de uso de suelo, en el Santuario Nacional Tabaconas Namballe, San Ignacio - Cajamarca. La investigación tuvo un diseño de tipo no experimental, con un alcance descriptivo y un enfoque cuantitativo. La muestra de la investigación estuvo definida por el área de estudio que fue de 41 808,04 ha, y las submuestras definidas por el registro pluviométrico de 20 años, de las estaciones meteorológicas y también por las 18 muestras de suelo tomadas dentro del área de estudio. La metodología utilizada consistió en la recolección de información de los datos de precipitación en cinco estaciones meteorológicas con un periodo de 1986 a 2010, DEM con 12 m de resolución obtenidos del satélite Alos Palsar, datos edafológicos y cobertura vegetal obtenidos de la microzonificación de la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas del 2018 y el software ArcMap 10,7; asimismo, realizó trabajo de campo para la toma de muestra de 18 puntos distribuidos en toda el área de estudio; posteriormente, procesó los parámetros del modelo, donde para el factor R utilizó los datos meteorológicos con su respectiva corrección de datos, para la generación de las isoyetas, aplicando la metodología del IMF; finalmente, para obtener los valores de R aplicó la fórmula de Ramírez (2006); además, para K analizó la información edáfica de la microzonificación del suelo realizada en el área de estudio e interpoló los datos obtenidos con ArcMap y aplicó la fórmula propuesta en la investigación de Flores (2015); para el factor LS empleó un DEM de 12 metros de resolución, donde realizó una corrección espacial en ArcMap y aplicó las fórmulas propuestas por SENAMHI para obtener los valores topográficos; posteriormente, para el factor C empleó información del mapa de cobertura

vegetal y el mapa de capacidad de uso mayor de suelos del SERNANP e identificó ocho tipos de cobertura; finalmente, para el cálculo del factor P identificó las prácticas culturales realizadas en la zona de amortiguamiento dentro del área de estudio, para luego ser interpoladas con las pendientes. El procesamiento de la información fue realizado utilizando los softwares de ArcGIS 10,7; Office 2019 y GPS. Los resultados determinaron que los valores de R oscilaron de 765,63 a 2 573,98 MJ*mm*ha⁻¹*año⁻¹; para K oscilaron de 0,001 a 0,1 t*ha*MJ⁻¹*mm⁻¹; para C varió de 0,003 a 0,072; para LS los valores tuvieron una variación de 0,09 y 4 161,35. Asimismo, en cuanto a la erosión hídrica potencial promedio para el área de estudio, los resultados establecieron que el valor alcanzado fue de 1,53 t*ha⁻¹*año⁻¹, y para la erosión hídrica efectiva promedio, el valor obtenido fue de 35,92 t*ha⁻¹*año⁻¹. El estudio concluyó que ambos escenarios (erosión hídrica potencial y erosión hídrica efectiva), estuvo influenciado por los cambios de uso de suelo (incineración de la cobertura vegetal), presentando mayor erosión hídrica.

Puerta (2018) en el trabajo de investigación denominada “Estimación de Pérdida de Suelo por Erosión Hídrica usando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (U.S.L.E) en la Subcuenca Chinata, Amazonas, 2018”, tuvo como objetivo analizar la cantidad de suelo perdido por acción de la erosión hídrica en la subcuenca Chinata, Amazonas. El diseño empleado en la investigación consistió en la recolección de información para la obtención de datos cuantitativos aplicando los SIG. La población fue el área de la subcuenca Chinata y la muestra estuvo determinada por el factor R, donde utilizó datos de precipitación de 20 estaciones meteorológicas, y el factor K, donde realizó la toma de muestras de 25 puntos de muestreo dentro del área de estudio. La metodología que utilizó consistió en recolectar la información primaria y secundaria como cartas nacionales a escala 1:100 000 del IGN, shape de red vial obtenido de la MTC, shape de división política del Perú descargado del INEI, DEM ASTER de 30 m de resolución, imagen satelital de Landsat 8 de 30 m de resolución, shape de la ZEE de Amazonas y datos de precipitación de 20 estaciones meteorológicas obtenidos del SENAMHI e INDES-CES; asimismo, realizó trabajos de campo para la toma de muestras de suelo en 25 puntos distribuidos en toda la subcuenca. Los procedimientos para fijar los factores del modelo USLE consistieron en la determinación del factor R, utilizando los datos de 20 estaciones meteorológicas con un periodo de 5 años desde 2013 al 2018, con los que estableció la acumulación de precipitación anual (mm); luego, obtuvo los datos de precipitación anual acumulada e interpoló en ArcGIS para obtener un archivo

raster con los valores de R; para el cálculo del factor K, muestreó 25 puntos dentro del área de estudio, donde obtuvo datos de textura, materia orgánica y permeabilidad, donde aplicó la metodología de Kirkby y Morgan; por otra parte, para LS empleó un DEM de 30 m de resolución para la obtención de la pendiente y la acumulación de flujo, a la cual realizó una reclasificación y obtuvo los valores de la topografía; finalmente, para la obtención del factor C empleó una imagen satelital Landsat 8 y mediante el método de clasificación supervisada, clasificó a la cobertura vegetal e interpoló los resultados con los valores de otras investigaciones. El proceso de la información fue realizado con los programas de ArcGIS 10,5 y Office 2017. Los resultados determinaron que el área para la subcuenca fue de 5 404,00 ha; asimismo, los valores para el factor R oscilaron de 3 465,7 a 7 669,24 MJ*mm*ha⁻¹*año⁻¹; para K, los datos variaron de 0,011 a 0,038 t*ha⁻¹*h⁻¹*MJ⁻¹*mm⁻¹*ha⁻¹; el factor topográfico LS obtuvo pendientes mayores al 20 %; para el factor C, obtuvo valores que oscilan de 0,0001 hasta 1; finalmente, la pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca Chinata fue de 8 891 t*ha⁻¹*año⁻¹. La investigación concluyó que el 5,41 % del área de estudio se encontró con erosión crítica; mientras que, el 93,85 % presentó erosión ligera con una pérdida de 10 t*ha⁻¹*año⁻¹.

Moreno (2017) en el estudio titulado “Estimación de Pérdida de Suelo por Erosión Hídrica Aplicando el Método USLE y Haciendo Uso del SIG en la Subcuenca del Río Olleros-Distrito de Olleros Periodo 2015”, tuvo como objetivo predecir la pérdida de suelo por erosión, aplicando el método USLE en la subcuenca del río Olleros, provincia de Huaraz. El diseño que utilizó el autor fue no experimental y descriptiva. El universo de la investigación estuvo dado por un área de 17 010,94 ha, los cuales correspondieron a la Subcuenca del río Olleros; asimismo, la muestra estuvo calculada por la fórmula propuesta por Cochran (1 977) en las unidades de análisis como la precipitación, suelo, cobertura vegetal, pendiente de la subcuenca y conservación de suelos. La metodología utilizada consistió en la recolección de información primaria, como datos de precipitación mensual y anual de las estaciones de Shancayán, Quillcayhuanca, Chavín de Huantar y Recuay, con un periodo de entre 2013 a 2015; además, utilizó un DEM ASTER GDEM de 30 m de resolución e imagen satelital Landsat 8; asimismo, realizó trabajos de campo para obtener muestras de suelos y realizar su análisis para la textura, materia orgánica y permeabilidad; finalmente, determinó cada uno de los factores del modelo. Para la determinación del factor R, obtuvo los registros de precipitación de 4 estaciones meteorológicas, con la que determinó la precipitación anual

acumulada; además, realizó un análisis de correlación, donde utilizó las estaciones más equilibradas para la generación de un archivo raster de isoyetas, logrando obtener la precipitación en el área de estudio; finalmente, procedió a la aplicación de la fórmula de Arnoldus (1978); para el factor K, realizó el muestreo de suelo dentro del área de estudio y con los diferentes valores encontrados en estudios anteriores realizó la interpolación de la información en el software ArcGIS; para el factor LS, realizó la corrección del DEM y obtuvo la pendiente; luego, con la ayuda de herramientas en ArcGIS aplicó la fórmula propuesta por Renard *et al.* (1997); para la determinación del factor C, realizó una clasificación no supervisada a la imagen satelital Landsat 8, donde identificó las clases de cobertura en el área de estudio; y posteriormente, asignó valores de C en base a los estudios realizados por Wischmeier y Smith; finalmente, el autor asumió el valor de 1 para el factor P, dado que no identificó prácticas de conservación de suelo en la subcuenca. Todo el proceso de la información fue realizado con el software ArcGIS 10,3,1 y Microsoft Office Excel 2014. Los resultados determinaron que el área de estudio fue de 17 010,94 ha; para el factor R el valor osciló de 110,28 a 190,40 MJ*mm*ha⁻¹*h*año; para K, los datos oscilaron de 0,05061 a 0,0852 T*ha*h*ha⁻¹*MJ*mm; para el factor topográfico LS, osciló entre 0,02999 a 19,0336; por otro lado, para C obtuvo 9 clases de coberturas para la subcuenca, el cual fue clasificado en: agricultura andina con 0,4; bofedal con 0,0001; bosque relicto alto andino con 0,05; glaciar con 0,0001; lagunas y lagos con 0,0001; matorral arbustivo con 0,012; pajonal andino con 0,012; plantación forestal con 0,0001; área alto andina con escasa y sin vegetación con 0,9; finalmente; la pérdida de suelo por erosión en la subcuenca osciló entre 0,0 a 161,725 t*ha⁻¹*año⁻¹, con un valor medio anual de 25,58 t*ha⁻¹*año. La investigación concluyó que el 20,20 % del total del área de la subcuenca se encontró con una erosión alta a muy alta; por otro lado, el 59,945 % obtuvo una erosión casi nula.

Julca (2017) en la investigación titulada “Aplicación del modelo USLE para estimar la erosión actual y potencial de acuerdo con las actividades productivas en la microcuenca Pariac-Huaraz 2016”, tuvo como objetivo predecir la cantidad de suelo erosionado aplicando el modelo USLE en la microcuenca Pariac, Huaraz, Perú. La investigación fue descriptiva y aplicado, debido a que puede ser replicado para otros estudios. La metodología utilizada consistió en la recolección, revisión y adquisición de información de cartas nacionales a escala 1:100 000, obtención de un modelo de elevación digital (DEM) con resolución espacial de 12,5 m, imágenes satelitales del satélite Sentinel 2A de 13 bandas espectrales a

nivel 1C (L1C), mapa del estudio de suelos del callejón de Huaylas e imágenes del Google Earth de 1 m de resolución; asimismo, realizó trabajo de campo, donde realizó el muestreo del suelo; además, el procedimiento que utilizó para determinar los factores del modelo consistió en delimitar el área de estudio empleando el DEM de 12,5 m de resolución con ayuda del software ArcGIS; posteriormente, para calcular el factor R, empleó información de precipitación de las estaciones más cercanas al área de estudio, con la que realizó la interpolación y ajustes de la precipitación, altitud del área de estudio, el cual fue ponderado según la intensidad y duración de la precipitación; para determinar el factor K, realizó un análisis de suelos en base al estudio preliminar de suelos realizado en el callejón de Huaylas; seguidamente, realizó un análisis de muestras de suelos (textura, permeabilidad y materia orgánica) y obtuvo un mapa de suelos, con la que fue ponderado en función de las características edáficas del suelo y así obtuvo los valores de K. Para el factor LS, empleó el DEM de 12,5 m de resolución y determinó la pendiente, los cuales fueron clasificadas según conocimientos especializados del investigador; para el factor C empleó la imagen del satélite Sentinel 2A con la que realizó una clasificación no supervisada en el software Erdas Imagine, donde insertó puntos GPS con diferentes firmas espectrales y pondero con valores según el tipo de cobertura presente en el área de estudio; finalmente, el factor P fue considerado nulo, dado que no identificó prácticas de manejo y conservación en la microcuenca. El proceso de la información fue realizado con apoyo de los softwares Arcgis 10,5 Envi 5,3, Microsoft office 2013 y Erdas imagine 2015. Los resultados evidenciaron que el área de estudio fue de 10 821,33 ha; para el factor R, los valores oscilaron de 1 000 a 1 270 mm*año⁻¹, lo que evidenció erosiones altas con valores desde 800 a 1 000 mm*año⁻¹; con respecto al factor K, obtuvo que 9 076,77 ha de suelo, presentaron un nivel muy alto a la erosión; por otro lado, 561,59 ha de suelo fueron encontradas en un nivel de susceptibilidad alto; asimismo, para el factor C determinó que el 7,6 % del total del área fue vulnerable, ya que presentó suelos desnudos y terrenos de cultivo en limpio; por otro lado, el 54,3 % del total del área presentó un nivel bajo que correspondió a bosques primarios y secundarios; para el factor LS, los análisis de valores de la pendiente establecieron que 4 264,99 ha, presentaron pendientes menores de 25 %, registrando un nivel de riesgo muy alto; además, 3 618,35 ha registraron pendientes entre 15 a 25 %, presentando un nivel de riesgo alto; finalmente, 1 430,84 ha, presentaron pendientes entre 0 a 8 %, que indicaron un nivel bajo de erosión. De los resultados obtenidos, el autor concluyó que el área de estudio se encontró en un nivel de riesgo alto, dado que las actividades agrícolas, ganaderas y turísticas, tuvieron una gran influencia en el uso y manejo del suelo en la microcuenca.

Portuguez (2015) en la investigación denominada “Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la cuenca del río Sigüas utilizando Geoinformática”, tuvo como objetivo mostrar el potencial de los SIG a través del modelo USLE, para predecir la pérdida de suelo en la cuenca alta del río Sigüas, Arequipa. La investigación fue de tipo no experimental, donde el autor recolectó información y no manipuló directamente la zona de estudio. El estudio tuvo como población a la cuenca del río Sigüas, la cual presentó un área de 1 774 km². La metodología utilizada consistió en la recolección de una carta nacional a escala 1/100 000, mapa de ubicación de las estaciones a escala 1/100 000, mapa de cobertura y uso de suelo a escala 1/50 000 y mapa de suelo a escala 1/50 000; asimismo, obtuvo información de precipitación media anual de estaciones meteorológicas con un registro de 20 años. Para la determinación del factor R, utilizó los registros de precipitación media anual y con ayuda del software ArcGIS generó las isoyetas, para luego aplicar la fórmula de Roose (1995); además, para hallar el factor K empleó el mapa de suelo a escala 1/50 000 y realizó un estudio agrológico, donde identificó los usos de suelo, que le permitió encontrar los valores de K en un archivo en formato raster; para el factor LS, utilizó un DEM de 30 m de resolución, donde calculó las pendientes y clasificó en el software ArcGIS según la tabla propuesta por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes en Madrid; para el factor C utilizó el mapa de cobertura vegetal y realizó una clasificación no supervisada, interpolando el mapa en el área de estudio para asignar valores de C según el cultivo y práctica que identificó en cada cobertura; finalmente para el factor P asignó un valor de 1, dado que no identificó prácticas y manejos de conservación en el área de estudio. El procesamiento de la información fue realizado con los Softwares ArcGIS, empleando las herramientas de 3D Analyst for ArcGIS y Spatial Analyst. Los resultados mostraron que el área para la subcuenca de estudio fue de 1 774 km²; para R, los valores oscilaron entre 8,65 a 337,35 MJ*mm*ha⁻¹*h, la precipitación promedio anual fue entre 1,8 mm y 710 mm en el área de estudio; el valor de K presentó una variación de 0,28 a 0,48 t*ha*h*ha⁻¹*MJ*mm; para el factor LS encontró que el 48,6 % del área de la cuenca presentó pendientes entre 24 a 30 %; por otro lado, el 1,58 % del área de la cuenca correspondió a pendientes muy empinadas entre 70 a 100 %; finalmente, para el factor C los valores variaron de 0 a 0,5; asimismo, la pérdida anual de suelo para el área de estudio osciló de 0 a 1 400 t*ha⁻¹*año⁻¹. Concluyó que la tasa de pérdida de suelo por erosión hídrica el cual corresponde a 1 400 t*ha⁻¹*año⁻¹, se encuentra relacionado con las pendientes muy empinadas, las cuales ocupan un área de 1,58 % de toda la zona de estudio.

Del Águila (2010) en el estudio titulado “Aplicación del modelo USLE/RUSLE para estimar la pérdida del suelo por erosión hídrica en la microcuenca Puente-Pérez en Tingo María”, tuvo como objetivo predecir la pérdida de suelo ocasionada por la erosión hídrica empleando el modelo USLE y técnicas de SIG. La investigación fue de tipo no experimental, donde la información fue referencial para proyectos más detallados. La metodología utilizada consistió en primer lugar en la recolección de información básica como cartas nacionales a escala 1:100 000 del IGN, imágenes satelitales de la plataforma del satélite Ikonos y Quickbird, modelo de elevación digital (DEM) ASTER con 30 m de resolución espacial, DEM SRTM con 90 m de resolución y datos de precipitación con un periodo de 2003 – 2009, de las estaciones meteorológicas José Abelardo Quiñones de la Universidad Agraria de la Selva (Tingo María), Supte, Bella y Pavas; seguidamente, realizó trabajos de campo donde efectuó el muestreo de suelo para ser analizados; y finalmente, realizó el computo de los factores del modelo USLE, el cual comenzó con la delimitación del área de estudio, creación del mapa base de curvas de nivel, distribución de las estaciones meteorológicas y la ubicación de puntos de muestreo de suelo en el área de estudio, para la toma de muestras; para la determinación del factor R, realizó el procesamiento de los datos de las estaciones meteorológicas y generó las isoyetas con valores de precipitación; por otra parte, para el factor K empleó el mapa de uso de suelo, donde identificó ocho tipos de suelo y clasificó la subcuenca en tres zonas (alta, media y baja); posterior a ello, realizó el muestreo de suelos y envió las muestras al laboratorio de la UNAS para su respectivo análisis de textura, materia orgánica y permeabilidad; luego, aplicó el nomograma de Wischmeier y Smith; para el factor LS, empleó un DEM de 30 m de resolución y con el software ArcGIS realizó las correcciones correspondientes para obtener la pendiente y aplicó la fórmula de Desmet – Goversy, donde generó el mapa topográfico; para el factor C, empleó una imagen satelital de 2,5 m de alta resolución, a la cual le realizó una clasificación no supervisada y supervisada, obteniendo la ubicación de las parcelas con ayuda de un GPS y finalmente procesó la información en el programa SRTM v2,0 con los datos que determinó en el factor K; posteriormente, los datos fueron analizados en el programa ArcGIS y obtuvo un archivo en formato raster con los valores de C; para el factor P, el valor asignado fue 1 debido a que no observó prácticas de conservación de suelos en la microcuenca. El análisis y procesamiento de la data geoespacial fue realizado con los softwares ArcGIS 9.2 y Office 2007. Los resultados determinaron que el área aproximada para la microcuenca fue de 840,00 ha, para el factor R el resultado osciló entre 347 a 430 MJ*mm*ha⁻¹*h*año; para el factor K los valores oscilaron de 0,15 a 0,69 t*ha*h*ha⁻¹*MJ*mm; los valores del factor LS oscilaron de 0,3 a 20,20; para el factor C, los

valores oscilaron de 0,001 hasta 1, el cual dependió del tipo de uso de suelo que presentó el área de estudio. La investigación concluyó que la pérdida de suelo en el área de estudio fue de 0 a 3 992,0 t*ha⁻¹*año⁻¹; es decir, el 20 % del área sobrepasó los límites de erosión permisibles; además, 573,70 ha (68 % del área) presentó una erosión baja o casi nula.

1.1.3. Nivel Regional

Ruiz (2011) realizó una investigación denominada “Estimación de la erosión a través del Modelo USLE en la Microcuenca Rumiyacu, Región San Martín”, donde tuvo como objetivo predecir el volumen de suelo perdido a consecuencia de la erosión hídrica en la microcuenca Rumiyacu, Moyobamba. El diseño de la investigación fue de tipo no experimental, ya que el autor no realizó la manipulación de las variables. La población estuvo determinada por la microcuenca, con un área de 705,70 ha. La metodología utilizada consistió en primera instancia en el reconocimiento del área de estudio; posteriormente, realizó la recolección de la información de los datos de precipitación mensual de 4 estaciones meteorológicas dentro y fuera del área de estudio, carta nacional 14j a escala 1/100 000 obtenida del IGN, imagen satelital Landsat 5 TM, DEM ASTER GDEM de 30 m de resolución y DEM SRTM de 90 m de resolución; a continuación, realizó la determinación de los factores del modelo, donde para el factor R procesó la información de precipitaciones promedios anuales, generó isoyetas en el software ArcGIS y aplicó la ecuación de Roose, Morgan y Foster; asimismo, para la determinación del factor K empleó un DEM ASTER GDEM de 30 m de resolución, de donde extrajo los datos de relieve, pendiente y altitud; seguidamente, realizó una clasificación supervisada en ArcGIS y obtuvo las zonas homogéneas donde encontró 5 unidades geográficas; de seguida, procedió a realizar la toma de muestras para su análisis y obtener valores de textura, materia orgánica y permeabilidad, para luego aplicar la fórmula de Wischmeier; para la determinación del factor LS, empleó una DEM con la que obtuvo los valores de pendiente; para el factor C, el autor utilizó las bandas NIR y RED de la imagen satelital Landsat 8 y aplicó la metodología del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) y una clasificación no supervisada en Envi, para la determinación de 9 clases de uso de suelo. El análisis de la data fue realizado en los softwares de ArcGis 9,3; Envi 4,6 y Office 2010. Los resultados evidenciaron que la zona de estudio presentó un área de 705,70 ha; asimismo, el valor de R obtenido osciló entre 761,5 a 898,8 MJ*mm*ha⁻¹*h⁻¹*año⁻¹; para el factor K, los datos variaron de 0,00745 a 0,01060 t*ha*h*ha⁻¹*MJ⁻¹*mm⁻¹; los valores de LS fueron de 0,3 a 28,5; el valor de C osciló entre 0 a 1; y

finalmente, el valor para P fue de 1, debido a que no identifiqué metodologías de conservación de suelos en la zona de estudio. El autor concluyó que la pérdida anual en la subcuenca de estudio osciló entre 0 y 77 t*ha⁻¹*año⁻¹, donde el 98 % del área de estudio presentó niveles de erosión relativamente bajas y sólo el 12 % del total presentó problemas de alta erosión.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. Cuenca

Gaspari *et al.* (2009) establecen que una cuenca es el área delimitada por una línea divisoria (parte aguas), donde las aguas producto de la precipitación se unen para formar una sola red hídrica y cada cauce tiene una pequeña área bien definida; además, no es solo aquella que drena de forma superficial a un mismo punto de salida, sino que también existe una subterránea con las mismas características semejante a la anteriormente descrita.

En 1989, el ingeniero Otto Pfafstetter acuñó el término de Unidad Hidrográfica, definiendo como aquella superficie que presenta una geografía y topografía con mayor elevación, la cual permite la delimitación del terreno utilizando líneas divisorias para identificar el drenaje hídrico de un espacio (Administración Local del Agua Barranca [ALA], 2015). Además, al conocer las características de una cuenca hidrográfica (área, forma, perímetro, pendiente y drenaje, de los cuales es necesario asociar la longitud y la pendiente), se puede clasificar a una cuenca en diferentes funciones como: hidrológica, ecológica, ambiental y socioeconómica (Araque, 2019).

1.2.2. Parámetros geomorfológicos de una cuenca

a. Área

Superficie plana que se plasma en una proyección horizontal basándose en sus divisorias más altas de un plano topográfico, su unidad de medida es kilómetro cuadrado (Gaspari *et al.* 2009); por otro lado, las divisorias de aguas o *Divortium Aquarum* por lo general no son regulares en una cuenca; sin embargo, estas permiten la delimitación del área (Villón, 2002).

b. Perímetro

Es la distancia que posee la línea divisoria de aguas de una cuenca, siendo definido por las cotas más altas que posee y que esta lo separa de otras cuencas (Gaspari *et al.* 2009).

c. Ancho medio

Como señala Villón (2002), el ancho medio se determina mediante la interacción de la superficie de la cuenca y la longitud del cauce principal; para ello se utiliza la siguiente fórmula:

$$A_m = \frac{A}{L}$$

Donde:

A_m = ancho medio de la cuenca, en km

A = área de la cuenca, en km^2

L = longitud del cauce principal, en km

d. Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (K_c)

De acuerdo con Villón (2002), el coeficiente de compacidad es un parámetro que se determina mediante la correlación entre el perímetro de una cuenca y el perímetro de un círculo; además, este parámetro tiene influencia directa con el tiempo de concentración y se determina con la siguiente fórmula:

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

K_c = coeficiente de compacidad o índice de Gravelius

P = perímetro de la cuenca, en km

A = área de la cuenca, en km^2

El coeficiente de compacidad se relaciona con el tiempo de concentración; por lo tanto, cuando $K_c = 1$, la forma de la cuenca tiende a ser circular y el tiempo de concentración disminuye. Mientras que, cuando $K_c > 1$, la forma de la cuenca tiende a ser alargada y el tiempo de concentración será mayor, lo cual dependiendo de otras características estas pueden provocar máximas avenidas; como así, también mayor escurrimiento (Villón, 2002). En la Tabla 1 se muestra los valores de K_c .

Tabla 1

Características de la cuenca en función a K_c

Valores de K_c	Forma	Características
1,00 - 1,25	Compacta o redonda a oval	Presentan peligros torrenciales altos
1,25 - 1,50	Oval redonda a oval	Presentan peligros torrenciales moderados
1,50 - 1,75	Oval oblonga a rectangular	Presentan peligros torrenciales bajos
> 1,75	Casi rectangular (alargada) Presentan peligros	Presentan peligros torrenciales muy bajos

Nota. Adaptado de la Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2010.

e. Factor de forma

Gaspari (2009) afirmó que el factor de forma no tiene unidad de medida (adimensional); además, se encuentra relacionado con el ancho medio de la cuenca y con la distancia de la red hídrica principal; para ello, se emplea la siguiente fórmula:

$$E_f = \frac{A_m}{L} = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

E_f = factor de forma

A_m = ancho medio de la cuenca, en km

A = área de la cuenca, en km^2

L = longitud del cauce principal en km

Cuando el factor de forma de una cuenca es elevado, tiende a presentarse precipitaciones muy intensas, las cuales pueden cubrir toda la superficie; del mismo modo, cuando el factor de forma es bajo, la concentración de intensidades de lluvias se reduce, debido a la presencia de otras cuencas de iguales características (Villón,2002). De acuerdo con las investigaciones de máximas avenidas realizadas en las cuencas hidrográficas de la vertiente del Pacífico, determinaron que el factor de forma está clasificado de acuerdo con las características de cada cuenca (Tabla 2) (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2010).

Tabla 2

Características de la cuenca, con valores de factor de forma

Factor de forma	Tipo de cuenca	Crecida
< 0,30	Rectangular alargada	Lentas
0,30 - 0,40	Oval	Sostenidas
0,40 - 0,50	Cuadrado con salida lateral	Rápidas
0,50 - 0,79	Circular o redonda	Intensas
0,79 - 1,00	Cuadrado con salida central	Muy Intensas

Nota. Adaptado de ANA (2010).

f. Longitud del cauce más largo

Es el recorrido más largo que desarrolla el curso del río, el cual parte desde el punto más alto aguas arriba, en dirección de las caídas que presenta la topografía, hasta llegar al punto más bajo (aforo) donde converge con otro curso de agua mayor (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2018).

1.2.3. Precipitación

La precipitación es toda humedad que se genera en las nubes por diferentes factores físicos y que llega hasta la superficie en diferentes formas como granizo, lluvia y nevados; es decir, se define como el agua aportada (hidrometeoro) a un terreno por diferentes formas de condensación (Maderey, 2005).

Para medir la precipitación existen diferentes instrumentos, dentro de los cuales, figuran los pluviómetros y pluviógrafos; el primer instrumento emplea un envase graduado con forma de embudo, el cual recoge y mide la precipitación; por otro lado, los pluviógrafos tienen un mecanismo con un recipiente que cuenta con un flotador, el cual marca las diferentes lecturas en un papel según va transcurriendo la lluvia (Maderey, 2005).

1.2.4. Suelo

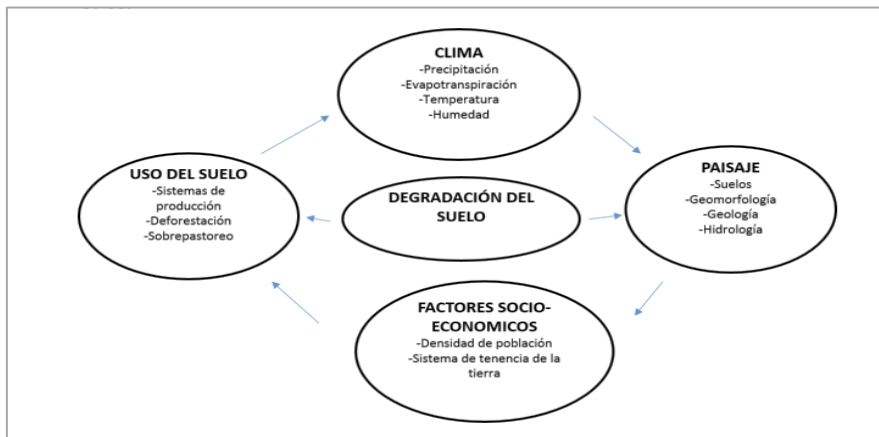
El suelo es considerado como un cuerpo natural tridimensional, el cual se encuentra constituido por agua, aire, materia orgánica, minerales y organismos; asimismo, es un recurso natural no renovable que ofrece el soporte necesario para el desarrollo y supervivencia de los seres vivos; además de diversos servicios ecosistémicos, como la participación en los ciclos biogeoquímicos, almacenamiento y filtración de agua, soporte de las actividades humanas, mantenimiento de la biodiversidad, etc. (Porta y López, 2005). El suelo es un cuerpo natural que se encuentra sobre la superficie de la corteza terrestre, producto de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, donde se desarrollan las plantas (Ortiz, 2015).

1.2.5. Degradación de suelos

La degradación del suelo es el proceso de disminución de su productividad biológica, física y química de acuerdo a su capacidad actual y/o futura, generado por procesos como la erosión del suelo, pérdida de la vegetación natural, detrimento de la calidad del agua, sobre explotación de acuíferos y salinización de suelo; todo esto a consecuencia de la acción antrópica (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2003). Además, representa la pérdida o disminución de la capa arable del suelo y la pérdida de material selecto, por diversas causas ambientales y socio económicas (Figura 1); por consiguiente, ocasiona la compactación de la superficie y la disminución de materia orgánica, por actividades de laboreo excesivo, entre otros factores (Porta y López, 2005).

Figura 1

Causas socio-económicas y ambientales que influyen en la degradación de los suelos



Nota: Adaptado de “Sequía en Nuevo León: Vulnerabilidad, Impactos y Estrategias de Mitigación. Instituto del Agua de Nuevo León”. Ortega-Gaucin, D. (2012).

1.2.6. Erosión hídrica

La erosión hídrica se define como la remoción laminar o en grandes masas de los elementos del suelo, el cual es producida por la energía de la precipitación del agua (lluvia); es decir, produce una erosión del suelo provocando su desgaste en periodos cortos de tiempo (Taypanta, 1993). Cisneros *et al.* (2012), define que la erosión hídrica produce el desprendimiento, transporte y deposición de suelo por diferentes agentes; los cuales se describen continuación:

a. La energía cinética de la gota de lluvia

La energía que produce una gota de lluvia se da cuando cae con fuerza hacia el suelo, provocando la ruptura de los terrones, ocasionando una salpicadura que desprende las partículas del suelo y que estas son arrastradas pendientes abajo, para luego ser depositados, dando origen a la formación de nuevas estructuras (Cisneros *et al.*, 2012).

b. La escorrentía

Es un proceso donde el agua ocasiona que el suelo se desprenda por factores como la cantidad de precipitación y la pendiente del terreno, lo que trae como consecuencia el transporte de gran cantidad de sedimentos, produciendo fenómenos como erosión en cárcavas, erosión laminar y turbulenta (Araque, 2019)

c. La gravedad

Es un factor que ocasiona el desprendimiento de masas; sobre todo, por la influencia de las altas pendientes y concentraciones de humedad de un terreno; por ejemplo, la erosión de meandros, avalanchas de nieve y deslizamiento de laderas (Troeh *et al.*, 1991).

1.2.7. Tipos de erosión hídrica

a. Erosión hídrica por movimiento de partículas

Según la Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (1967), la erosión hídrica por movimiento de partículas es el proceso de mover y transportar las partículas individualizadas del suelo, el cual puede presentarse en las siguientes formas:

- **Erosión Laminar.** Es la forma de desgaste más habitual, menos percibida y que probablemente ocasiona mayor transporte del suelo fértil (FAO, 1967). Por otro lado, este tipo de erosión es producido por el impacto de la precipitación sobre un suelo sin cobertura vegetal, ocasionando que las partículas sean transportadas por la escorrentía (Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales [IDEAM.], 2015).
- **Erosión por Surcos.** Se ocasiona por la presencia de pequeñas deformidades topográficas de un área, pendientes muy empinadas y precipitaciones de gran intensidad; además, el agua al concentrarse en las depresiones ocasiona un corte en el suelo para dar lugar a la formación de surcos, facilitando el transporte de las partículas hacia las partes más bajas. Este tipo de erosión se puede evitar con operaciones de labranza (IDEAM, 2015).
- **Erosión por Cárcavas.** Se presenta cuando aumenta el volumen y la velocidad del escurrimiento en aquellas zonas donde existe erosión laminar o por surcos; la cual ocasiona que los surcos aumenten y se formen acequias de mayor tamaño dando facilidades al transporte del suelo por acción de la escorrentía (IDEAM, 2015).
- **Erosión Fluvial.** Se produce en los cauces de las quebradas y ríos, ocasionando el transporte de material del lecho y de las riberas; es decir, el sedimento puede causar

inundaciones debido a que esta se sedimenta en el lecho produciendo el incremento del tirante de agua, originando el desborde de la quebrada o río (Cisneros *et al.*, 2012).

b. Erosión hídrica por transporte de masas

Es el transporte y movimiento de volúmenes de suelo que son ocasionados por la acción hídrica (Jumbo, 2018). Dentro del transporte de masas tenemos:

- **Derrumbes.** Es el desplome de masas de suelo por la alta pendiente y pérdida de equilibrio del talud, donde tiene influencia directa el agua que ocasiona la socavación del suelo.
- **Deslizamientos.** Es ocasionado cuando una masa de suelo contiene arcilla y la acción del agua produce que esta se deslice hacia la parte baja produciendo sedimentación.
- **Flujo de detritos o Huaycos.** Es cuando el suelo se humedece en las partes con alta pendiente y se forma un fluido viscoso que al mezclarse con el material sólido se escurren a la parte baja.
- **Mixtos.** Se produce cuando influyen otros tipos de erosión como los huaycos que ocasionan represamientos y los aluviones; por otro lado, la nieve o hielo ocasiona las avalanchas; además, cuando las masas del suelo se desprenden por partículas se denominan reptación.

Es importante señalar que la erosión laminar y en surcos ocasionan mayor daño al suelo, debido al impacto directo en la pérdida de nutrientes y materia orgánica (Dourojeanni y Paulet, 1967).

1.2.8. Erosión hídrica del suelo

La erosión hídrica puede ser definida como un proceso en el cual se desprende las partículas del suelo y se arrastra de forma acelerada por acción de factores como el agua, el viento y también de las condiciones que se encuentre el terreno; es decir, indica que el suelo es un elemento pasivo; a diferencia del agua, el viento y otros factores que se consideran activos

y que la cobertura vegetal actúa como un regulador entre ambos (IDEAM, 2015).

1.2.9. Factores que intervienen en la erosión hídrica

El proceso de erosión hídrica depende de diferentes factores como la pendiente que presenta el terreno, el tipo de precipitación, características edafológicas del suelo y las prácticas de conservación que se realizan en una superficie de terreno (Jumbo, 2018).

1.2.10. Actividades antrópicas que ocasionan la pérdida de suelo

De acuerdo con Solano (2016), las actividades como la agricultura y ganadería no sustentable están ocasionando la disminución de la cobertura vegetal; razón por el cual, las precipitaciones sobre áreas descubiertas incrementan la erosión en los suelos. Dentro de las actividades antrópicas que ocasionan pérdida de suelo figuran:

a. Agricultura

Esta actividad tiene una fuerte incidencia en la pérdida de suelo, como consecuencia de los trabajos intensivos e invasivos que no involucran técnicas de manejo de suelos, facilitando al proceso erosivo por acción hídrica al compactarse los suelos (Flores, 2015).

b. Ganadería

El sobrepastoreo y la falta de manejo de la ganadería ocasionan que el suelo pierda sus propiedades de protección, ocasionando la pérdida de la cobertura vegetal e incrementando su compactación y desprotección frente a la acción del agua (Solano, 2016).

c. Deforestación

Es una de las principales actividades que ocasiona la pérdida de las propiedades edáficas del suelo; es decir, cuando se extrae la vegetación (madera), ocasiona un desbalance entre el suelo y el contenido de materia orgánica; por otra parte, la superficie al encontrarse desprotegida y debido a la acción de las precipitaciones, se produce la erosión del suelo desnudo (Llerena *et al.*, 2010).

1.2.11. Modelos de evaluación de erosión hídrica

La modelación del proceso de erosión hídrica en el suelo permite visualizar de manera detallada los diferentes factores que intervienen en dicho proceso; es por ello, que los modelos se pueden emplear para la elaboración de proyectos de conservación, estudios de clasificación de la erosión y el ordenamiento del recurso; asimismo, se pueden emplear para predecir procesos erosivos y así poder realizar futuras investigaciones. Según Moreira (1991) existen dos modelos de evaluación de erosión hídrica:

- a. **Modelos cualitativos:** Este modelo se utiliza para realizar diagnósticos, utilizando diferentes datos y resulta una opción bastante ágil para la toma de decisiones con respecto a la erosión.

- b. **Modelos cuantitativos:** Este modelo es muy importante ya que permite obtener datos numéricos, evaluar directa o indirectamente la erosión hídrica y estimar un marco referencial para la toma de decisiones.

1.2.12. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

Wischmeier y Smith (1978), en la investigación denominada “Predicción de pérdidas por erosión de lluvia: una guía para la planificación de la conservación”, la cual desarrolló en áreas pequeñas de Estados Unidos, encontró un procedimiento para la predicción de la erosión laminar; a la cual denominó Universal Soil Loss Equation (USLE). Este método permitió calcular las pérdidas de suelo en el área de estudio por acción de la erosión hídrica, y posteriormente, fue adaptada para cuencas y tierras agrícolas, principalmente en aquellas tierras de cambio de uso y manejo de suelos.

Asimismo, la ecuación USLE es un método para evaluar y estimar la pérdida de suelo a causa de la erosión hídrica, en función del tipo de suelo, intensidad de precipitaciones, cobertura vegetal, pendientes y prácticas conservacionistas para una determinada superficie; esto evidencia la pérdida de suelo expresada en toneladas métricas por hectárea y año ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$), y no es permitida para un año en particular o un evento específico. La ecuación USLE valora la pérdida de suelos ocasionado por la escorrentía superficial de ríos, quebradas

y riachuelos, sin considerar las formas de erosión en cárcavas y barrancos; asimismo, no estima el traslado de sedimentos a través de la red fluvial ni la erosión producida en esta red (FAO, 2015). Esta cuantificación se puede expresar en niveles (Tabla 3):

Tabla 3

Nivel de erosión hídrica según la FAO

Nivel de erosión	Tasa (t*ha⁻¹*año⁻¹)
Leve	0-5
Moderada	5 - 25
Media	25-50
Alta	50-100
Muy alta	100-200
Crítica	>200

Nota. Basado en Calle (2021). Efecto de los cambios de uso de suelo en el aumento de la erosión hídrica a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos en la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas Namballe

De acuerdo con el método USLE, los factores que ayudan a estimar la tasa de pérdida de suelo (A) son: la erosividad de la lluvia (R), la erodabilidad del suelo (K), cobertura vegetal (C), longitud e inclinación de pendiente (LS) y por último las prácticas de conservación (P), tal como se expresa en la siguiente fórmula.

$$A = R * K * C * LS * P$$

Donde:

A = Tasa de pérdida de suelo

R = Erosividad de la lluvia

K = Erodabilidad del suelo

C = Cobertura vegetal

LS = Longitud e inclinación de pendientes

P = Prácticas de conservación

a. Factor R. Representa la erosividad de lluvia ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$), es decir, la energía cinética que posee una gota al chocar con el suelo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2016). Por otro lado, para el cálculo de R se necesita la energía total de la lluvia caída y la intensidad máxima en 30 minutos; considerando que esta información no está disponible en la mayoría de lugares, se requiere hallar su valor con datos como la precipitación anual o el índice modificado de Fournier (Arnoldus, 1978). De acuerdo con la FAO se representa con siguiente fórmula (Flores, 2015):

$$\text{IMF} = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t}$$

Donde:

IMF = Índice Modificado de Fournier

P_i = Precipitación media mensual (mm)

P_t = Precipitación media anual (mm)

I = Mes

Álvarez (2019), menciona que el IMF y R, tienen una buena correlación, ya que esta representa mejor los valores de precipitación y la acción que tiene esta en el suelo. Los valores de la erosividad pueden ser encontrados utilizando la ecuación de Ramírez (2006), expresado en la siguiente fórmula:

$$\text{EI30} = \sum_{12}^1 30.4(\text{IMF}) + 28.3$$

Donde:

EI30 = Erosividad en $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}$

IMF = Índice modificado de Fournier (promedio mensual)

Almoza *et al.* (2016), proponen clasificar los resultados de la erosividad en niveles (Tabla 4).

Tabla 4

Clasificación del factor R

Valores de R	Clasificación
$\leq 2\ 452$	Erosividad baja
2 452 - 4 905	Erosividad media
4 905 - 7 357	Erosividad media-fuerte
7 357 - 9 810	Erosividad fuerte
$> 9\ 810$	Erosividad muy fuerte

Nota. Basado en Almoza *et al.* (2016). Caracterización energética de las precipitaciones en la erosión de la cuenca del Cuyaguaje.

b. Factor K. La erodabilidad del suelo se refiere a la vulnerabilidad que posee el suelo frente a la erosión hídrica. Asimismo, el valor de K refleja la tasa de pérdida de suelo provocado por el factor R (Parveen y Kumar, 2012); también, se encuentra relacionado con las propiedades físicas del suelo (textura, materia orgánica, porosidad) (Shabani *et al.*, 2014).

Según Millward y Mersey (1999), para la determinación del factor K se requiere contar con información de las características del suelo como la textura (porcentaje de arena, limo y arcilla) y el contenido de materia orgánica; por lo tanto, es necesario realizar un análisis de laboratorio de las muestras de suelo que se tomen en campo y así poder aplicar la fórmula de Williams (1995), la cual ayudará a obtener el valor de K:

$$K = 0,1317fcsand * fcl - si * forgc * fhisand$$

Donde:

Fcsand = contenido de arena

Fcl-si = contenido limo-arcilla

Forgc = contenido de carbono orgánico

Fhisand = contenido en relación con la arena

Fórmula para calcular el contenido de arena

$$fcsand = (0,2 + 0,3 \exp[-0,0256ms(1 - \frac{msilt}{100})])$$

Donde:

ms = porcentaje de arena

msilt = porcentaje de limo

Fórmula para calcular el contenido de limo-arcilla

$$fcl - si = (\frac{msilt}{mc + msilt})^{0,3}$$

Donde:

msilt = porcentaje de limo

mc = porcentaje de arcilla

Fórmula para calcular el contenido de materia orgánica

$$forgc = [1 - \frac{0,25orgC}{orgC + \exp[3,72 - 2,95orgC]}]$$

Donde:

Orgc = porcentaje de carbono orgánico

Fórmula para calcular el contenido en relación con la arena

$$fhisand = [1 - \frac{0,70(1 - \frac{ms}{100})}{(1 - \frac{ms}{100}) + \exp[-5,51 + 22,9(1 - \frac{ms}{100})]}]$$

Donde:

ms = porcentaje de arena

Flores (2015), con los valores de la erodabilidad, se pueden clasificar según la normativa USDA y obtener el grado de susceptibilidad del suelo a ser erosionado (Tabla 5)

Tabla 5

Clasificación de la erodabilidad según USDA

Valor de K	Clasificación
0,007902	Muy poco erodable
0,0079 - 0,0171	Débilmente erodable
0,0171 - 0,0329	Medianamente erodable
0,0329 - 0,0684	Fuertemente erodable
0,0684 - 0,1027	Extremadamente erodable

Nota. Elaboración propia basada en Flores (2015). Aproximación de riesgo por erosión hídrica aplicando un sistema de información geográfica en la subcuenca Shambillo, distrito de Padre Abad

c. Factor LS. Representa el factor topográfico (LS), donde L es la longitud de pendiente y S la inclinación de pendiente; además, el factor topográfico del terreno está directamente relacionado con la erosión del suelo (Moore y Wilson, 1992; Mitasova *et al.*, 1996). Para el cálculo del factor LS se emplean unidades inglesas, las cuales no son habituales en varios países, por lo que recomienda utilizar fórmulas que calculen por separado el LS (Arnoldus, 1977); además Zhang *et al.* (2013) propuso calcular el LS a partir de un algoritmo basado en el flujo utilizando un modelo de elevación digital (DEM), en donde se procesará las pendientes y así obtener el resultado.

Ramos (2001) recomienda utilizar el procedimiento de Mintegui (1983), ya que este modelo fue elaborado en España por la Cátedra de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid; donde emplearon un DEM y lograron hallar la inclinación del terreno, para luego correlacionarlo con el mapa de pendiente; finalmente, obtuvieron como resultado una tabla con los valores del factor LS en función de la pendiente. Por otro lado, Renard *et al.* (1997) utilizó información satelital para calibrar los datos, al separar el L y S aplicando sus fórmulas y mejorando la precisión; a continuación, se presentan las fórmulas propuestas por Renard:

➤ Fórmula para el cálculo de la longitud

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + d^2)^{M+1} - A_{(i,j)}^{M+1}}{X^M * d^{M+2} * (22, 13)^M}$$

Donde:

d = Resolución espacial del PIXEL del DEM

A = Raster de acumulación de flujo

X = 1

➤ Fórmula Subfactor M:

$$M = \frac{F}{(1 - F)}$$

➤ Fórmula del Subfactor F:

$$F = \frac{\frac{\sin\beta}{0,0896}}{3(\sin\beta)^{0,8} + 0,56}$$

Donde:

β = La pendiente en radianes

➤ Fórmula para el cálculo de la gradiente de pendiente (S)

$$S = \begin{cases} 10,8 \sin\beta_{(i,j)} + 0,03 & \text{Sí } \tan\beta_{(i,j)} < 0,09 \\ 16,8 \sin\beta_{(i,j)} - 0,5 & \text{Sí } \tan\beta_{(i,j)} \geq 0,09 \end{cases}$$

Donde:

β = La pendiente en radianes

d. Factor C. La cobertura vegetal del suelo representa el estado de protección de un área (Instituto para la Conservación de la Naturaleza [ICONA.], 1982). “C” es el segundo factor más importante que controla el riesgo de erosión del suelo después de K; además, este generalmente oscila entre 0 y 1, donde 0 indica que hay gran densidad de cobertura

y 1 indica que no hay presencia de esta. El factor C también refleja el efecto de las prácticas y manejo de los diferentes cultivos; es decir, estas actividades inciden en la cuantificación de suelo perdido por erosión (Biesemans *et al.*, 2000; De Jong, 1994; Patil y Sharma (2013).

Para su cálculo, Van der Knijff *et al.*, (2000) recomiendan el uso de la teledetección, mediante el empleo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI); el cual se relaciona con la densidad de biomasa verde presente en un área de estudio e indica los diferentes tipos de cobertura vegetal, para ello se utiliza la siguiente fórmula:

$$C = \exp \left[\alpha \cdot \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)} \right]$$

Donde:

$$\alpha = 2$$

$$\beta = 1$$

Álvarez (2016), menciona que el NDVI es un buen indicador de la biomasa presente en un área determinada, el cual dependiendo del valor obtenido propone caracterizar la cobertura vegetal que se presenta en la zona de estudio (Tabla 6).

Tabla 6

Características de la cobertura vegetal según el valor del NDVI

Característica de la cobertura vegetal	Tipo de cobertura según densidad	Rangos de NDVI
Cuerpos sin cobertura vegetal	Áreas urbanas lagunas, ríos	< 0
Áreas rocosas, arenosas con mínima cobertura vegetal	Áreas sin cobertura vegetal	0 – 0,1
Áreas pobres con arbustos o pastura natural	Pajonal	0,1 – 0,2
Áreas con árboles y arbustos	Áreas Forestales	0,2 – 0,3
Áreas donde la vegetación se encuentra en un estado de gran vigor y densidad	Bofedales	> 0,3

Nota. Elaboración propia basada en Álvarez (2019). Análisis temporal del nivel de la Erosión Hídrica de la Subcuenca del río Ichu 2013 y 2017.

- e. **Factor P.** El empleo de prácticas de manejo de suelo minimiza el efecto del agua en el suelo, el modelo USLE incluye entre sus parámetros el factor "P" que corresponde a prácticas de conservación en tres situaciones: el empleo de labranza (cultivo en contorno), fajas de cultivo en contorno y el empleo de terrazas (Wischmeier y Smith, 1978).

Por otro lado, el factor P evita la erosión del suelo ocasionado por la escorrentía del agua mediante efectos del contorno; estos pueden ser mediante la utilización de las franjas y terrazas en los cultivos, evidenciados en los mapas de uso de tierra (Kuok y Chiu, 2013). Si no existe algún mecanismo para evitar la erosión del suelo, el valor P debe ser 1 ya que este se considera incierto (Jumbo, 2018).

1.2.13. Erosión hídrica actual

La erosión hídrica actual es la dimensión de la pérdida de suelo que existe en un área específica, esto depende de las acciones y presiones en la que se encuentra el suelo. Esta erosión hace referencia a la correlación que concurre entre el factor de erosividad de las lluvias (factor R), el factor de erodabilidad del suelo (factor K), el factor de longitud y pendiente del terreno (factor LS) y el factor de cobertura y uso del suelo (factor C); es decir, se obtiene mediante el método USLE (Corporación Autónoma Regional del Tolima, 2007).

1.2.14. Erosión hídrica potencial

La erosión potencial es una evaluación de la erosión bajo situaciones posibles de uso y manejo de la tierra, ya que no participa en su cálculo los factores de cobertura y uso del suelo (factor C). Este tipo de erosión hace referencia a la relación que existe entre el factor de erosividad de las lluvias (factor R), el factor de erodabilidad del suelo (factor K) y el factor LS o de longitud y gradiente de la pendiente del terreno (Corporación Autónoma Regional del Tolima, 2007).

Este índice se puede emplear como un estimador de la erosión actual del suelo en aquellas áreas catalogadas como de “erosión no aparente”, también refleja la potencialidad que tiene el suelo a ser erosionado (Flores *et al.*, 2010).

1.2.15. Sistema de Información Geográfica (SIG)

El SIG es un sistema computarizado, que utiliza software y hardware para manipular los datos que contengan información de localización y sus diferentes atributos; además, este sistema permite la entrada, almacenamiento, representación, descripción de atributos y salida de datos espaciales; finalmente, se representa con mapas de acuerdo con especificaciones y requerimientos que se necesite (Olaya, 2014). Un SIG puede plasmarse como un modelo de información del entorno geográfico, en el cual, se puede realizar diferentes trabajos e investigaciones concretas; es decir, consiste en crear, compartir y aplicar la información de los datos ya procesados y plasmarlo en mapas para su mejor comprensión (Burrough, 1994).

Un SIG es un conjunto de herramientas, el cual está compuesto por hardware, software, datos y usuarios, que admite capturar, acumular, administrar y analizar información digital; así como, efectuar gráficos y mapas, además de representar datos alfanuméricos (López, 2015).

1.2.16. Elementos Del SIG

- a. **Hardware:** Representa la parte física donde se asienta el GIS; asimismo, este viene acompañado de un conjunto de complementos como escáneres, computadoras, tabletas, impresoras, graficadores, unidades de almacenamiento y procesamiento de datos, y así se pueda aprovechar la potencia operativa de los GIS (Maguire, 1991).
- b. **Software:** El software o programa, es el encargado de realizar el manejo y operación de los datos; además, el usuario debe tener el adecuado dominio realizar las operaciones correspondientes. Existe una gran cantidad de paquetes de SIG, todos estas tienen muchas operaciones en común, pero cada uno con diferente forma de procesar los datos espaciales (Harmon y Anderson, 2003).
- c. **Dato:** Es el más importante, ya que sobre este se van a realizar todas las operaciones correspondientes para presentar una información adecuada al tipo de estudio que se quiere conseguir (Rowley y Gilbert, 1989). Según Gómez y Barredo (2005), la disponibilidad de información es un factor importante a la hora de realizar un proyecto; ya que, de este depende que el SIG aporte como herramienta para la ejecución de un proyecto.

d. Usuario: Este es representado por las personas expertas, las cuales son encargadas de la implementación, diseño y uso del SIG. Son los especialistas que a partir de los datos espaciales obtenidos tienen la función de gestionar y desarrollar las posibilidades que ofrecen los SIG; deben producir resultados, soluciones, selecciones, análisis, etc. (Maguire *et al.*, 1991).

1.2.17. Teledetección

La teledetección es la ciencia y el arte de obtener información acerca de un objeto, área o fenómeno sin estar en contacto directo con la zona de estudio, todo esto mediante los datos adquiridos por sensores remotos (Chuvienco y Salinero, 1996). Las ventajas que ofrecen los sensores remotos son muy reconocidas ya que te brindan datos de forma clara y te ahorran tiempo y recursos, pero existen algunas desventajas ya que en muchos casos algunos factores no se pueden medir directamente; asimismo, está condicionados por muchos factores ambientales en los cuales dificulta la obtención de información (Lillesand y Kiefer, 1994).

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la investigación

La presente investigación fue desarrollada con un diseño de tipo no experimental; dado que, no existió manipulación de las variables; además, estuvo fundamentada en la observación de los fenómenos que ocurrieron en la zona de estudio, tal y como se originaron, para después ser analizadas. También, la investigación fue longitudinal de panel o transeccional exploratorio, porque se describió las variables bajo estudio sin manipularlas. El enfoque de la investigación fue cuantitativo de tipo correlacional, donde la pérdida del suelo causado por la erosión hídrica otorgó un dato cuantitativo (Hernández *et al.*, 2010).

2.2. Lugar y fecha

La investigación fue realizada entre los meses de enero a diciembre del 2021 en la subcuenca del río Negro, ubicado en los distritos de Elías Soplín Vargas y Rioja, parte alta de la subcuenca del río Mayo, perteneciente a la provincia de Rioja, en la parte nororiental del departamento de San Martín (Figura 2), con un área de 302,42 km², el área de estudio se ubica en el Datum WGS84 zona UTM 18 sur, con coordenada mínima 243314,85 E – 9342687,99 N y máxima 252819,15 E – 9320618,73 N, a una altitud promedio de 1230 m s.n.m.

2.2.1. Clima

La zona de estudio presentó una temperatura media entre 22 a 32 °C, donde la precipitación anual osciló entre 1000 y 1400 mm al año; asimismo, las mayores precipitaciones se registraron entre los meses de diciembre a mayo; finalmente, la temporada de estiaje se registra entre los meses de junio y noviembre (SENAMHI, 2020).

2.2.2. Ecología

Parte de la subcuenca del río Negro (83,81 km²) pertenece al Bosque de Protección Alto Mayo (BPAM), área que busca proteger las cuencas hidrográficas; siendo el río Negro uno de los afluentes de mayor importancia del río Mayo por la vegetación boscosa, la vida silvestre y los valores paisajísticos de la zona, para promover el turismo, la recreación, la educación, la investigación, a fin de generar beneficios para los pobladores locales. (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas [SERNANP], 2019).

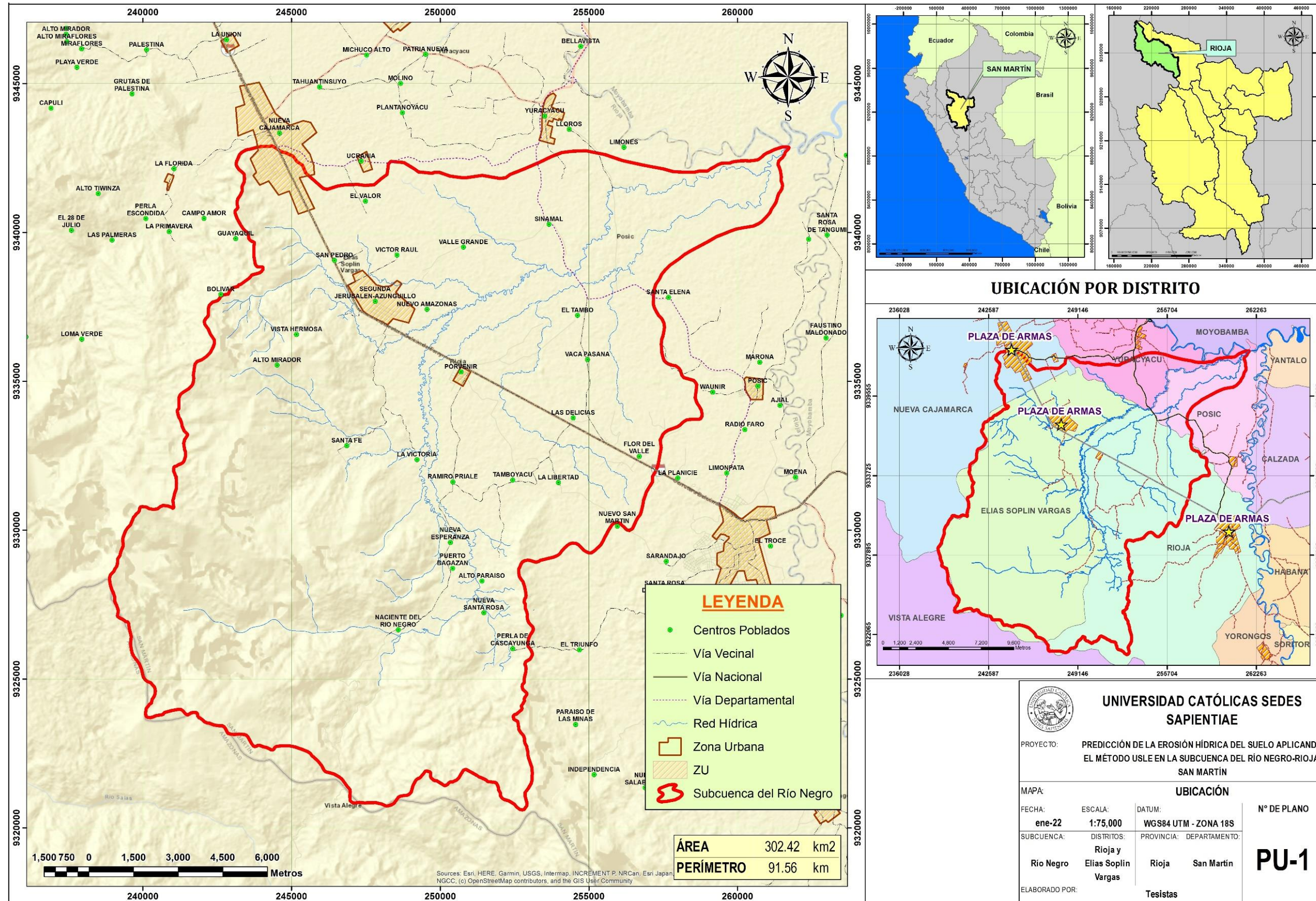
BPAM que se caracteriza por presentar maravillosos paisajes y espectaculares formaciones geológicas, con una particular flora y fauna con varios elementos únicos, existe gran variedad de orquídeas y entre la variada fauna se cuenta con la presencia de especies amenazadas como el “mono choro de cola amarilla” *Lagotrix flavicauda*, el “guacharo” *Steatornis caripensis*, el “oso de anteojos” *Tremarctos ornatus*, el “gallito de las rocas” *Rupícola peruviana*, entre otras (SERNANP, 2019).

2.2.3. Actividades económicas

Según Rojas *et al.* (202), los cultivos que más predominan en el Valle del Altomayo, vienen representados por el arroz, café y pastos, estos dos primeros cultivos son los de mayor demanda en el mercado local, y los excedentes son comercializados a otras regiones; otros cultivos como maíz, yuca, frejol, aguaje, entre otros son de subsistencia para la población local, ya que estos no son comercializados a gran escala.

Figura 2

Mapa de ubicación de la Subcuenca del río Negro



2.3. Materiales y equipos

Los diferentes materiales y equipos utilizados para el desarrollo de esta investigación fueron:

a. Materiales

- Modelo de Elevación Digital (MED) con resolución de 30 x 30 m obtenido de la página del MINAM;
- Libreta de notas.

b. Equipos

- Laptop Toshiba Core i5, Procesador de 64 bits
- Sistem Global Position (GPS)
- Cámara fotográfica

c. Softwares

- Software ArcGIS 10,5
- Google Earth pro
- Software Microsoft Excel 2017
- Software Microsoft Word 2017

2.4. Población y muestra

a. Población

La población estuvo conformada por la Subcuenca del río Negro con un área aproximada de 30 248,18 ha y un perímetro de 91,56 km, el cual abarca los distritos de Elías Soplín Vargas y Rioja, provincia de Rioja, departamento de San Martín.

b. Muestra

- **Factor de Erosividad (R).** Para calcular el Factor (R) se obtuvo información de precipitación mensual en mm de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio (Tabla 7); cabe señalar, que inicialmente fueron consideradas 10 estaciones, pero al realizar la recolección de la información solo seis contenían datos en base a 10 años de registro; dicha información fue obtenida del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI] (2020).

Tabla 7

Estaciones Meteorológicas empleadas en la investigación

Estación	Coordenadas UTM		
	X	Y	Z (m s.n.m.)
Soritor	267927,55	9320441,1	902
Jepelacio	288891,16	9323957,5	1057
Naranjillo	234971,02	9357241,5	880
Leymebamba	190298,88	9275102	2800
Rioja	259593,17	9331089	823
Moyobamba	282153,63	9331448,4	879

Nota. Adaptada a partir de datos proporcionados por el SENAMHI (2020)

- **Factor de Erodabilidad (K).** Para determinar este factor, se utilizó la serie de suelos del Alto Mayo obtenida de la Zonificación Ecológica Económica (ZEE) de la cuenca el Alto Mayo, realizado por el Proyecto Especial Alto Mayo [PEAM] (2007); en la cual, se identificó los tipos de suelos y sus características edafológicas dentro del área de estudio; además, se realizó el análisis de 13 puntos de muestreo de suelo dentro de la Subcuenca del río Negro y se extrajeron 3 submuestras por cada punto, para poder obtener los datos de textura y contenido de materia orgánica; de esta manera, se corroboró y actualizó la información primaria; además, cada muestra fue georreferenciada con GPS y enviadas al laboratorio del Proyecto Especial Alto Mayo (PEAM) para su respectivo análisis.

2.5. Técnicas e instrumentos

Para el desarrollo de la presente investigación, se consideró los criterios establecidos por Villaseñor (2008), el cual consiste en lo siguiente:

- a. **Análisis documental.** Los datos recolectados fueron obtenidos de fuentes primarias como página de instituciones del estado, estudios de investigación, empresa y otros; asimismo, de fuentes secundarias (libros, boletines, publicaciones periódicas, folletos y periódicos).

- b. **Observación o investigación de campo no experimental.** Se empleó para ampliar el conocimiento del comportamiento de la exploración; además, para el cálculo de la cantidad de suelo y pérdida por la erosión hídrica, se recolectaron todos los datos correspondientes por cada factor para ser calculados. En el caso de la precipitación, se envió una solicitud al SENAMHI a fin de que ésta proporcione los datos meteorológicos de las estaciones considerados para la presente investigación; asimismo, para el cálculo de la deforestación se empleó imágenes satelitales Landsat 8, de las cuales se utilizó las bandas de Rojo Visible e Infrarrojo Cercano, realizados en el software SIG ArcMap.

- c. **Análisis estadístico.** Se hizo uso de los paquetes estadísticos disponibles en Microsoft Excel como el coeficiente de correlación, también se realizó el cálculo de la precipitación promedio mensual, donde a cada proceso se aplicaron las diferentes fórmulas, considerando el análisis a realizar.

2.6. Descripción de la investigación

El desarrollo de la investigación se detalla a continuación:

a. Recopilación de la información

En esta fase se realizó la recopilación y revisión bibliográfica de diferentes estudios, documentos publicados de forma directa e indirecta relacionados al ámbito de estudio, también, se investigó acerca de las características climáticas, ecológicas e hidrográficas de la subcuenca. Posterior a ello, se definió los objetivos, requerimientos, metodologías y los

demás ítems que fueron necesarios para el desarrollo del proyecto.

Recolección de la información cartográfica se detalla a continuación:

- Se adquirió las cartas nacionales con escala 1:100 000 de la plataforma de información geoespacial del Ministerio del Ambiente; asimismo.
- Un Modelo de Elevación Digital (DEM) con una resolución espacial de 30 x 30 m SRTM de la página de la NASA, se le realizó el proceso de corrección del raster como el relleno de sumideros, dirección de flujo y acumulación del flujo, empleando el módulo Hydrology en el Software ArcMap.
- Imagen satelital Landsat 8 de la plataforma de la NASA USGS (septiembre 2021), el cual pasó por un proceso de corrección geométrica y de reflectancia al tope de la atmósfera (TOA), con ayuda de las herramientas del Software ArcMap.

Información Meteorológica se detalla a continuación:

- Datos de precipitación mensual de las estaciones más cercanas al área de estudio (Soritor, Jepelacio, Naranjillo, Leymebamba, Moyobamba, Rioja y Rodríguez de Mendoza), obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)

Información Edafológica se detalla a continuación:

- Se obtuvo la data de la serie de suelos de la Zonificación Ecológica y Económica (ZEE) San Martín.

De esta manera, se realizó la delimitación y cálculo del área de la subcuenca mediante la divisoria de aguas; así como, las vías de acceso, pendientes, precipitación. Finalmente, se elaboró el mapa de suelos para la identificación de los puntos de muestreo a partir de la serie de suelos del Alto Mayo.

b. Trabajo en campo

En esta fase se realizó la toma de muestras de suelo de 13 puntos distribuidos en la subcuenca (ver Apéndice 1), donde se elaboraron calicatas de 20 x 20 x 20 cm; además, por cada punto se tomaron 3 submuestras a fin de poder contar con un promedio total (ver Apéndice 2). Estas muestras se colocaron en bolsas de plástico con su respectiva etiqueta (ver Apéndice 3); finalmente, fueron enviados al laboratorio del PEAM para los análisis respectivos en cuanto a textura y materia orgánica.

c. Trabajo en laboratorio

Esta fase consistió en analizar las muestras de suelos, teniendo en cuenta todas las variables de estudio en el Laboratorio de Suelos Agrícolas del Proyecto Especial del Alto Mayo (PEAM), localizado en el distrito de Nueva Cajamarca, provincia de Rioja, departamento de San Martín. Las muestras de suelo obtenidas colocadas en platos de porcelana para ser secados a una temperatura ambiente por 03 días, posterior a ello, las muestras de suelo secas fueron trituradas en morteros de porcelana, se tamizaron y se almacenaron en un lugar adecuado (ver Apéndice 4); finalmente, se realizaron los análisis de textura y determinación de materia orgánica (ver Apéndice 5), considerando las metodologías indicadas el Decreto Supremo N° 013-2010-AG (2010). El procedimiento se detalla a continuación:

➤ Determinación de la textura de suelo

Para la determinación de la clase textural se manipuló las muestras de suelo según el método de Bouyoucos, que se basa en la “Ley de Darcy”; por lo cual, se registró la densidad de la suspensión agua-suelo con un hidrómetro en diversos tiempos, esto de acuerdo con la velocidad en que caen las partículas (Sánchez, 2014). El procedimiento utilizado para la determinación de la textura del suelo se detalla a continuación:

- Se pesó 50 g de muestra de suelo y se colocó en un vaso de precipitado.
- Se adicionó 15 ml de hexametáfosfato de sodio al 10 % (solución dispersante) a la muestra de suelo en el vaso de precipitado.
- A continuación, se agregó agua destilada al vaso, hasta las tres cuartas partes del volumen.

- De acuerdo con la textura, se agitó por 5 minutos (para suelos arenosos o de textura gruesa) y 10 minutos (para suelos arcillosos o con textura muy fina).
- Seguidamente, se transfirió el contenido a una probeta de 1 litro de capacidad y se aforó con agua destilada.
- Posteriormente, se agitó manualmente el contenido de la probeta y se sumergió el hidrómetro en la solución por un tiempo de 40 segundos; acto seguido, se tomó la temperatura con un termómetro para correcciones posteriores.
- Luego, se tomó la primera lectura del hidrómetro al finalizar los 40 segundos.
- Finalmente, se dejó reposar 4 horas y se volvió a tomar lecturas del hidrómetro y la temperatura.

➤ **Determinación de contenido de materia orgánica**

Se determinó a través del procedimiento propuesto por Walkley-Black, el cual radica en la combustión húmeda de la materia orgánica mediante la utilización del dicromato de potasio y evaluación del dicromato residual, esta última se determinó mediante la titulación con una solución de sulfato ferroso amoniacal $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Eyherabide, 2014). El procedimiento realizado se detalla a continuación:

- En un matraz Erlenmeyer de 250 ml se colocó 1,0 g de muestra de suelo seco y con la ayuda de una macropipeta se agregó 10 ml de dicromato de potasio al 1N.
- Seguidamente, en la cámara de bioseguridad se adicionó 10 ml de ácido sulfúrico al matraz y se agitó manualmente por 1 minuto.
- A continuación, se adicionó 10 ml de dicromato de potasio 1N a la muestra que se tornó de un color verde intenso, dejando reposar en la cámara de bioseguridad por 1 hora.
- Transcurrida 1 hora, se incrementó agua destilada hasta los 100 ml y se dejó reposar por 24 horas.
- Posteriormente, con la macropipeta se extrajo 10 ml de la solución muestra, se colocó en un vaso de precipitado de 25 ml y se añadió 3 gotas de sulfato ferroso amoniacal.
- Finalmente, se tituló con sulfato ferroso al 0,5 N y se anotó la cantidad utilizada.

d. Trabajo en gabinete y procesamiento de datos

En esta última fase se realizó el análisis de datos obtenidos y luego se procesó toda la

información indispensable combinando las variables edafológicas (textura y materia orgánica), cobertura, pendiente y la precipitación, para obtener la información concerniente a los riesgos por erosión; para ello, se utilizó los soportes informáticos y sistemas de información geográfica para así procesar todos los datos y obtener la pérdida de suelo por erosión hídrica, los cuales fueron plasmados en un contenido digital mediante mapas temáticos para su mejor comprensión. Los procedimientos realizados se detallan a continuación:

➤ **Delimitación de la Subcuenca**

La delimitación de la subcuenca del río Negro, se realizó mediante la utilización de software ArcGIS 10.3 con la herramienta Hydrology, para ello, fue necesario el Modelo de Elevación Digital de 30 m de resolución espacial SRTM; inicialmente, se realizó la corrección del raster (picos, valores atípicos, depresiones) y luego se realizó el cálculo de la red de drenaje y finalmente el procesamiento del área de la cuenca, el cual fue de 302,42 km² y con un perímetro de 9156 km.

➤ **Determinación de parámetros geomorfológicos**

Los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Negro requeridos para la investigación fueron: el perímetro, factor de forma, longitud del río principal y coeficiente de compacidad; considerados por Villón (2002), Monsalve (1995) y Aparicio (1989). Los cuales se detallan a continuación:

Tabla 8*Parámetros geomorfológicos de la subcuenca del río Negro*

Parámetro	Valor	Unidad
Coordenada UTM - centroide X	249066,97	m
Coordenada UTM - centroide Y	9332668,24	m
Factor forma	0,11	-
Longitud de río principal	53,30	km
Coefficiente de compacidad	1,48	-
Cota mínima	815	m s.n.m.
Cota máxima	2500	m s.n.m.
Cota media	1 236,198	m s.n.m.

Nota: Elaboración propia a partir del Modelo de Elevación Digital de 30 m de resolución espacial SRTM

➤ **Aplicación del método USLE**

Para calcular la pérdida anual del suelo en la subcuenca del río Negro se realizó la multiplicación de los factores del modelo, la cual se representa mediante siguiente fórmula:

$$A = R * K * LS * C * P$$

Donde:

A = Pérdida media anual de suelo expresado en ($t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$);

R = Erosividad de la lluvia medido en ($MJ \cdot mm \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$);

K = Erodabilidad del suelo expresado en ($t \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$);

LS = Longitud y gradiente de la pendiente, sin unidades de medida;

C = Cubierta vegetal y manejo del recurso, sin unidades de medida;

P = Prácticas de conservación aplicada, sin unidades de medida.

Las fórmulas aplicadas a cada uno de los factores del método USLE se detallan a continuación en la Tabla 9:

Tabla 9*Factores del método USLE*

Factores USLE	Fórmulas
Erosividad de la lluvia	<p>Índice Modificado de Fournier (IMF) (Arnoldus, 1978)</p> $\text{IMF} = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t}$ <p>Ecuación de Ramírez (2006).</p> $\text{EI30} = \sum_{12}^1 30,4(\text{IMF}) + 28,3$ <p>Fórmula de Williams, 1995</p>
Erodabilidad del suelo	$K = 0,1317fcsand * fcl - si * forgc * fhisand$
Longitud y gradiente de la pendiente	<p>Fórmulas de Renard <i>et. al.</i> (1997)</p> $L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + d^2)^{M+1} - A_{(i,j)}^{M+1}}{X^M * d^{M+2} * (22,13)^M}$ $S = \begin{cases} 10,8 \sin\beta_{(i,j)} + 0,03 & \text{Sí } \tan\beta_{(i,j)} < 0,09 \\ 16,8 \sin\beta_{(i,j)} - 0,5 & \text{Sí } \tan\beta_{(i,j)} \geq 0,09 \end{cases}$
Cobertura vegetal	<p>Utilizando el DEM del satélite Landsat 8 se procesó en el programa ArcMap y se determinó el NDVI para así caracterizar a la subcuenca y aplicar la siguiente formula:</p> <p>Fórmula de Van Der Knijff <i>et al.</i> (2000):</p>
Prácticas de conservación aplicada	$C = \exp \left[\alpha \cdot \frac{\text{NDVI}}{(\beta - \text{NDVI})} \right]$ <p>Se identificaron las posibles prácticas de conservación para en base a ello otorgar el valor más apropiado.</p>

Nota. Elaboración propia basada en Álvarez (2019). Análisis temporal del nivel de la Erosión Hídrica de la Subcuenca del río Ichu 2013 y 2017.

➤ **Determinación del Factor R**

Para el cálculo de la Erosividad, se recopiló información de precipitación en mm/año de 07 estaciones meteorológicas, ubicadas cerca al área de estudio (Soritor, Jepelacio, Naranjillo, Leymebamba, Moyobamba, Rioja y Rodríguez de Mendoza), con un registro de 10 años de antigüedad (ver Apéndice 6); seguidamente, se calculó el promedio anual de precipitación en cada una de las estaciones (ver Apéndice 7).

Posteriormente, se realizó un proceso de análisis de consistencia (coeficiente R^2) entre las estaciones y la estación patrón, esta última se empleó como base el promedio mensual de todas las estaciones (ver Apéndice 8). Se encontró una consistencia alta con la estación Rioja, Naranjillo, Jepelacio y Moyobamba (Figuras 3, 4, 5 y 6); por otro lado, existió una consistencia media con las estaciones de Leymebamba y Soritor (Figura 7 y 8), y una consistencia baja con la estación de Rodríguez de Mendoza (Figura 9).

Figura 3

Consistencia entre estación Patrón y estación Rioja

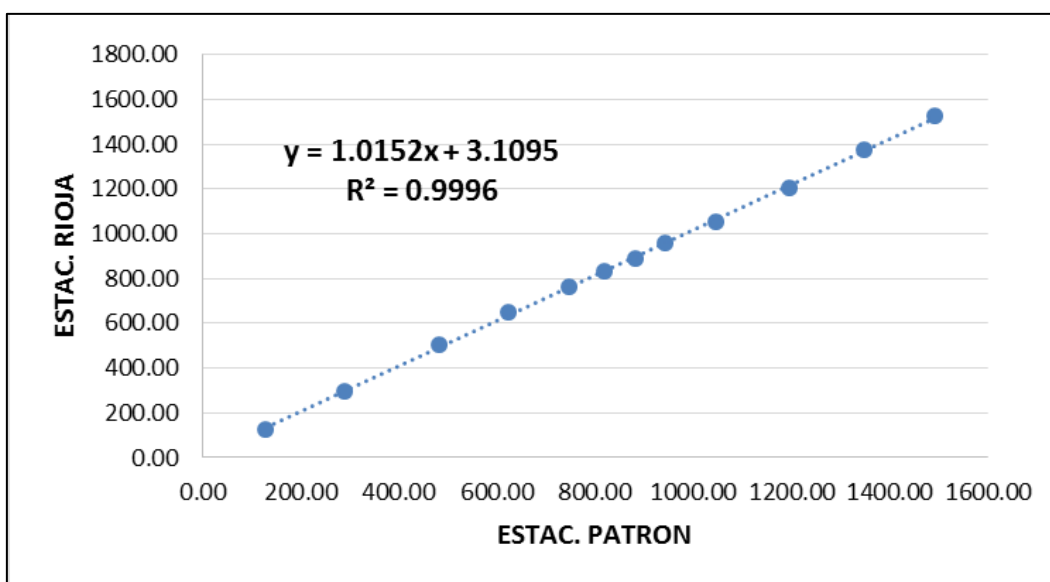


Figura 4

Consistencia entre estación Patrón y estación Naranjillo

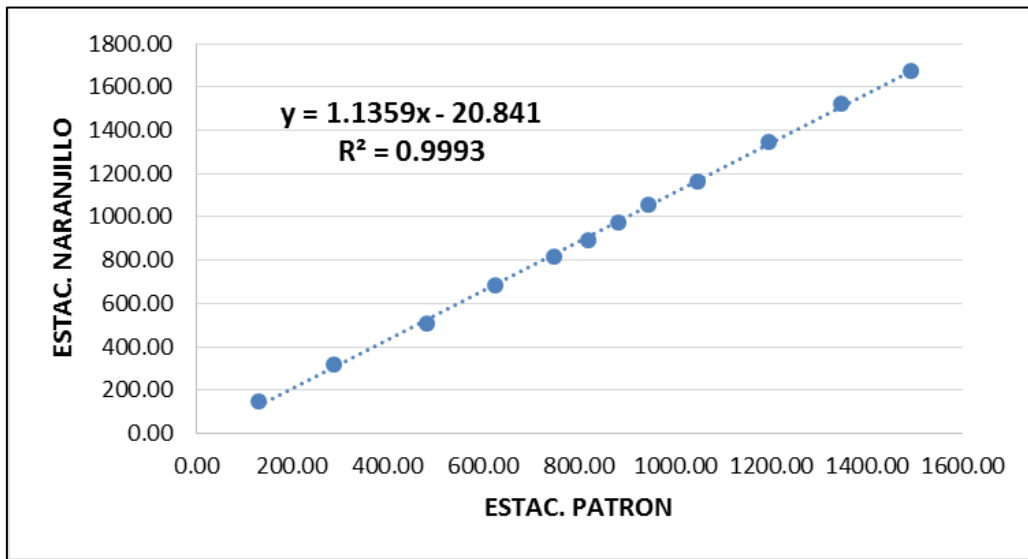


Figura 5

Consistencia entre estación Patrón y estación Jepelacio

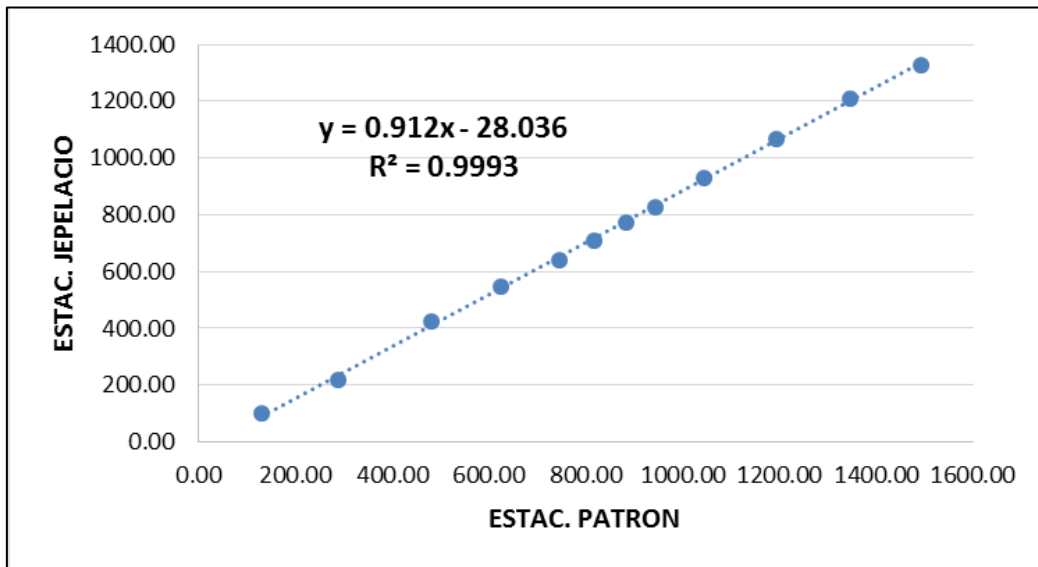


Figura 6

Consistencia entre estación Patrón y estación Moyobamba

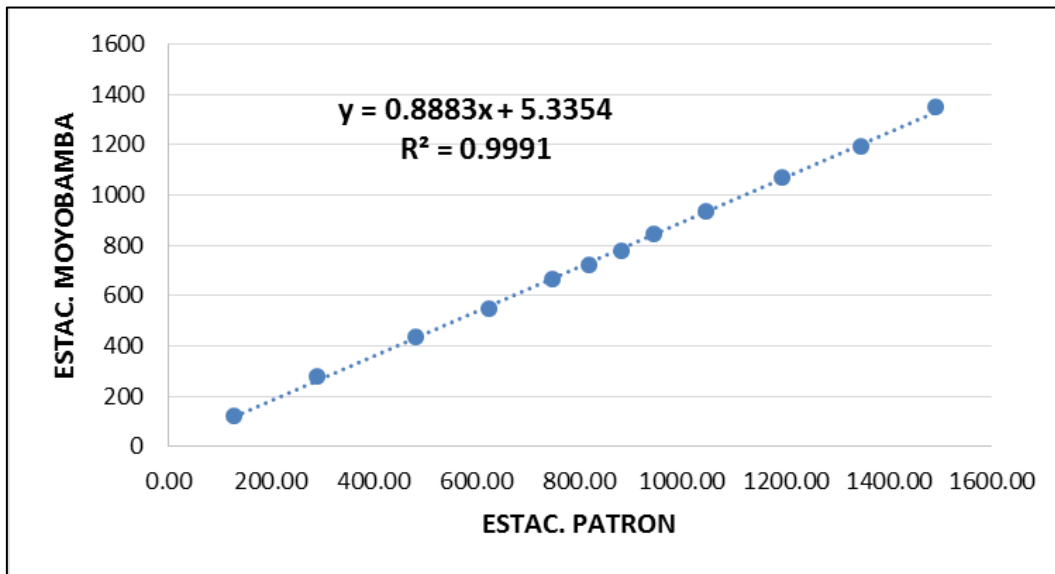


Figura 7

Consistencia entre estación Patrón y estación Leymebamba

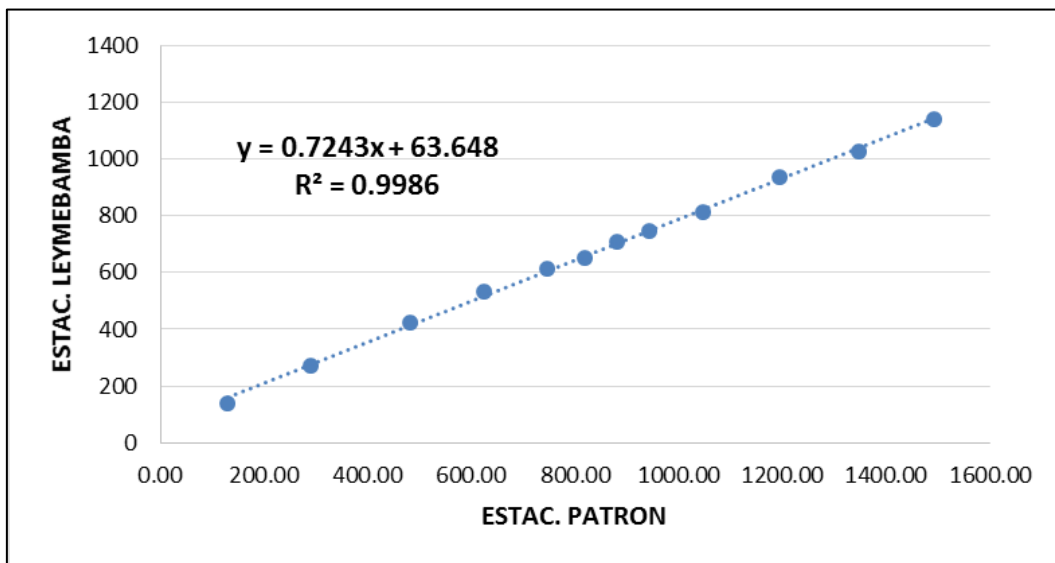


Figura 8

Consistencia entre estación Patrón y estación Soritor

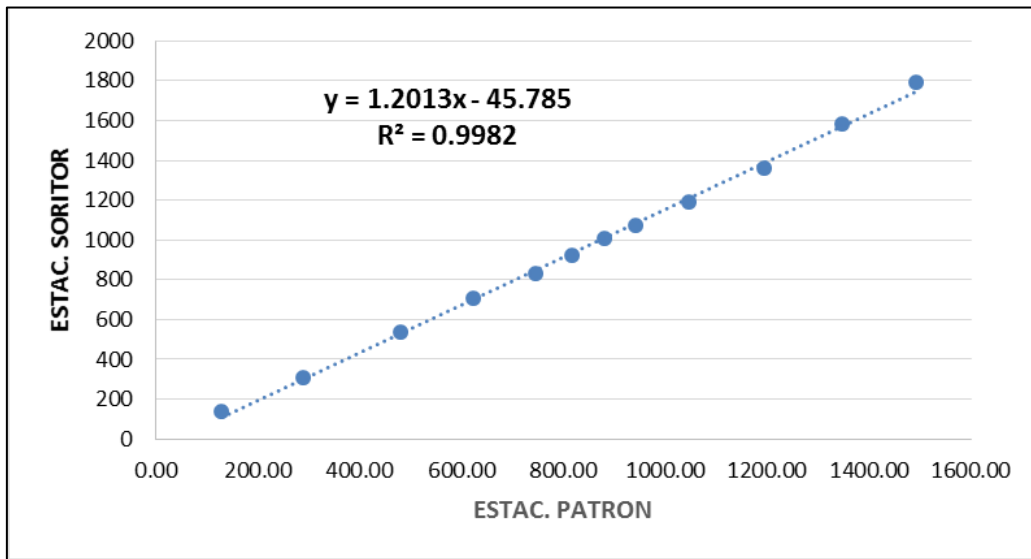
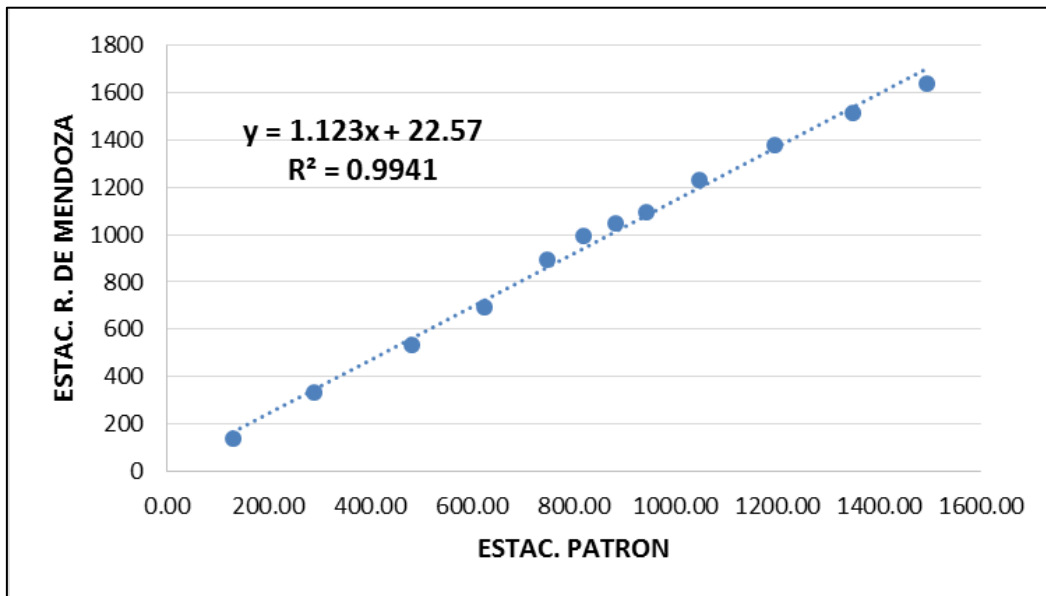


Figura 9

Consistencia entre estación Patrón y estación Rodríguez de Mendoza



Con los datos obtenidos, se determinó que la estación de Rodríguez de Mendoza contó con una correlación baja con respecto a las demás estaciones, por lo que dicha estación no se consideró para el cálculo del factor R. Con las estaciones más consistentes (Soritor, Jepelacio, Naranjillo, Leymebamba, Rioja, Moyobamba), se realizó el cálculo para hallar el índice de Fournier, utilizada por Arnoldus (1978) (ver Apéndice 9), el cual fue necesario para poder determinar el factor R.

$$\text{IMF} = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t}$$

Donde:

IMF = Índice Modificado de Fournier

P_i = Precipitación media mensual (mm)

P_t = Precipitación media anual (mm)

I = Mes

Realizado los diferentes cálculos con ayuda del programa Microsoft Excel, se obtuvo como resultado el IMF de cada estación meteorológica (ver Apéndice 10). Luego, se elaboró el mapa de isoyetas para conocer la precipitación promedio y distribución espacial en la cuenca, a través de la herramienta "Spline" del ArcMap 10.3 (ver Apéndice 11 y 12). Con información obtenida del IMF de las estaciones meteorológicas, se generaron 15 estaciones adicionales las cuales fueron distribuidas en forma aleatoria dentro de la subcuenca (ver Apéndice 13 y 14), aplicando así la ecuación de ajuste, para luego agregarlos en el programa ArcMap 10.3, con los cuales se realizó una interpolación (kriging lineal), en donde se creó un raster de precipitación promedio (mm) en toda la subcuenca, estableciendo así un mapa de isoyetas (ver Apéndice 15).

Con las estaciones dentro de la cuenca, se realizó una interpolación con las isoyetas generadas anteriormente y se obtuvo como resultado el IMF por cada una de las estaciones generadas. Luego se realizó el cálculo del factor R utilizando la ecuación de Ramírez (2006), expresado en la siguiente fórmula:

$$\text{EI30} = \sum_{12}^1 30.4(\text{IMF}) + 28.3$$

Donde:

EI30 = Erosividad en MJ*mm*ha⁻¹

IMF = Índice modificado de Fournier

➤ **Determinación del Factor K**

Para el cálculo de este factor, se utilizó la información de la serie de suelos del Alto Mayo, establecida por el PEAM (2007); en donde se visualiza 11 tipos de suelos dentro de la subcuenca (Tabla 10) (ver Apéndice 16); seguidamente, se realizó los cálculos del área y porcentaje a fin de poder conocer su área de influencia. La serie de suelo del Alto Mayo contó con las siguientes características: porcentaje de arena, limo, arcilla y materia orgánica (ver Apéndice 17).

Tabla 10

Serie de suelos presentes en el área de estudio

Descripción	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	M O (%)
Suelo Calera I	64	14	8	4,2
Suelo Valle Grande - Nuevo Tambo (60 – 40 %)	16	46	34	2
Suelo Nuevo Tambo - Renacal (70 – 30 %)	30	30	46	7,24
Suelo Cerro Amarillo	48	28	22	1,36
Suelo Alto Mayo - Rumi Bajo (70 – 30 %)	22	56	14	4,14
Suelo Aguajal	24	66	16	8,41
Suelo Renacal - Aguajal (50 – 50 %)	37	36	48	4,4
Suelos Habana - Porvenir (60 – 40 %)	18	40	26	6,2
Renacal	30	30	46	7,24
Porvenir	76	26	6	1,17
Suelos Nipón I	34	32	18	1,72

Nota. Elaborado a partir de la serie de suelos obtenida de la ZEE Alto Mayo (PEAM, 2007).

Para actualizar los datos que posee la serie de suelos, se optó por muestrear el suelo de la subcuenca en donde se desarrollaron 15 puntos, a través del método al Azar; de los cuales, se obtuvieron 39 submuestras por cada punto; a continuación, las muestras fueron secadas bajo sombra y enviadas al laboratorio del PEAM – Nueva Cajamarca; para luego realizar un promedio por cada submuestra.

Posterior a ello, para definir el factor K se utilizó la ecuación propuesta por Williams (1995), donde se necesitó contar con los datos de porcentaje de textura y porcentaje de materia orgánica, los cuales fueron extraídos del análisis de suelos. Contando con los análisis de

suelos, se actualizó la tabla de textura y materia orgánica de la serie de suelos dentro de la subcuenca (ver Apéndice 18). Una vez actualizada los valores de la serie de suelos, se procedió al cálculo del factor K, utilizando la fórmula propuesta por Williams (1995).

➤ **Determinación del Factor LS**

Para determinar este factor, se utilizó como materia prima el Modelo de Elevación Digital con una resolución espacial de 30 m; asimismo, con ayuda del software ArcGIS se realizó los procesos de corrección del DEM (relleno de sumideros, dirección de flujo y acumulación del flujo), utilizando el módulo Hydrology en el Software ArcMap (Flores, 2015; Jumbo, 2018). Una vez realizado el proceso de corrección del DEM; posteriormente, con ayuda del módulo Map Algebra (Calculadora raster) en el software ArcMap, se aplicó las fórmulas propuestas por Renard *et. al.* (1997) y los valores propuestos por Mintegui (1983), el cual permitió determinar los valores de LS en función de la pendiente (Tabla 11).

Tabla 11

Cuadro de valores del factor LS

Tabla de valores	
Gradiente de Pendiente (%)	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
Más de 100	28,5

Nota. Elaboración basada en Mintegui (1983). Análisis de la influencia del relieve en la erosión hídrica. Hipótesis de estudio para correlacionar la pendiente con la longitud de declive en un terreno.

Para determinar el valor del factor LS, fue necesario calcular cada uno de los Subfactores F y M; es por ello por lo que, se utilizó las fórmulas de Renard *et. al.* (1997) para hallar los valores de longitud y pendiente, los cuales fueron adquiridos de un DEM de 30 m x 30 m, descargado de la página del Ministerio del Ambiente (MINAM). Una vez calculado los Subfactores y obtenidos los mapas (ver Apéndice 19 y 20), estos fueron utilizados para hallar el factor “L” y “S”, utilizando la fórmula de Renard *et. al.* (1997). Finalmente, se calcularon los valores de “L” y “S” en formato raster y se procedió a multiplicarlos para obtener el factor LS de la subcuenca, obteniéndose los mapas de cada factor (ver Apéndice 21 y 22).

➤ **Determinación del factor C**

Para este factor se utilizó el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en la imagen Landsat 8 de 30 m x 30 m de resolución espacial, donde se requirió las bandas 4 (rojo visible) y 5 (infrarrojo cercano) para poder diferenciar las coberturas de suelo del área de estudio, según las características de estas (ver Apéndice 23). Los valores del NDVI estuvieron en el intervalo de -1 a +1, donde los que se acercaron a la unidad negativa, fueron aquellos suelos desnudos y cuerpos de agua; por otro lado, los valores que se aproximaron a la unidad positiva fueron las vegetaciones sanas sin afectación antrópica o natural.

Para la determinación del valor de C, se empleó la fórmula de Van Der Knijff *et al.* (2000), el cual requirió el NDVI de la imagen seleccionada. Todo este procedimiento fue realizado en el software ArcMap 10,5, con ayuda de la herramienta Map Algebra.

➤ **Determinación del factor P**

Para este factor se asumió el valor 1; dado que, en la Subcuenca del río Negro no se identificó ninguna práctica o proyecto para la conservación de suelos.

2.7. Identificación de las variables y su mensuración

En la presente investigación se emplearon variables cuantitativas, debido a que se expresaron numéricamente. Dentro de las variables identificadas tenemos:

a. Variable dependiente: Pérdida de suelo

Para la obtención de esta variable se calculó la cantidad de suelo erosionado por la acción hídrica, con ayuda de software ArcGIS se computarizó los diferentes factores que tenía el modelo USLE.

Para clasificar los tipos de cultivos se empleó imágenes satelitales Landsat 8, a las cuales se le realizó el proceso del NDVI para su respectiva clasificación según su espectro (tipo de cultivo que se presentó en la zona); seguidamente, para identificar el tipo de suelo en el área de estudio se empleó el shape de la serie de suelos del Alto Mayo, el cual fue actualizado realizando análisis de muestras de suelo obtenidas en campo; asimismo, para determinar el factor topográfico se utilizó un DEM de 30 m de resolución espacial, a la que se aplicó diferentes procedimientos. El procesamiento de la información fue realizado con ayuda del software ArcGIS 10,3 y Microsoft Excel 2019.

b. Variable independiente: Precipitación

Para calcular la cantidad de agua precipitada anualmente en la subcuenca del río Negro, se identificó las estaciones meteorológicas más cercanas y se recolectó información meteorológica del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI); posteriormente, estos datos fueron procesados en el software ArcGIS 10,3 y Microsoft Excel 2019, con la finalidad de crear las isoyetas con la información de la precipitación promedio en el área de estudio.

c. Variable independiente: Deforestación

El área deforestada en la subcuenca del río Negro fue calculada en hectáreas; asimismo, los datos fueron recolectados de los shapes que se encontraron en la página del MINAM y estos fueron procesados en el software ArcGIS 10,3.

En la Tabla 12 se visualiza el resumen de las variables de estudio.

Tabla 12*Resumen de variables de estudio*

VARIABLES	DIMENSIÓN	UNIDADES DE MEDIDA	
Dependiente	Perdida del suelo	Cantidad de suelo erosionado	$t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$
Independiente	Precipitación	Cantidad de agua precipitada	Milímetros (mm)
	Deforestación	Área deforestada	Hectáreas (ha)

Nota. Elaboración propia basada en Calle (2021). Efecto de los cambios de uso de suelo en el aumento de la erosión hídrica a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos en la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas Namballe.

2.8. Análisis estadístico de datos

El valor de cada uno de los factores del método USLE fue determinado de manera directa con el uso del programa ArcGIS 10,3 y Microsoft Excel 2019; para ello, fue necesario la generación de archivos tipo raster; seguidamente, los datos fueron multiplicados mediante la herramienta Map Algebra del software ArcMap, donde se logró determinar la cantidad de suelo que se perdió en la subcuenca del río Negro.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Estimar el índice de erosividad (R) en la Subcuenca del río Negro

En la Tabla 13 se muestran los resultados de la determinación del factor R, donde la erosividad de la lluvia en la subcuenca del río Negro osciló entre los 4 389,40 y 4 487,38 MJ*mm*ha⁻¹*año⁻¹. Los valores más elevados fueron aquellas zonas de mayor altitud, en donde se presentó mayor precipitación; además, se puede apreciar la distribución de la precipitación por cada estación generada. Para hallar el factor de erosividad, se utilizaron datos de precipitación de 6 estaciones meteorológicas más consistentes (Soritor, Jepelacio, Naranjillo, Leymebamba, Rioja y Moyobamba) y se realizaron los diferentes cálculos (ver Apéndice 9); posteriormente, se aplicó la metodología del Índice Modificado de Fournier (IMF) propuesto por Arnoldus (1978) y finalmente con la ecuación de Ramírez (2006), se encontraron los valores de la Erosividad.

Tabla 13

Valores del factor R en la subcuenca del río Negro

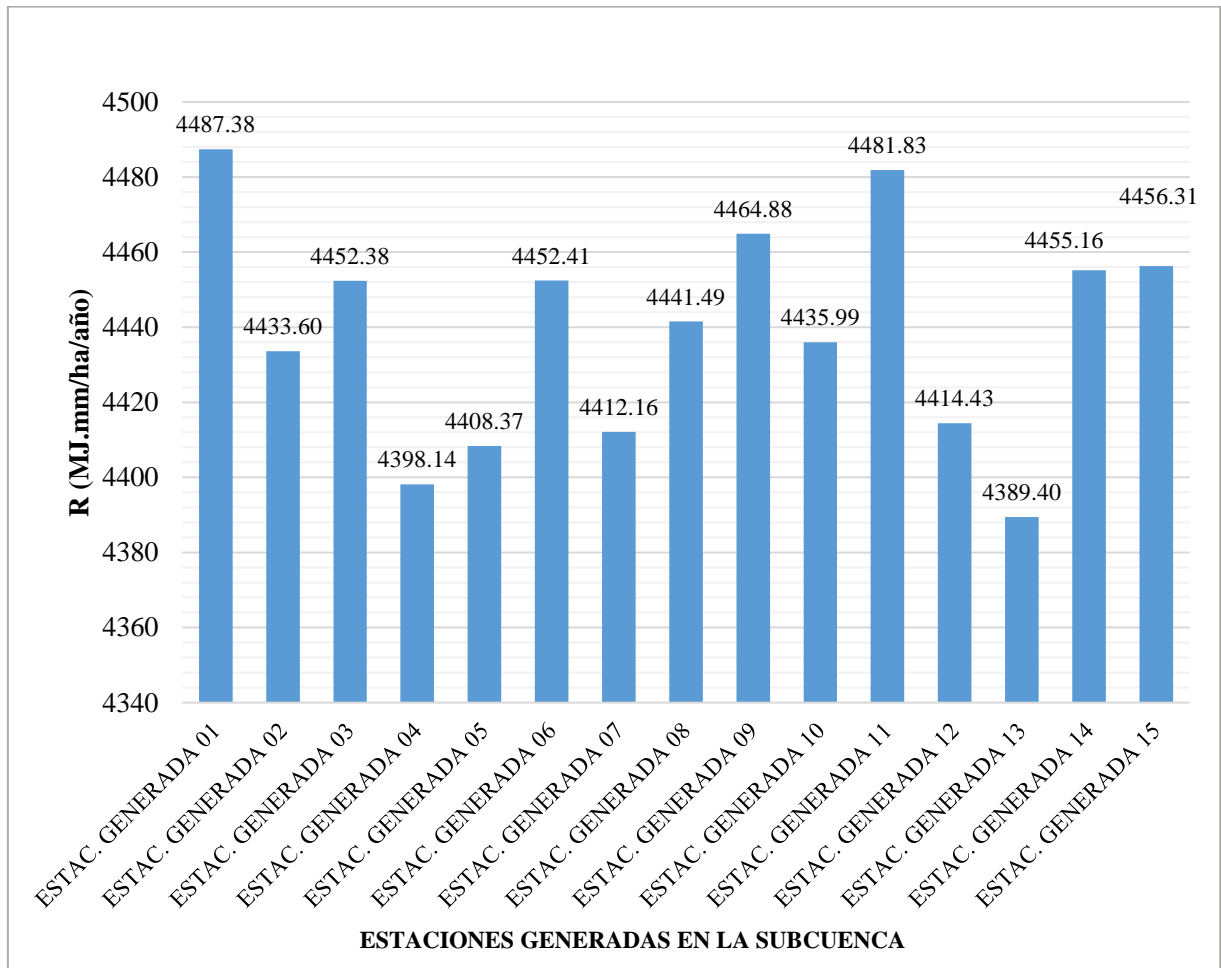
Estaciones	Precipitación	IMF	Factor R (MJ*mm*ha ⁻¹ *año ⁻¹)
Estac. Generada 01	1568,891	146,680	4487,38
Estac. Generada 02	1554,671	144,911	4433,60
Estac. Generada 03	1563,544	145,529	4452,38
Estac. Generada 04	1536,266	143,745	4398,14
Estac. Generada 05	1539,054	144,081	4408,37
Estac. Generada 06	1568,442	145,530	4452,41
Estac. Generada 07	1545,237	144,206	4412,16
Estac. Generada 08	1555,848	145,171	4441,49
Estac. Generada 09	1563,470	145,940	4464,88
Estac. Generada 10	1560,935	144,990	4435,99
Estac. Generada 11	1588,538	146,498	4481,83
Estac. Generada 12	1543,583	144,281	4414,43
Estac. Generada 13	1537,171	143,457	4389,40
Estac. Generada 14	1569,112	145,620	4455,16
Estac. Generada 15	1563,439	145,658	4456,31

Nota. Elaboración propia basada en datos proporcionados por el SENAMHI (2020).

En la Figura 10 se muestra la distribución del factor R de las estaciones que se generaron dentro de la subcuenca, donde se identificó que la estación generada 01, obtuvo el mayor valor de R con $4\,487,38 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$; por otro lado, el menor valor de R se visualizó en la estación generada 13 con un valor de $4\,389,40 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$.

Figura 10

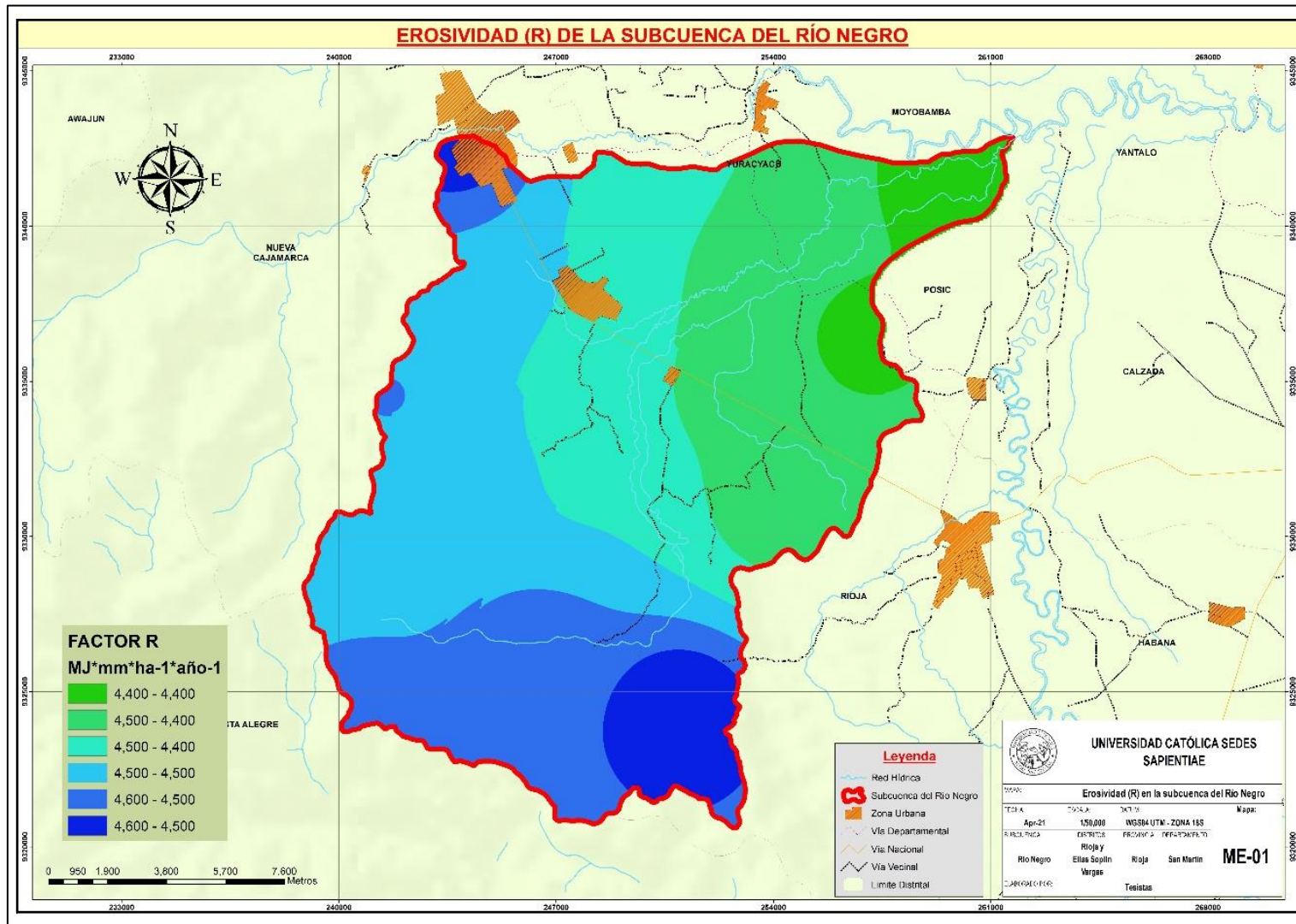
Distribución del factor R por cada estación generada



En la Figura 11 se puede distinguir que la distribución del valor R en la parte baja de la subcuenca tiene un valor de $4\,389,40 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ y la parte alta un valor de $4\,487,38 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, esto indica que hay una acción significativa de la lluvia en la subcuenca y que, en la parte más alta se produce mayor acción de la lluvia (precipitación).

Figura 11

Mapa de erosividad en la subcuenca del río Negro



3.2. Calcular el valor de la erodabilidad del suelo (K), en la Subcuenca del río Negro

En la Tabla 14 se muestran los resultados de la determinación del factor K, donde se visualiza 11 tipos de suelos dentro de la subcuenca. El valor mayor fue para el suelo Porvenir, con un total de $0,022 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$, el cual corresponde a un área de 722,485 ha, equivalente al 2,39 % del total de la subcuenca; donde sus características texturales presentaron mayor porcentaje en arena, con relación al limo y arcilla; por otro lado, el valor mínimo correspondió al suelo Calera I, con $0,014 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$; con un área de 15 458,517 ha, equivalente al 51,11 % del total, el cual presentó mayor porcentaje de arena en su textura (Figura 12 y 13); finalmente, se evidenció que la subcuenca presentó suelos arenosos, los cuales fueron susceptibles a la erosión. Para actualizar los datos que presentaba la serie de suelos, se optó por muestrear y analizar 15 puntos dentro del área de estudio; posterior a ello, se definió el factor K ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$) con los datos actualizados de las series de suelos, empleando la ecuación propuesta por Williams (1995).

Tabla 14

Valores de factor K en la subcuenca del río Negro

Descripción de Suelos	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	M.O. (%)	K ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$)
Suelo Calera I	55	18,1	26,9	4,2	0,014
Suelo Valle Grande - Nuevo Tambo (60 - 40%)	20	46	34	2	0,020
Suelo Nuevo Tambo - Renacal (70 - 30%)	25	30	45	7,24	0,015
Suelo Cerro Amarillo	15	20	65	1,36	0,015
Suelo Alto Mayo - Rumi Bajo (70 - 30%)	26	42	32	4,14	0,018
Suelo Aguajal	45	38	17	8,41	0,018
Suelo Renacal - Aguajal (50 - 50%)	39	29	32	4,4	0,016
Suelos Habana - Porvenir (60 - 40%)	26	44	30	6,2	0,019
Renacal	30	30	40	7,24	0,015
Porvenir	51,2	26,8	22	1,17	0,022
Suelos Nipón I	65	20	15	1,72	0,017

Nota. Elaboración propia a partir de la serie de suelos obtenida de la ZEE Alto Mayo (PEAM, 2007).

Figura 12

Valores de K según el tipo de serie de suelo en la subcuenca del río Negro

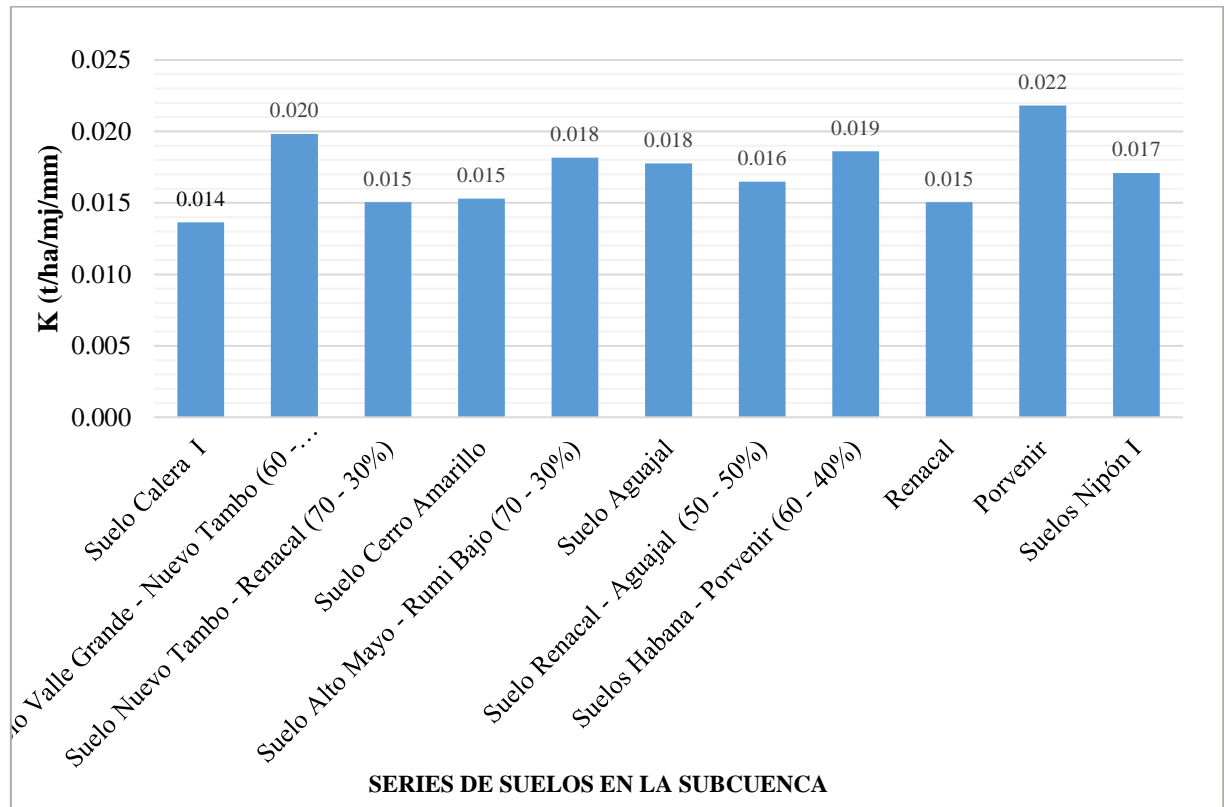
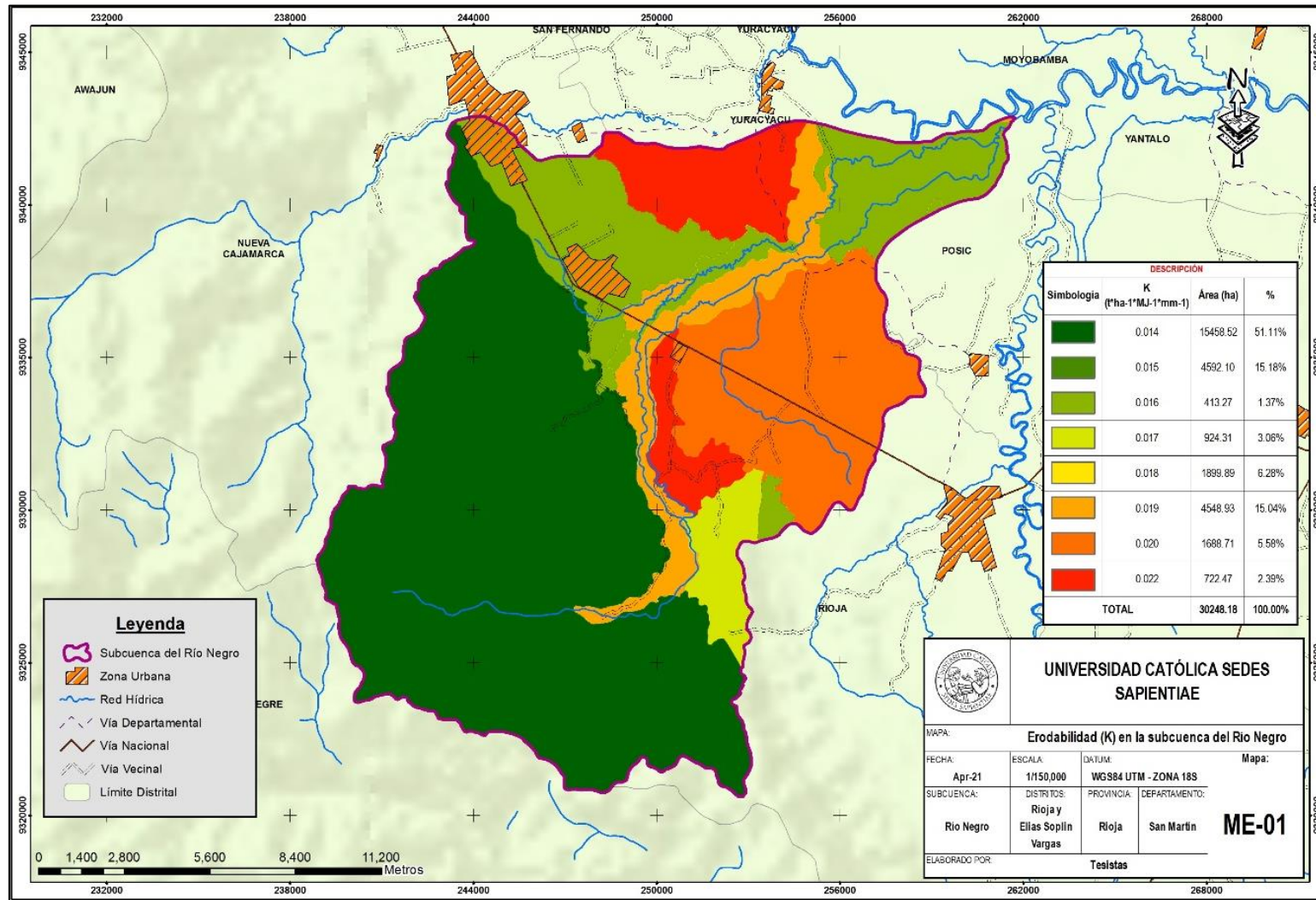


Figura 13

Mapa de erodabilidad del suelo en la subcuenca del río Negro



Nota. Elaboración propia partir de la serie de suelos obtenida de la ZEE Alto Mayo (PEAM, 2007).

3.3. Definir la longitud y gradiente de la pendiente (LS), en la Subcuenca del río Negro

La Tabla 15 y Figura 14 muestran los resultados de la determinación del factor LS, donde el valor más alto obtenido fue de 28,5, para un grado de pendiente mayor a 100 %, representando un área de 46,27 ha del total de la subcuenca del río Negro; por otro lado, el valor de LS más bajo obtenido fue de 0,3, para un grado de pendiente de 0 a 3 %, con un área de 6 300,49 ha. En contraste, el 0,2 % del total del área presentó pendientes mayores al 100 % y el 30,2 % restante del área de la subcuenca, presentó pendientes bajas, cuyos valores oscilaron desde 3-12 %.

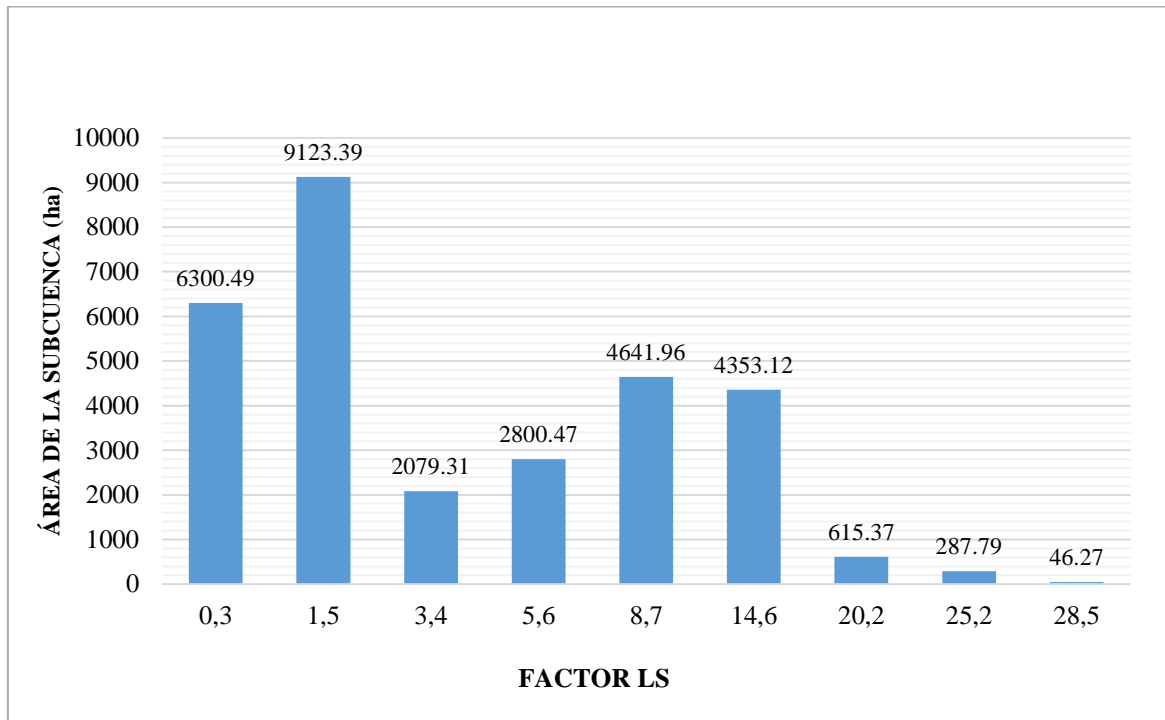
Tabla 15

Valores del factor LS en la subcuenca del río Negro

Grado de pendientes (%)	Factor LS	Área (ha)	Área (%)
0-3	0,3	6 300,49	20,8
3-12	1,5	9 123,39	30,2
12-18	3,4	2 079,31	6,9
18-24	5,6	2 800,47	9,3
24-30	8,7	4 641,96	15,3
30-60	14,6	4 353,12	14,4
60-70	20,2	615,37	2,0
70-100	25,2	287,79	1,0
>100	28,5	46,27	0,2
	Total	30 248,18	100,0

Figura 14

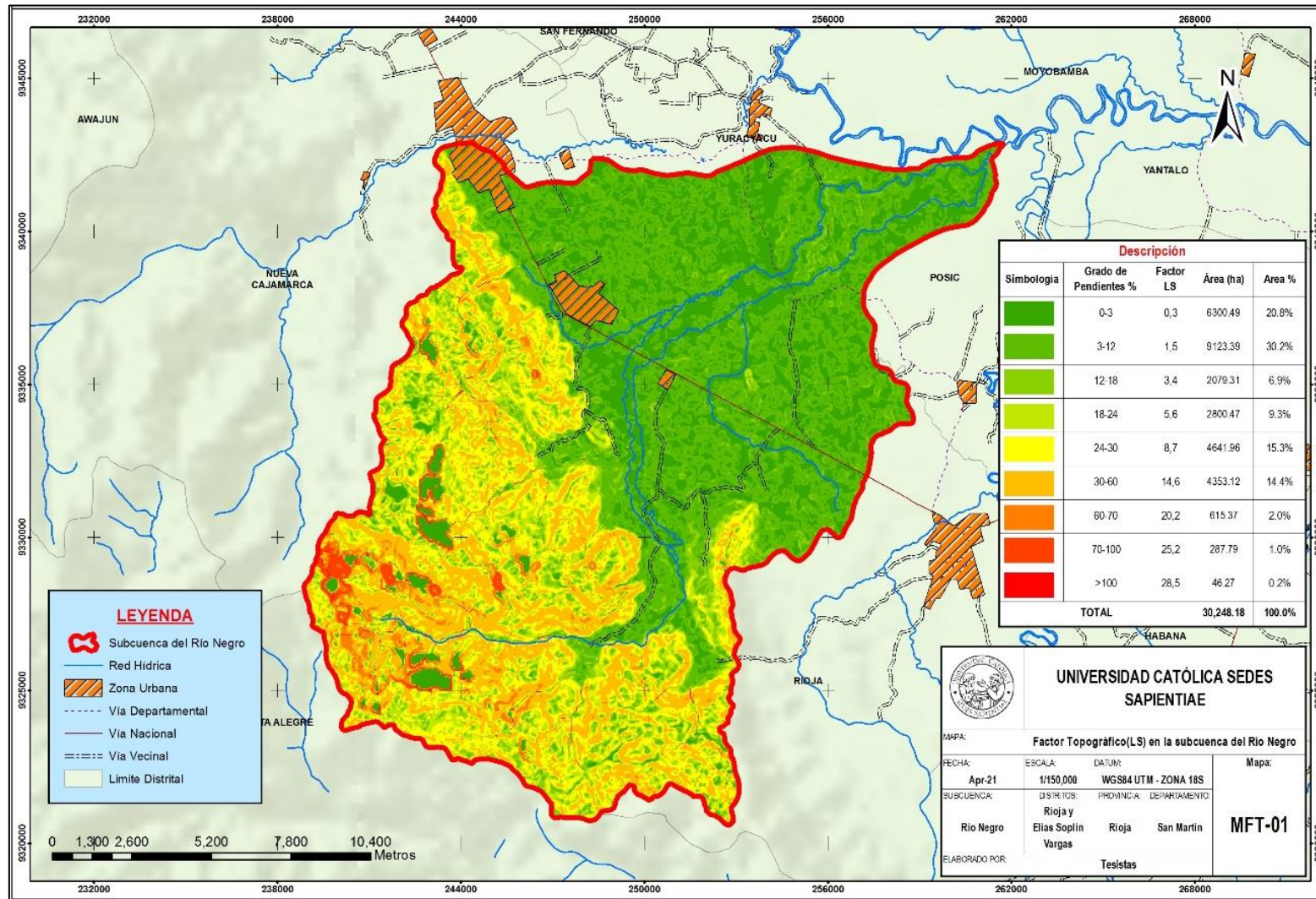
Distribución del factor LS vs el área en la subcuenca del río Negro



Los valores de LS presentaron variaciones al realizarse la combinación de la longitud con la pendiente; además, se determinó que estos fueron afectados por el tipo de topografía presentado en el área de estudio. Una vez calculado los dos subfactores, se procedió a multiplicarlos para obtener el factor LS en la subcuenca, los cuales fueron representados en un mapa temático (Figura 15).

Figura 15

Mapa del factor LS en la subcuenca del río Negro



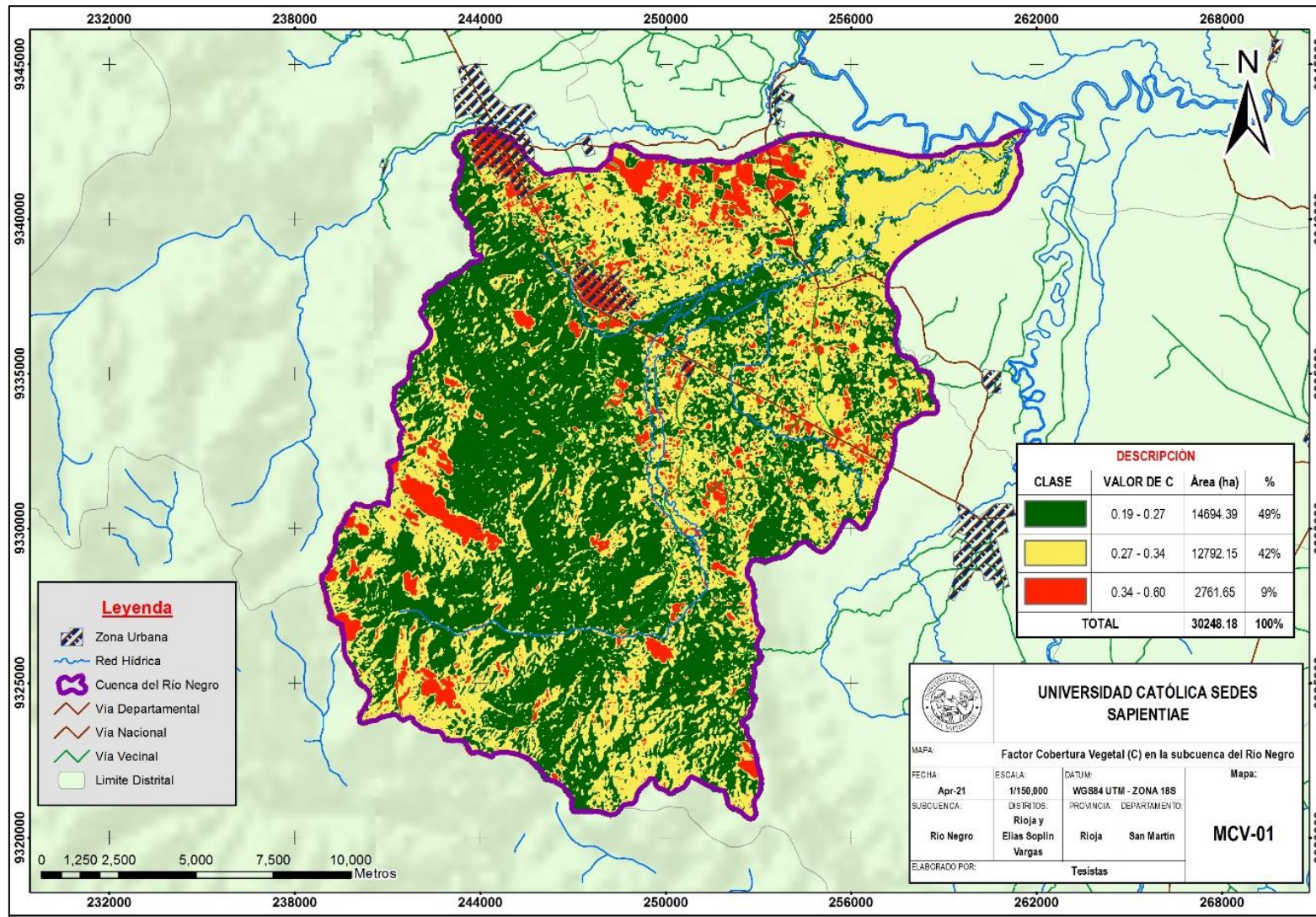
3.4. Determinar la cobertura vegetal (C) en la Subcuenca del río Negro

Los resultados obtenidos para la determinación de factor C, el cual se basó en el NDVI donde se combinó la reflectancia captada en el rango espectral del rojo visible e infrarrojo cercano de la imagen satelital Landsat 8), dichos valores oscilaron de -0,173 a 0,626, donde el menor valor represento las zonas sin cobertura vegetal y los valores cercanos a 1 son zonas con cobertura vegetal densa (Apéndice 23).

La Figura 16 se muestra que al aplicar la fórmula de Van Der Knijff *et al.* (2000), los valores oscilaron de 0 a 1, donde los valores entre 0,19 a 0,27, representan las zonas con cobertura vegetal densa, abarcando el 49 % del total del área de estudio; además, los valores medios oscilan entre 0,27 a 0,34, representado por vegetación secundaria, abarcando el 42 % del área; asimismo, se estableció que el 9 % del total del área, estuvo conformada por suelos con poca cobertura vegetal, donde los valores oscilaron 0,34 a 0,60.

Figura 16

Mapa del factor C en la subcuenca del río Negro



3.5. Identificar las prácticas de conservación del suelo (P)

Para este factor se asumió el valor 1, dado que en la subcuenca del río Negro no se ha identificado prácticas o proyectos para la conservación de suelos.

3.6. Predecir de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca del río Negro

En la Tabla 16 y Figura 17 se muestran los resultados obtenidos sobre la predicción de la pérdida de suelos en la subcuenca del río Negro, los cuales fueron clasificados según el nivel de erosión: con un nivel de erosión ligera los valores oscilan de 0,380 – 49,841 t*ha⁻¹*año⁻¹, representando 17 065,26 ha del área total (56 %); asimismo, con un nivel de erosión muy alta los valores oscilaron entre 699,896 – 1 802,164 t*ha⁻¹*año⁻¹ con un área de 19,01 ha (0,1 %). Para la determinación de la pérdida de suelo, se procedió a la multiplicación de los factores de R, K, LS, C y P en formato raster, con una resolución de píxel de 30 m.

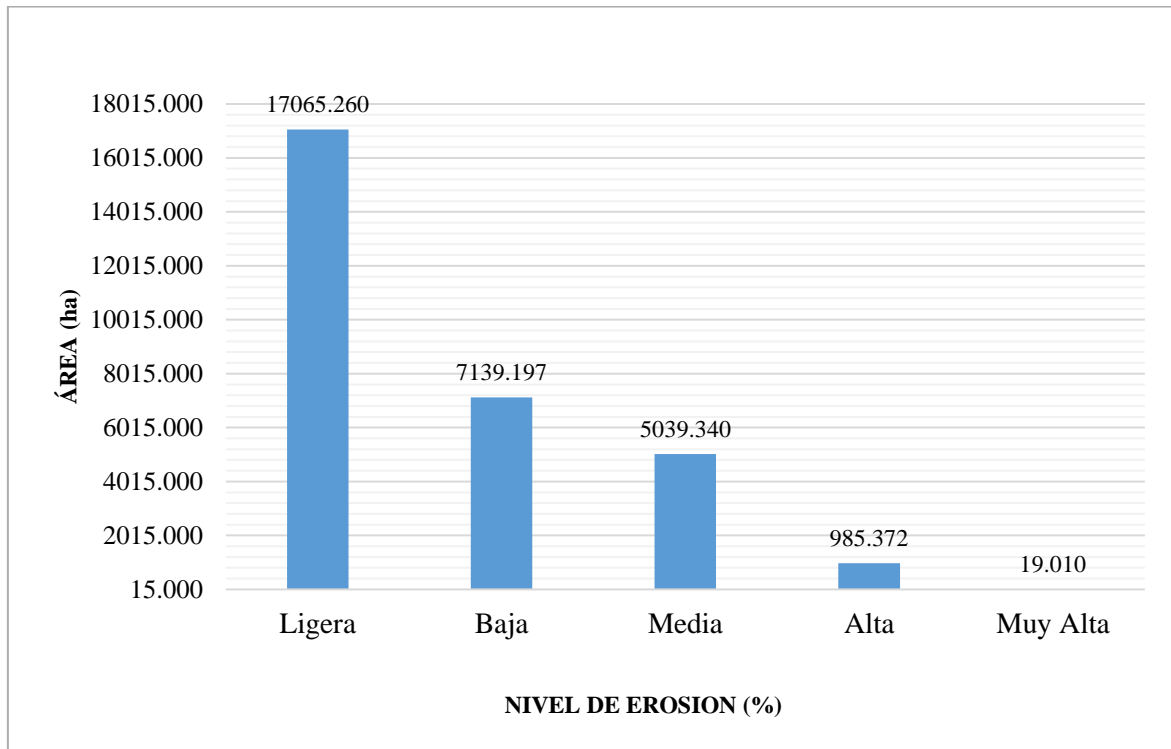
Tabla 16

Pérdida de suelo en la subcuenca del río Negro

Nivel de erosión	Pérdida de suelo (t*ha⁻¹*año⁻¹)	Área (ha)	Área (%)
Ligera	0,380 - 49,841	17 065,26	56,4
Baja	49,841 - 134,631	7 139,20	23,6
Media	134,631 - 254,750	5 039,34	16,7
Alta	254,750 - 699,897	985,37	3,3
Muy alta	699,896 - 1 802,164	19,01	0,1
Total		30 248,18	100

Figura 17

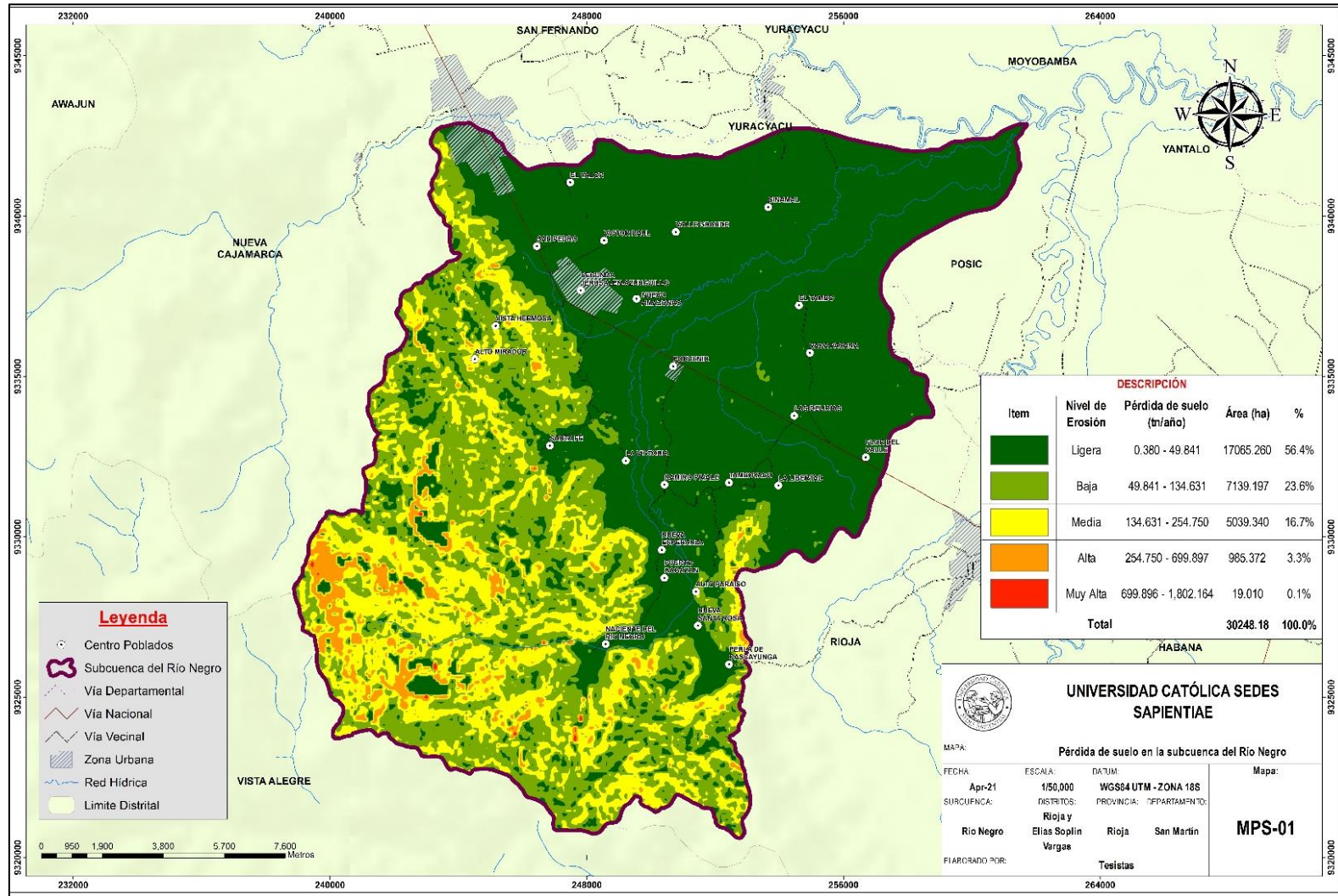
Nivel de erosión con respecto al área en la subcuenca del río Negro



Los resultados mostrados sobre la pérdida de suelos, se debe principalmente a que en la parte alta de la subcuenca se genera mayor pérdida de suelo por erosión hídrica, debido a las diferentes actividades antrópicas que se realizan y las características de la subcuenca (topografía y clima), logrando así modificar considerablemente la cobertura de suelo por la acción del agua y su erosión evidente en la subcuenca del río Negro (Figura 18).

Figura 18

Mapa de pérdida de suelo en la subcuenca del río Negro



CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN

4.1. Estimación del índice de erosividad (R) en la subcuenca del río Negro

Para el cálculo del factor R (erosividad de la lluvia) se empleó la metodología del Índice Modificado de Fournier (IMF); dado que, este método utiliza valores mensuales y anuales de precipitación, donde la mayoría de las estaciones meteorológicas cuentan con estos datos; además, presenta un buen indicador en zonas tropicales, donde se registran precipitaciones con clasificación de moderadas a altas (Ramírez *et al.*, 2007 y Flores, 2015). Asimismo, Ramírez (2010) determinó que el IMF tiene varias ventajas al emplear datos meteorológicos simples, condición que facilitó su aplicación en la presente investigación, ya que dentro de la subcuenca del río Negro no existieron estaciones meteorológicas (ver Apéndice 11); motivo por el cual, se empleó las estaciones cercanas al área de estudio.

Los valores de erosividad “R” para la subcuenca del río Negro aplicando el IMF, oscilaron de 4 389,40 a 4 487,38 MJ*mm*ha⁻¹*año⁻¹; dichos valores fueron mayores en comparación a lo registrado por Ruiz (2011), ya que en su investigación realizada en la microcuenca Rumiyacu (Moyobamba), obtuvo valores entre 761,5 a 898,8 MJ*mm*ha⁻¹*h⁻¹*año⁻¹, el cual según la tabla 4 se encuentra en un nivel bajo de erosividad. Sin embargo, el estudio realizado por Calle (2021) en el Santuario Nacional Tabaconas Namballe (Cajamarca), obtuvo valores que oscilaron entre 765,63 y 2 573,98 MJ*mm*ha⁻¹*año⁻¹, donde empleó la misma metodología utilizada en la presente investigación. La principal diferencia de la variación de resultados de erosividad “R” en las investigaciones mencionadas, radicó en la ubicación del área de estudio (Cajamarca y San Martín); además, los datos de precipitación obtenidos presentaron diferentes valores. Cabe mencionar que la metodología de Roose, Morgan y Foster utilizada por Ruiz (2011) en la microcuenca Rumiyacu, requirió de datos de intensidad y precipitación anual; mientras que, la metodología del IMF, se basó en el uso de datos de precipitación mensual y anual; además, el tratamiento estadístico de datos fue diferente para ambos casos.

4.2. Cálculo del valor de erodabilidad del suelo (K) en la subcuenca del río Negro

Para determinar los valores del factor de erodabilidad “K”, se empleó la información de la serie de suelos del Alto Mayo que contó con datos de textura y materia orgánica; además, se actualizó dicha información con muestras de suelo extraídas del área de estudio. Los valores encontrados de K para la presente investigación oscilaron de 0,014 a 0,022 $t \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$; de igual manera, resultados similares fueron encontrados por Portuguez (2015), donde obtuvo valores entre 0,28 a 0,48 $t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ \cdot mm$; Del Águila (2010) obtuvo entre 0,15 a 0,69 $t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ \cdot mm$; Puerta (2018) presentó valores entre 0,011 a 0,038 $t \cdot ha^{-1} \cdot h^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1} \cdot ha^{-1}$; Moreno (2017) obtuvo entre 0,05061 a 0,0852 $t \cdot ha \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot MJ \cdot mm$ y Calle (2021) alcanzó valores entre 0,001 y 0,1 $t \cdot ha \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$, donde los resultados obtenidos en estos estudios, fueron similares a los obtenidos en la presente investigación. Por otro lado, Ruiz (2011) empleó otra metodología, en el cual realizó una clasificación supervisada en la microcuenca Rumiyacu (Moyobamba); posteriormente, procedió a realizar la toma de muestras para obtener valores de textura, materia orgánica y permeabilidad; finalmente, aplicó la fórmula de Wischmeier, donde encontró valores que oscilaron entre 0,00745 a 0,01060 $t \cdot h \cdot ha \cdot ha^{-1} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$, siendo relativamente semejantes a los obtenidos en el presente estudio.

Hernán (2005) señala que para la realización de una clasificación supervisada se debe tener en cuenta dos factores principales como: el área de estudio y las imágenes satelitales necesarias; puesto que, los valores asignados corresponden a cada uno de los píxeles, donde los datos obtenidos presentan mayor exactitud para clasificar el uso de suelo en superficies; sin embargo, el MINAM (2022) enfatiza que la ZEE es el instrumento técnico que ayuda a darle un uso sostenible a un territorio, el cual sirve para proyectos de gestión y ordenamiento de los suelos; por lo que, los datos de la Zonificación son la base principal para la toma de decisiones con respecto a la conservación de los recursos naturales.

4.3. Definir la longitud y gradiente de la pendiente (LS) en la subcuenca del río Negro

Para la determinación del factor LS se empleó un modelo de elevación digital (DEM) de 30 m de resolución espacial, a cuál se le aplicó la fórmula propuesta por Renard *et. al.* (1997) y los valores de Mintegui, obteniendo datos que oscilaron entre 0,3 a 28,5 para la subcuenca

del río Negro. Estos resultados fueron semejantes a los valores obtenidos en el estudio realizado en la microcuenca Rumiyacu (Moyobamba), desarrollado por Ruiz (2011), donde obtuvo datos que fluctuaron de 0,3 a 28,5; esto se sustenta en el criterio de Mintegui al asignar los valores de LS en función a la pendiente; por ello, al tener rangos de pendiente semejante, los resultados fueron los mismos en ambos estudios; además, Velásquez (2008) señala que los valores más altos del factor LS, se encuentran en las zonas con mayor longitud y pendiente, es decir, que ha mayor longitud, mayor será el recorrido que realice una gota de lluvia, transportando el suelo desprendido; lo mismo sucede con la pendiente debido a que la pérdida de suelo aumenta rápidamente en aquellos lugares de pendientes muy escarpadas.

4.4. Determinación de cobertura vegetal (C) en la subcuenca del río Negro

Los valores para C se determinaron empleando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI); para ello, fue necesario utilizar las bandas 4 (RED) y 5 (NIR) de la imagen satelital Landsat 8, donde los resultados encontrados para el área de estudio oscilaron entre 0,19 a 0,60. Estos valores guardan relación con los estudios encontrados por Calle (2021), quien en su investigación encontró valores que variaron de 0,003 a 0,072; asimismo, Del Águila (2010) obtuvo valores desde 0,001 hasta 1; finalmente, Ruiz (2011) encontró un resultado cuyos valores fueron de 0 a 1. Todas las investigaciones mencionadas anteriormente, emplearon la misma metodología utilizada en el presente proyecto (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada - NDVI).

Pham *et al.* (2018) y Calle (2021) en sus investigaciones mencionan que el factor “C” se encuentra influenciado por el tipo de uso del suelo y la cubierta vegetal, ya que estos factores vienen siendo afectados por las actividades antrópicas; además, la metodología del NDVI nos indica que en las zonas con mayor presencia de bosque, presentan un menor valor; esto debido a que, la cobertura vegetal que se presenta en un área de estudio ayuda a evitar que las lluvias ocasionen daños al suelo; sumado a esto, el enraizamiento de los árboles que brindan un mejor sostén de la misma. Por otro lado, los valores más altos se presentan en aquellos lugares que no exhiben cubierta vegetal; es decir, el valor máximo de C es representado por el 0,95; el cual indica que es un suelo desprovisto de protección vegetal, donde el daño sería mayor por acción de las gotas de lluvia.

4.5. Identificación de prácticas de conservación de suelo (P) en la subcuenca del río Negro

Para este factor se asumió el valor de 1 puesto que no se ha identificado prácticas de manejo de suelo en la subcuenca del río Negro; sustentando en Morgan (1997), citado por Mahecha y Bermúdez (2015), al señalar que el valor P debe ser de 1, se considera incierto, por la ausencia de algún mecanismo para evitar la erosión del suelo. Así mismo, este valor también fue asumido en la investigación realizada por Ruiz (2011), Moreno (2017), Del Águila (2010) y Domingo y Portuguez (2015); sin embargo, Calle (2021) obtuvo valores para P en función de pendiente, clasificándolo en dos tipos (cultivo en franjas y terrazas) ya que en la zona de estudio identificó prácticas de conservación; así mismo, Gelagay y Minale (2016) lograron asignar el valor de P en su investigación para la parte media y alta del área de 1, para la parte baja fue 0,1, respectivamente.

4.6. Predicción de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca del río Negro

La pérdida de suelo por erosión hídrica encontrado en la subcuenca del río Negro, determinaron valores que oscilaron de 0,380 a 1 802,164 t*ha⁻¹*año⁻¹; los cuales fueron agrupados en intervalos y se les asignaron niveles de riesgo. Estos resultados fueron mayores con respecto a los encontrados por Ruiz (2011) en la microcuenca Rumiayacu (Moyobamba), cuyos valores obtenidos presentaron variaciones de 0 a 77 t*ha⁻¹*año⁻¹; sin embargo, estos resultados se sostienen ya que el área de estudio fue más pequeña (705,70 ha), con respecto al área de la presente investigación (30 248,18 ha); por otro lado, Puerta (2018) obtuvo una pérdida máxima de suelo de 8 891,0 t*ha⁻¹*año⁻¹, para la Subcuenca Chinata – Amazonas, el cual contó con un área de 5 404,00 ha.

Del Águila (2010), nos indica que la tasa de erosión hídrica de un área puede ser reducida si se considera el factor P; es decir, se deben realizar proyectos de manejo de cultivos que ayuden a mejorar la cobertura vegetal en la superficie; ya que, la vegetación actúa como una interfaz entre la atmósfera y el suelo, influyendo sobre la erosión aumentando la estabilidad de los agregados del suelo, protegiéndolo del impacto de las gotas de agua, incrementando la permeabilidad, la capacidad de infiltración y disminuyendo la escorrentía; además, modifica positivamente las propiedades físicas y biológicas del suelo.

Morgan (1997), citado por Mahecha y Bermúdez (2015), enfatiza que el USLE tiene múltiples ventajas por su fácil uso, simplicidad y sobre todo por la información amplia sobre la que fue desarrollado; sin embargo, tiene sus limitaciones debido a la poca disponibilidad de la cantidad de datos para estimar el modelo; por lo tanto, se tiene que aplicar otras metodologías para determinar sus componentes, con buenos índices de correlación.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

1. Se estimó el índice de erosividad de la lluvia (R) en la subcuenca del río Negro, empleando datos de precipitación de 6 estaciones meteorológicas más consistentes (Soritor, Jepelacio, Naranjillo, Leymebamba, Rioja y Moyobamba y se aplicó la metodología del Índice Modificado de Fournier (IMF) propuesto por Arnoldus (1978) y finalmente con la ecuación de Ramírez (2006), encontrándose valores que oscilaron desde los 4 389,40 a 4 487,38 $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, clasificado como erosividad media.
2. Se calculó el valor de erodabilidad del suelo (K) en la subcuenca del río Negro, mediante la serie de suelo del Alto Mayo, análisis de muestras de suelo y también la ecuación propuesta por Williams (1995), presentó valores que oscilaron entre 0,0014 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ a 0,0022 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$, clasificado como muy poco erodable.
3. Se definió el índice topográfico de longitud y pendiente o factor LS; utilizando las fórmulas de Renard *et al.* (1997) y Mintegui (1983); y se obtuvo valores que oscilaron en un rango de 0,3 a 28,5, en donde el 30,2 % del área de la subcuenca, presentó pendientes bajas y el 0,2 % del total del área presentó pendientes mayores al 100 % en el área de estudio.
4. Se determinó el índice de cobertura vegetal (C) en la subcuenca del río Negro, empleando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y aplicando la fórmula de Van Der Knijff *et al.* (2000), obteniendo que las zonas con cobertura vegetal ocupan un área de 14 694,39 ha, representado por el 49 % del total de la subcuenca; por otro lado, las zonas con vegetación media fueron representados por 12 792,15 ha, constituido por el 42 % de toda el área; además, las zonas con poca cobertura vegetal abarcaron un área de 2761,65 ha, representado por el 9 % del total de la zona de estudio.
5. Se identificó la inexistencia de prácticas de conservación del suelo (P), en la subcuenca del río Negro, por lo que el valor asignado para este factor fue de 1.

6. La pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca del río Negro fueron clasificados según el nivel de erosión: con un nivel de erosión ligera la pérdida de suelo oscila de $0,380 - 49,841 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, representando un 56,4 % de la subcuenca, el nivel de erosión baja contempló un 23,6 % del área con valores de $49,841 - 134,631 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, el nivel de erosión media osciló entre $134,63 - 254,750 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ representando un 16,7 % del área, el nivel de erosión alta osciló entre $254,750 - 699,896 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ representando un 3,35 % del área, y el nivel de erosión muy alta osciló entre $699,896 - 1\ 802,164 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ representado solo con el 0,1 % del total de la subcuenca del río Negro.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

1. Utilizar el Índice Modificado de Fournier, para el cálculo de la erosividad, ya que la información referente a la intensidad no se encuentra disponible en las estaciones meteorológicas del Alto Mayo y esta utiliza datos pluviométricos, además, se deben realizar un análisis de consistencia a los datos de precipitación para así poder trabajar con datos precisos.
2. Para las actividades de agricultura como café y cacao que se ubiquen en zonas con alta pendiente, se apliquen técnicas de manejo de cultivos como residuos de las cosechas, rotación de cultivos, cultivo en terrazas y sistemas agroforestales a fin de controlar la erosión hídrica.
3. Se sugiere a las autoridades regionales solicitar al SENAMHI, la instalación de estaciones meteorológicas equipadas en toda la cuenca del río Mayo, enfatizando la parte alta y así obtener datos de precipitación más consistentes para que se puedan realizar diferentes estudios de importancia.
4. Que se realice un manejo integral de cuencas en el ámbito de influencia de la subcuenca del río Negro, en donde se establezcan políticas y elaboren el Plan de ordenamiento Territorial en toda el área de estudio, mediante instrumentos de gestión como la Zonificación Económica Ecológica. Además, tener en cuenta esta investigación como un plan piloto para poder elaborar otros proyectos en la subcuenca.
5. Aplicar el modelo USLE para proyectos de inversión pública como abastecimiento de agua potable, canal de riego, represas y otros; ya que, este ayudará a evaluar el estado de degradación de la cuenca y predecir la cantidad de suelo que se pierde, para poder aplicar medidas de restauración del suelo, recuperación de la cubierta vegetal, ya que de esto dependerá el tratamiento que se le pueda dar al recurso hídrico.

6. Implementar Planes de restauración ecológica a partir de la información brindada por presente tesis, en aquella las zonas que se encuentren más críticas, implementando la reforestación con especies nativas, la cuales sean capaces de generar diversos beneficios como: bonos de carbono, mejoramiento de suelos, materia prima, etc.

7. En suelos destinados para uso ganadero y ubicados en lomadas, se deben implementar prácticas silvopastoriles, para minimizar el sobrepastoreo y por lo tanto la compactación del suelo, incrementando la infiltración y reduciendo la escorrentía.

REFERENCIAS

- Administración Local de Agua (2015). Actualización de Unidades Hidrográficas y Codificación Integral de cursos de agua superficial en ámbitos de Administraciones Locales de Agua: Administración Local de Agua Barranca. Lima, Perú.
- Almoza Hernández, Y., Cornelis Wim, M., Medina González, H., Ruiz Pérez, M E., Alonso Brito, G., Díaz Suarez, J., y Gabriels, D. (2016). Caracterización energética de las precipitaciones en la erosión de la cuenca del Cuyaguateje. *Cultivos Tropicales*, 37(2), 56-71. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362016000200007&lng=es&tlng=es.
- Álvarez, T.A. (2019). Análisis Temporal del Nivel de la Erosión Hídrica de la Subcuenca del Río Ichu 2013 y 2017. [Tesis de posgrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio UNH. <https://repositorio.unh.edu.pe/items/5f12bfcf-72ca-414c-8fee-360243117b22>
- Aparicio, F. (1989). Fundamentos de Hidrología de Superficie (1° ed.). Cámara Nacional de la Industria. Grupo Noriega Editores. ISBN 968-18-3014-8
- Araque, A. M. (2019) Cuencas hidrográficas. Universidad Politécnica Salesiana. ISBN: 978-9978-10-380-7. Editorial Abya-Yala. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19038/1/Cuencas%20hidrogr%C3%A1ficas.pdf>
- Arnoldus, H. M. J. (1977). Methodology Used to Determine the Maximum Potential Range Average Annual Soil Loss to Sheet and Rill Erosion in Morocco. Assessing Soil Degradation [Metodología utilizada para determinar el rango máximo potencial de pérdida anual promedio de suelo por erosión laminar y en surcos en Marruecos. Evaluación de la degradación del suelo]. *FAO Soils Bulletin*, 34, 39-48. [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjtl aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1224881](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjtl aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1224881)
- Arnoldus, H. M. J. (1978). Una aproximación del factor de lluvia en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Evaluación de la erosión del suelo. John Wiley y Sons, Chichester, Gran Bretaña.
- Arnoldus H. M. J. (1980). Una aproximación del factor de lluvia en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Evaluación de la erosión del suelo. John Wiley y Sons, Chichester, Gran Bretaña.

- Autoridad Nacional del Agua. (2010). Estudio de máximas avenidas en las cuencas de la zona centro de la vertiente del Pacífico. Informe final. <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/796/ANA0000602.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Autoridad Nacional del Agua. (2018). Identificación de puntos críticos con riesgo a inundaciones en ríos y quebradas 2017. Programa Presupuestal 068 “reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4465>
- Biesemans, J., Van Meirvenne M. y Gabriels, D. (2000). Extending the RUSLE with the Monte Carlo error propagation technique to predict long-term average off-site sediment accumulation [Ampliación del RUSLE con la técnica de propagación de errores de Monte Carlo para predecir la acumulación de sedimentos fuera del sitio promedio a largo plazo]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 55(1), 35-42. <https://www.jsowonline.org/content/55/1/35>
- Burrough, P. (1994). Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment. Universidad de Michigan. ISBN: 0198545924.
- Calle, V. L. F. (2021). *Efecto de los cambios de uso de suelo en el aumento de la erosión hídrica a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos en la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Tabaconas Namballe* [Tesis de grado, Universidad Católica Sedes Sapientiae]. Repositorio UCSS. https://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14095/1094/Calle_Luis_tesis_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Centro Peruano de Estudios Sociales. (2015). Los suelos en el Perú. Recurso fundamental para crear y sostener la vida. *La Revista Agraria*, (170), 6-11. <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/ais-2015/suelos-peru.pdf>
- Chuvienco, E. y Salinero, E. C. (1996). Fundamentos de teledetección espacial (3° edición). Madrid: Rialp. Ediciones RIALP S.A. I.S.B.N.: 84-321-3 127-X
- Cisneros, J., Cholaky, C., Cantero, A., González, J., Reynero, M., Diez, A., y Bergesio, L. (2012). Erosión Hídrica. Principios y técnicas de manejo (1° edición). Universidad Nacional de Río Cuarto. ISBN: 978-987-688-024-4. http://www.todoagro.com.ar/documentos/2013/Erosion_Hidrica.pdf

- Corporación Autónoma Regional del Tolima (2007). Plan general de ordenación forestal para el departamento del Tolima (Plan de Acción Trienal 2007 – 2009). https://www.cortolima.gov.co/images/la_corporacion/instrumentos_de_planificacion/plan_de_accion/pat_2007_2009.pdf
- Decreto Supremo 013 de 2010 [Ministerio de agricultura]. Aprueban el Reglamento para la Ejecución de Levantamiento de Suelos. 19 de noviembre de 2010.
- De Jong, S. (1994). Derivation of vegetative variables from a Landsat TM image for modelling soil erosion [Derivación de variables vegetativas a partir de una imagen Landsat TM para modelar la erosión del suelo]. *Journal of Earth Surface Processes and Landforms*, 19(2), 165-178. <https://doi.org/10.1002/esp.3290190207>
- Del Águila, A. (2010). *Aplicación del modelo USLE/RUSLE para estimar la pérdida de suelos por erosión hídrica en la microcuenca puente Pérez - Tingo María* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/420/T.CSA-36.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Devatha, C. P., Deshpande, V. y Renukprasad M. S. (2015). Estimation of Soil Loss Using USLE Model for Kulhan Watershed, Chattisgarh- A Case Study [Estimación de la pérdida de suelo utilizando el modelo USLE para la cuenca hidrográfica de Kulhan, Chattisgarh: un estudio de caso]. *Aquatic Procedia*, 4, 1429-1436. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.185>
- Dourojeanni, A. y Paulet, M. (1967). La ecuación universal de pérdida de suelo y su aplicación al planeamiento del uso de las tierras agrícolas: Estudio del factor de las lluvias en el Perú. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Dumas, A. (2012). *Riesgo de erosión hídrica en la cuenca Hidrográfica del Río Mundo* [Tesis de maestría, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio UCM. https://eprints.ucm.es/id/eprint/17468/1/TFM_AfricaDumas.pdf
- Echavarría, F., Medina, G. y Ruiz, J. (2020). Effects of rainfall pattern changes due to global warming on soil water erosion in grasslands and other vegetation types in the state of Zacatecas, Mexico [Efecto en la erosión hídrica del suelo en pastizales y otros tipos de vegetación por cambios en el patrón de lluvias por el calentamiento global en Zacatecas, México]. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11, 63-74. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4694>

- Echeverría, C., Coomes, D., Salas, J., Rey, J., Lara, A., y Newton, A. (2006). Rapid deforestation and fragmentation of Chilean Temperate Forests [Rápida deforestación y fragmentación de los bosques templados chilenos]. *Biological Conservation*, 130(4), 481-494. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.01.017>
- Elliot J., Coello J. y Alcalde, M. (2009). Los bosques de la cuenca transfronteriza del río Mayo-Chinchipe Perú-Ecuador (1° edición). Intermediate Technology Development Group, ITDG. ISBN: 978-9972-47-195-7. <https://rfd.org.ec/biblioteca/pdfs/LG-078.pdf>
- Eyherabide, M., Saíñz Rozas, H., Barbieri, P., y Echeverría, H. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia del Suelo*, 32(1)13-19. <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v32n1/v32n1a02.pdf>
- Flores, J., Martínez, E., Espinoza, M., Henriques, G., Avendaño, P., Torres, P. y Ahumada, I. (2010). *Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile: Región de Arica y Parinacota*. Síntesis de resultados. Centro de información de recursos naturales. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/2102/PC14010.pdf?sequence=1>
- Flores, V. A. (2015). *Aproximación de riesgo por erosión hídrica aplicando un sistema de información geográfica en la subcuenca Shambillo, distrito de Padre Abad* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1477>
- Fournier, F., y Medina San Juan, J. (1975). Conservación de suelos. Ediciones Mundi-Prensa. ISBN: 8471140446
- Ganasri, B. P., y Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin [Evaluación de la erosión del suelo por el modelo RUSLE utilizando sensores remotos y GIS: un estudio de caso de la cuenca de Nethravathi]. *Geoscience Frontiers*, 7(6), 953–961. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007>
- García, P. (2004). Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*, 309-334. ISBN: 84-8014-552-8. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/48695/1/Interacciones%20entre%20la%20vegetaci%C3%B3n%20y%20la%20erosi%C3%B3n%20h%C3%ADdrica.pdf>

- Gaspari F., Senisterra G., Delgado M., Rodríguez, A., y Besteiro, S. (2009) Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas (1° edición). Editorial Autores, La Plata, Argentina.
- Gelagay, H. S., y Minale, A. S. (2016). Soil loss estimation using GIS and Remote sensing techniques: A case of Koga watershed, Northwestern Ethiopia [Estimación de la pérdida de suelo utilizando SIG y técnicas de teledetección: un caso de la cuenca hidrográfica de Koga, noroeste de Etiopía]. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2), 126-136. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.01.002>
- Gómez, M., y Barredo, J. (2005). Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio (2° edición). Madrid: Editorial Ra-Ma. ISBN978-84-7897-673-7
- Harmon, J., y Anderson, J. (2003). The Design and Implementation of Geographic Information Systems. John Wiley y Sons. ISBN: 0-471-20488-9
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2010). Metodología de la Investigación. (5° edición). México DF: McGraw-Hill. ISBN: 978-607-15-0291-9
- Hernán, M. (2005). Clasificación supervisada – Multispec©. Universidad CAECE - Técnicas Espaciales de Análisis. <https://portal.ingemmet.gob.pe/documents/59082/67332/Tutorial%20Multispec.%20Clasificaci%C3%B3n%20Supervisada>
- Hill, M., Clérici, C., Mancassola, V. y Sánchez, G. (2014). Estimación de pérdidas de suelo por erosión hídrica en tres diferentes sistemas de manejo hortícola del sur de Uruguay. *Agrociencia. Uruguay*, 19(1), 94-101. <http://www.scielo.edu.uy/pdf/agro/v19n1/v19n1a11.pdf>
- Hudson, N. (1982). Conservación del suelo. Editorial Reverté, S.A. ISBN: 84-291-1027-5.
- Instituto de Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales. (2015). Protocolo para la identificación y evaluación de la degradación de suelos por erosión. IDEAM - MADS -U.D.C. A Bogotá D.C., Colombia.
- Instituto Nicaragüense De Estudios Territoriales (2005). Erosión Hídrica: mapa de amenazas. Recomendaciones técnicas para su elaboración. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación - COUSUDE (Proyecto MET-ALARN). <https://webgeofisica.ineter.gob.ni/proyectos/metalarn/erosion.pdf>

- Instituto para la Conservación de la Naturaleza. (1982). Paisajes erosivos en el sureste español: Ensayo de metodología para el estudio de su cualificación y cuantificación: Proyecto Lucdeme. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. ISBN: 8474791472
- Julca, E. (2017). *Aplicación del modelo USLE para estimar la erosión actual y potencial de acuerdo a las actividades productivas en la microcuenca Pariac- Huaraz 2016* [Tesis de grado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio UNASAM. <https://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2086?show=full>
- Jumbo, D. (2018). *Estimación cualitativa y cuantitativa de la erosión hídrica vinculada al cambio de uso del suelo en la subcuenca Catamayo, Ecuador* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio UNALM. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3689/jumbo-flores-diana-carolina.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Kuok, K., Mah D., y Chiu, P. (2013). Evaluation of C and P Factors in Universal Soil Loss Equation on Trapping Sediment: Case Study of Santubong River. *Journal of Water Resource and Protection*, (5), 1149-1154. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2013.512121>
- Lillesand, T. y Kiefer, R. (1994). Remote sensing and imagen interpretation [Teledetección e interpretación de imágenes]. *Journal of Geographic Information System*, 9(2), 1. [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2031386](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2031386)
- Lalinde, J. D. H., Castro, J. F. E., Tarazona, M. E. P., González, J. E. F., Rangel, J. G. C., Sierra, C. A. T., Torrado, M. K. A., Sierra, S. M. C., y Pirela, V. J. B. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(5), 587-595. <https://bonga.unisimon.edu.co/handle/20.500.12442/2469>
- Llerena, C., Cruz, Z., Durt, É., Peña, J., Martínez, K y Ocaña, J. (2010). *Gestión Ambiental de un ecosistema frágil. Los bosques nublados de San Ignacio, Cajamarca, cuenca del río Chinchipe (1° edición) (N°P01 L77)*. Intermediate Technology Development Group, ITDG. ISBN: 978-9972-47-208-4
- López, L. (2015). *Diccionario de Geografía aplicada y profesional. Terminología de análisis, planificación y gestión del territorio*. Consejo de publicaciones de la Universidad de León. ISBN: 978-84-9773-722-7

- Low, F. y Paulet, M. (1967). Control de la erosión por el Agua. Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Ingeniería Agrícola.
- Maguire, D. (1991). An overview and definition of GIS [Una visión general y definición de SIG]. *Geographical information systems: Principles and applications*, 1(1), 9-20. <http://lidecc.cs.uns.edu.ar/~nbb/ccm/downloads/Literatura/OVERVIEW%20AND%20DEFINITION%20OF%20GIS.pdf>
- Maguire, D. J., Goodchild, M. F. y Rhind, D. W. (1991). *Geographical Information Systems: Principles and applications* (Vol. 2). Wiley, New York. ISBN: 0470217898 <https://asu.pure.elsevier.com/en/publications/geographical-information-systems-principles-and-applications-two->
- Mahecha, A. J. T., y Bermúdez, L. S. G. (2015). Simulación de la pérdida de suelo en la parte alta y media de la microcuenca Quebrada Cune utilizando el modelo Usle. Universidad de La Salle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/317
- Marelli, H. (2004). Área, suelos y producción vegetal. Portal informativo para el productor agropecuario.
- Maderey, L. (2005). Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico (1° edición). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN: 970-32-2812-7
- Millward A. y Mersey J. (1999). Adapting the RUSLE to model soil erosion potential in a mountainous tropical watershed [Adaptación del RUSLE para modelar el potencial de erosión del suelo en una cuenca tropical montañosa]. *Journal of Catena*, 38(2), 109-129. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00067-3)
- Ministerio del Ambiente. (2020). Perú prioriza medidas para contribuir al manejo sostenible de la tierra. <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/187438-peru-prioriza-medidas-para-contribuir-al-manejo-sostenible-de-la-tierra>
- Ministerio del Ambiente. (2022). Bosque y pérdida de bosques. Geobosques. <https://geobosques.minam.gob.pe/geobosque/view/perdida.php>
- Mintegui J. A. (1983). Análisis de la influencia del relieve en la erosión hídrica. Hipótesis de estudio para correlacionar la pendiente con la longitud de declive en un terreno. *Actas de la V Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica*, 2229-2245.

- Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M. y Iverson L. (1996). Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS [Modelado del potencial topográfico de erosión y deposición utilizando GIS]. *Journal of Geographical Information Systems*, 10(5), 629-641. <https://doi.org/10.1080/02693799608902101>
- Monsalve, G. (1995). Hidrología en la Ingeniería (2° edición). Escuela Colombiana de Ingeniería. ISBN: 958-95742-1-1
- Moore, I. y Wilson J. (1992). Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation [Factores de longitud-pendiente para la ecuación universal de pérdida de suelo revisada: método simplificado de estimación]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 47(5), 423-428. <https://www.jswnonline.org/content/47/5/423.short>
- Moreira, J. (1991). Capacidad de uso y erosión de los suelos en el valle del río Guadalquivir. Universidad de Sevilla. Madrid.
- Moreno, R. (2017) *Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica aplicando el método USLE y haciendo uso del SIG en la subcuenca del río Olleros - Distrito de Olleros periodo 2015* [Tesis de grado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio UNASAM. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/1993?show=full>
- Olaya, V. (2014). Sistemas de información geográfica. Creative Commons. California. <http://volaya.es/writing>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1967). La erosión del suelo por el agua: Algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. ISBN 9253004746, 9789253004744
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2011). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. ISBN FAO: 978-92-5-306614-8, ISBN Mundi-Prensa: 978-84-8476-553-0
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse. <https://www.fao.org/news/story/es/item/357165/icode/>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2016). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria. Resumen. <https://www.fao.org/3/i6132s/i6132s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2017). Use of 137CS for soil erosion assessment. FAO y International Atomic Energy Agency. ISBN 978-92-5-130050-3
- Ortega-Gaucin, D. (2012). Sequía en Nuevo León: Vulnerabilidad, Impactos y Estrategias de Mitigación. Instituto del Agua de Nuevo León. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1426.0563>
- Ortiz, R. (2015) Síntesis de la evolución del conocimiento en Edafología. *Revista Eubacteria*, (34), 7. N° 34. 2015. ISSN 1697-0071
- Parveen, R. y Kumar U. (2012). Integrated Approach of Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for Soil Loss Risk Assessment in Upper South Koel Basin, Jharkhand [Enfoque integrado de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) y el sistema de información geográfica (GIS) para la evaluación del riesgo de pérdida de suelo en la cuenca Upper South Koel, Jharkhand]. *Journal of Geographic Information System*, 4(6), 588-596. <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2012.46061>
- Paulet, M. (1967). Determinación de la erodabilidad del suelo en función de algunas de sus propiedades. Departamento de Conservación de Suelos. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Patil, R., y Sharma S. (2013) Remote Sensing and GIS based modeling of crop/cover management factor (C) of USLE in Shakker river watershed [Modelado basado en sensores remotos y SIG del factor de manejo de cultivos/cobertura (C) de USLE en la cuenca del río Shakker]. *International Conference on Chemical, Agricultural and Medical Sciences (CAMS-2013)*, 29-30. <http://dx.doi.org/10.15242/IICBE.C1213023>
- Pham, T, Degener, J. y Kappas, M. (2018). Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam [Ecuación universal integrada de pérdida de suelo (USLE) y sistema de información geográfica (GIS) para la estimación de la erosión del suelo en la cuenca A Sap: Vietnam central]. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(2), 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.01.001>

- Porta, J. y López, M. (2005). *Agenda de Campo de Suelos: Información De Suelos para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Universidad de Lleida. Mundi-prensa. ISBN: 84—8476-231-9
- Portuguez, D. (2015). Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la cuenca del Río Sigüas utilizando Geoinformática. *Anales científicos*, 76(2), 324-329. ISSN: 2519-7398. <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v76i2.797>
- Proyecto Especial Alto Mayo (2007). *Zonificación Ecológica Económica del Alto Mayo: Suelo y Capacidad de Uso Mayor de las Tierras (Informe temático)*. http://terra.iiap.gob.pe/assets/files/meso/07_zee_altomayo/05_Suelos%20y%20CUM_2007.pdf
- Puerta, C. (2018). *Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica usando la ecuación universal de pérdida de suelo (U.S.L.E) en la subcuenca Chinata, Amazonas, 2018* [Tesis de grado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza]. Repositorio UNTRM. <https://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14077/1543/Puerta%20Tu%20esta%20Carmen%20Elvira.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ramírez, F. (2006). *Evaluación del riesgo por erosión potencial de la zona cafetera central del departamento de Caldas* [Tesis de grado, Universidad del Tolima].
- Ramírez, F., Hincapié, E., Sadeguián, S. y Pérez, U. (2007). Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del Departamento de Caldas. *Cenicafé*, 58(1), 40-52. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc058\(01\)040-052.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc058(01)040-052.pdf)
- Ramírez, L. (2010). *Estimación de la Pérdida de Suelos por Erosión Hídrica en la Cuenca del Río Juramento-Salta* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Salta].
- 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*. Sistema de Información Geográfica. Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://tarwi.lamolina.edu.pe/~cramost/MODELO%20DE%20EROSION%20HIDRICA%20-%20SIG.pdf>
- Renard, K., Foster G., Weesies G., McCool D. y Yoder D. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. United States Department of Agriculture (USDA), Agriculture Handbook N° 703. ISBN: 0-16-048938-5

- Rojas-Ruiz, R., Alvarado-Huamán, L., Borjas-Ventura, R., Carbonell Torres, E., Castro-Cepero, V., y Julca-Otiniano, A. (2020). Caracterización de fincas productoras de café convencional y orgánico en el valle del Alto Mayo, región San Martín, Perú. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 7(2), 100-111.
- Rouse, J., Haas R., Schell J., y Deering D. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS (Volumen 1). pp. 309-317. Technical Presentations Section A. National Aeronautics and Space Administration. NASA SP-351 (NPD 8000.2A).
- Rowley, J. y Gilbert, P. (1989). The market for land information services, Systems and support [El mercado de servicios de información territorial, Sistemas y soporte]. *The Association for Geographic Information Yearbook*.
- Ruiz, P. (2011). *Estimación de la erosión a través del modelo USLE en la microcuenca Rumiyacu, Región San Martín* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/427>
- Sánchez, M. (2014). Análisis Físico-Químico de suelos. Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2003). Memoria Nacional 2001-2002: Evaluación de la Degradación del Suelo causada por el Hombre en la República Mexicana escala 1:250 000 (Memoria nacional). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.researchgate.net/publication/307967321>
- Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SERNANP). (2019, 1 DE ENERO). Bosque de Protección Alto Mayo. Plataforma digital única del Estado Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/sernanp/informes-publicaciones/1834052-bosque-de-proteccion-alto-mayo>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2020). Mapa climático del Perú. Ministerio del Ambiente. <https://www.senamhi.gob.pe/servicios/?p=mapa-climatico-del-peru>
- Shabani F., Kumar L. y Esmaili A. (2014) Improvement to the prediction of the USLE K factor [Mejora en la predicción del factor USLE K]. *Journal of Geomorphology*, 204, 229-234. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.008>

- Solano, R. (2016). *Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la subcuenca del río Shullcas 2000 – 2013, Huancayo* [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio UNCP. <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3486/Solano%20Peralta.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tauta, J., Camacho, J., y Rodríguez, G. (2018). Estimación de erosión potencial bajo dos sistemas de corte de caña panelera utilizando la ecuación universal de pérdida de suelos. *Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica*, 21(2), 405-413. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1074>
- Taypanta, J. (1993). La erosión hídrica: proceso, factores y formas. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). Boletín divulgativo N° 229. <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/271/4/iniapscbd229.pdf>
- Torres, S. (1982). Glosario de Términos comunes en las clasificaciones interpretativas de suelos. Boletín técnico N° 40. Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo. <https://edepot.wur.nl/480041>
- Troeh, F.R., Hobbs, J.A. y R.L. Donahue. (1991). *Soil and Water Conservation (Second Edition)*. New Jersey: Prentice Hall. <https://doi.org/10.1017/S0014479700023188>
- United States Department of Agriculture. (2006). *Claves para la Taxonomía de Suelos (10° segunda edición)*. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS).
- Van der Knijff, J., Jones, R. y Montanarella, L. (2000). *Soil erosion risk assessment in europe (EUR 19044 EN)*. European soil bureau. European commission. <https://www.researchgate.net/publication/237727657>
- Vásquez, A., Mejía, A., Faustino, J., Terán, R., Vásquez, I., Díaz, J., Vásquez, C., Castro A., Tapia, M., y Alcántara, J. (2016). *Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas*. Universidad Nacional Agraria La Molina. ISBN: 978-612-4147-55-5
- Velásquez, S. (2008). *Erosión de suelos utilizando la EUPSR (RUSLE)*. Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Cantón de Coronado, Costa Rica.
- Villanueva, B. O. (1980). *Edafología*. Universidad Autónoma Chapingo. ISBN: 9688840904

- Villaseñor, I. (2008). Metodología para la elaboración de guías de fuentes de información. *Investigación bibliotecológica*, 22(46), 113-138. <https://www.scielo.org.mx/pdf/ib/v22n46/v22n46a6.pdf>
- Villón, M. (2002). Hidrología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Agrícola, Comité de Recursos Hidráulicos. <https://drive.google.com/file/d/1sU9-zofESdLUOKpUNd6HYGZI2yVQ4UfV/view?pli=1>
- Williams, J. (1995). The EPIC model. In V.P. Singh Computer models of watershed hydrology. *Water Resources Publications*, 6(5), 909-1000. ISBN: 9780918334916
- Wischmeier, W. H., y Smith D. D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses: A guide to conservation planning. Supersedes Agriculture Handbook N° 282. United States Department of Agriculture. University of Virginia Library (X001754985).
- Zhang, H., Yang, Q., Li, R., Liu, Q., Moore, D., He, P., Ritsema, C. y Geissen, V. (2013). Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor [Extensión de un procedimiento GIS para calcular el factor LS de la ecuación RUSLE]. *Computers y Geosciences*, 52, 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.09.027>
- Zorrilla, M., Sotelo, E., Quiñones, L., Cortina, S., Cotler, H. y Domínguez, J. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, (83), 5-71. ISSN: 1405-2849. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53908302>

TERMINOLOGÍA

Cobertura de suelo. Es el material físico que se encuentra en la superficie, ya sea árboles, pastos, entre otros; y que estas, vienen siendo influenciados por factores como el clima, el tipo de suelo, topografía (MINAM, 2015).

Conservación de suelos. Es una práctica que busca mantener y recuperar la calidad y capacidad del suelo, para que sostenga la productividad de las plantas y animales; asimismo, las necesidades humanas (Zorrilla *et al.*, 2007).

Divisoria de aguas. Se refiere a la línea imaginaria que se encuentra representado por las partes alta de un área y que está separa a dos vertientes (Elliot *et al.*, 2009).

Erodabilidad. Es la vulnerabilidad del suelo que en condiciones específicas desprende partículas, por medio de algún agente de la erosión (Torres, 1982).

Erosión. Es el proceso mediante el cual la masa del suelo se desprende, transporta y deposita, por algún efecto de la naturaleza o consecuencia de la acción humana (Marelli, 2004).

Erosión hídrica. Es la capacidad del agua para remover partículas del suelo o roca, causando alteraciones en el terreno (Instituto Nicaragüense De Estudios Territoriales [INETER], 2005).

Erosividad. Es la capacidad erosiva que tienen diferentes agentes geológicos cuando interactúan con el suelo (Hudson, 1982).

Manejo de cuencas. Es la acción integral de la población local, sociedad y decisión política en una cuenca, para que permitan un aprovechamiento sostenible, protegiendo el espacio físico y los recursos de bióticos y abióticos en la misma (Vásquez *et al.*, 2016).

Precipitación. Es un proceso que inicia con la evaporación del agua y llega a acumularse en forma de nubes, el cual por efectos físicos caen hacia la superficie en forma sólida o líquida tales como granizo, nieve o lluvia (Villón, 2002).

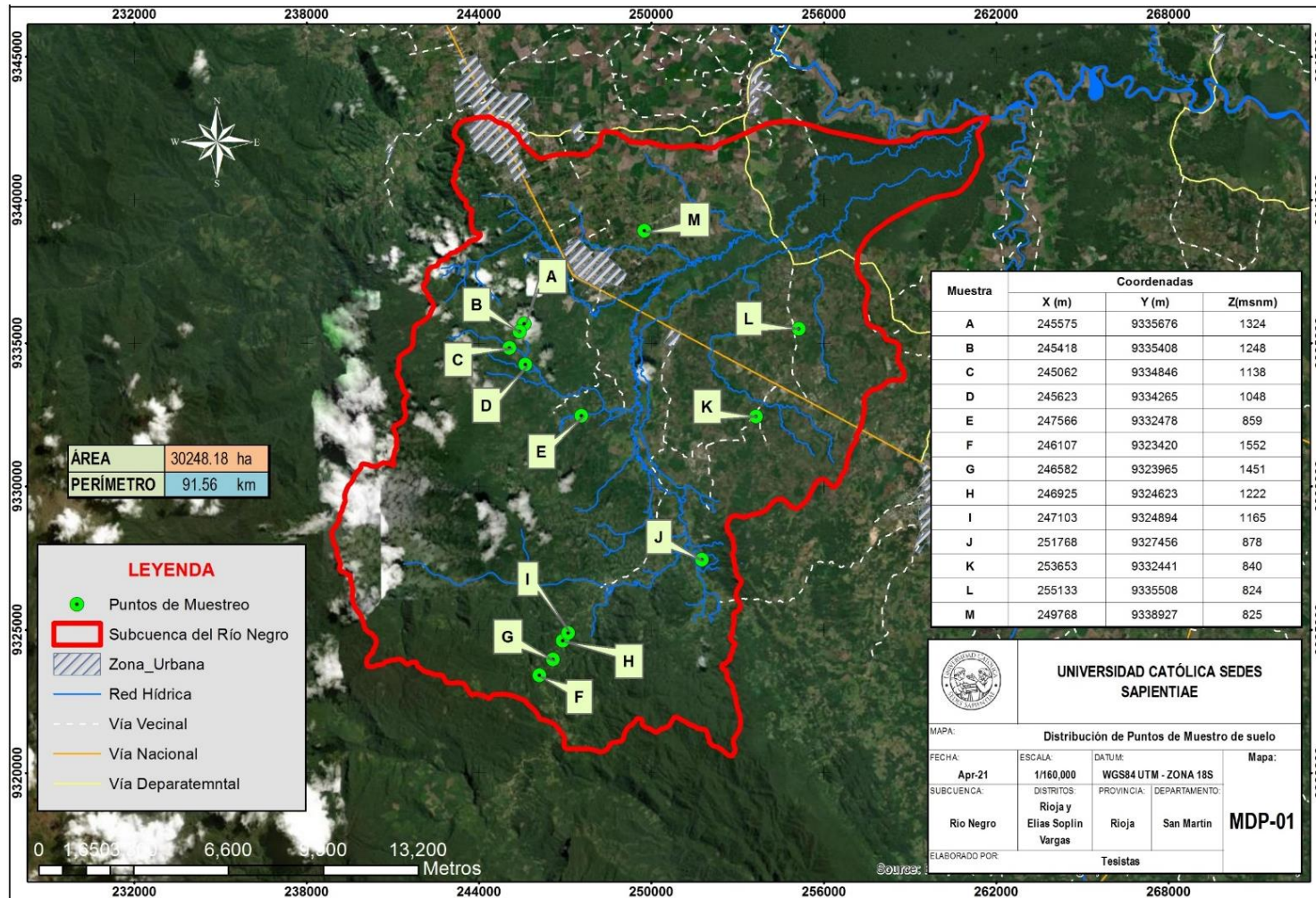
Restauración ecológica: es un proceso que no solo impulsa restaurar la vegetación, sino que también ayuda a recuperar la integridad de los ecosistemas que se encuentran alterados y así poder mantener los servicios ecosistémicos que estos brindan y que ayudan a mantener un ambiente equilibrado (Echevarría *et al.*, 2006).

Suelo. Es un cuerpo natural, biológicamente activa, que proviene de la descomposición de seres vivos y desintegración de las rocas en el paso del tiempo (United States Department of Agriculture [USDA], 2006).

Serie de suelos. Es una representación específica del suelo, la cual cuenta con características únicas, tanto internas como morfológicas (PEAM, 2017).

APÉNDICES

Apéndice 1. Distribución de puntos de muestreo del suelo en el área de estudio



Apéndice 2. Extracción de muestras de suelos en los puntos determinados



Apéndice 3. Etiquetado de muestras de suelo



Apéndice 4. Proceso de Trituración, tamizaje y envasado de muestras de suelo



Apéndice 5. Determinación de textura del suelo



Apéndice 6. Datos de precipitación mensual (mm) por cada estación meteorológica

Estación meteorológica de Jepelacio

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2010	24,02	88,61	135,30	170,30	109,32	58,71	104,21	43,00	87,50	158,20	116,20	123,70
2011	62,00	152,60	131,13	113,20	111,00	38,50	50,10	35,80	33,51	159,70	229,30	143,70
2012	139,22	126,60	169,83	91,60	46,50	59,40	54,21	63,90	124,61	120,30	76,61	135,00
2013	117,31	21,12	207,80	126,70	99,70	13,51	63,21	63,60	159,50	214,80	189,10	108,30
2014	101,10	203,02	236,91	136,80	78,30	121,00	45,00	49,90	134,00	85,40	122,60	122,60
2015	155,50	119,92	156,10	164,80	105,62	171,71	78,70	81,91	96,71	10,50	89,40	66,71
2016	49,42	162,02	70,01	114,60	96,41	34,10	93,40	24,00	72,62	184,20	130,61	81,30
2017	85,02	80,60	350,00	79,44	87,02	50,82	64,63	53,81	91,52	145,90	115,21	168,30
2018	154,91	161,92	232,90	165,00	103,40	75,50	25,60	22,32	161,10	188,60	213,10	147,50
2019	117,23	63,92	368,50	70,72	111,70	45,91	51,00	96,21	100,62	99,40	144,91	75,20

Nota. Datos de precipitación a partir de la información recepcionada por correo electrónico con fecha 20 de julio del 2020 del SENAMHI.

Estación meteorológica de Soritor

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2010	200,00	171,10	203,90	143,40	159,20	121,20	83,90	64,70	88,20	138,70	350,80	324,10
2011	38,80	90,80	169,40	112,60	139,40	80,70	138,90	64,40	105,50	259,70	255,80	233,00
2012	89,90	166,60	214,20	196,90	93,10	100,00	42,80	26,80	56,40	187,30	246,50	220,00
2013	167,70	208,60	286,90	103,10	69,30	68,20	53,11	125,40	168,30	111,10	101,50	209,50
2014	180,10	51,30	239,00	110,60	140,40	78,70	115,00	78,60	149,40	191,90	245,40	167,00
2015	115,30	255,20	308,90	115,00	155,90	110,70	91,30	41,90	137,90	179,30	321,30	203,90
2016	144,90	193,70	193,60	263,40	122,50	119,10	49,60	110,00	125,10	150,20	117,00	73,30
2017	75,60	232,10	151,40	315,50	179,80	49,40	112,30	50,80	89,50	137,30	220,30	107,75
2018	153,70	131,30	174,30	115,30	87,40	93,00	70,80	99,20	118,90	107,00	231,40	365,70
2019	183,20	202,40	396,80	199,40	130,20	78,70	64,20	19,10	126,10	252,20	120,90	190,00

Nota. Datos de precipitación a partir de la información recepcionada por correo eléctrico con fecha 20 de julio del 2020 del SENAMHI.

Estación meteorológica de Naranjillo

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2010	120,60	89,10	168,50	172,60	129,50	73,71	69,22	56,31	56,31	171,20	194,00	139,30
2011	77,00	179,50	114,20	215,10	160,40	81,70	51,71	35,13	83,20	98,01	259,50	126,91
2012	157,60	268,41	148,50	80,31	44,90	37,01	51,80	65,30	82,20	182,20	162,60	196,90
2013	219,90	101,00	190,92	157,10	187,91	32,00	69,00	130,41	151,20	271,20	342,60	126,10
2014	71,50	332,40	214,10	276,20	118,40	146,90	152,90	87,50	119,10	291,30	167,40	59,50
2015	117,90	141,20	182,40	240,30	102,10	109,70	49,60	85,30	125,20	94,90	154,60	70,50
2016	59,30	179,20	184,30	181,20	148,50	39,30	127,40	49,00	103,60	120,70	136,00	152,20
2017	153,30	66,50	187,60	125,30	144,60	89,30	117,20	86,50	93,10	204,40	126,60	312,90
2018	235,00	246,80	227,21	230,90	94,40	66,30	28,70	93,40	94,00	136,20	157,40	183,31
2019	245,80	110,80	270,00	88,20	215,10	101,20	79,10	145,50	145,60	229,60	114,00	113,40

Nota. Datos de precipitación a partir de la información recepcionada por correo eléctrico con fecha 20 de julio del 2020 del SENAMHI.

Estación meteorológica de Leymebamba

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2010	93,60	133,40	165,90	102,30	39,80	37,90	78,50	10,70	54,10	161,10	119,00	105,20
2011	112,20	150,40	138,80	96,70	58,30	19,50	60,70	52,90	29,40	77,30	94,40	155,10
2012	91,10	77,80	149,90	135,50	82,10	31,00	41,40	12,90	98,50	135,40	71,60	119,50
2013	126,40	115,60	158,00	102,50	46,80	21,60	10,90	16,20	41,40	158,00	158,10	139,60
2014	84,00	222,80	194,10	74,10	105,50	65,50	57,30	56,00	104,00	115,60	57,80	108,90
2015	104,10	95,20	100,80	104,40	174,00	47,50	80,50	47,40	58,90	69,80	60,10	109,70
2016	99,40	69,40	117,70	91,50	79,50	32,10	93,20	92,90	65,80	95,00	50,20	129,40
2017	239,80	189,90	83,10	100,80	62,00	50,00	58,50	34,30	67,10	138,60	134,90	154,60
2018	264,60	146,80	259,20	143,30	59,70	26,40	24,20	27,20	73,60	101,50	124,00	79,00
2019	159,90	140,10	144,10	172,20	72,50	46,20	50,00	30,00	89,40	200,20	39,50	16,50

Nota. Datos de precipitación a partir de la información recepcionada por correo eléctrico con fecha 20 de julio del 2020 del SENAMHI.

Estación meteorológica de Moyobamba

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2010	97,90	79,80	207,20	59,80	42,50	82,20	50,50	37,90	129,30	70,90	139,90	204,50
2011	119,90	193,80	134,80	114,50	58,30	42,80	11,50	99,70	70,80	197,50	141,90	187,10
2012	84,40	280,90	86,90	102,60	100,80	47,30	30,40	72,80	126,40	86,50	151,30	159,20
2013	136,70	83,40	110,90	133,90	166,00	42,10	47,90	48,50	76,30	182,50	57,20	92,80
2014	195,40	254,80	171,90	81,90	176,90	85,20	55,90	73,90	44,30	189,80	166,10	107,70
2015	154,30	185,40	151,80	161,90	58,00	40,80	65,70	95,60	134,20	111,30	44,10	234,40
2016	79,50	156,30	266,50	164,20	114,30	52,30	56,00	112,60	120,40	232,60	78,30	184,10
2017	106,00	138,90	167,50	181,40	87,30	29,70	123,60	24,30	24,80	60,40	135,70	107,10
2018	188,60	113,80	142,90	43,80	224,30	115,40	32,50	64,90	92,10	117,90	71,10	228,00
2019	54,20	96,20	125,00	89,70	110,90	38,80	69,90	38,60	103,00	115,60	209,90	97,90

Nota. Datos de precipitación a partir de la información recepcionada por correo eléctrico con fecha 20 de julio del 2020 del SENAMHI.

Estación meteorológica de Rioja

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2010	155,10	83,30	265,10	76,90	78,00	76,20	93,50	67,50	107,50	46,40	117,30	250,20
2011	151,30	122,80	153,10	133,40	46,50	21,80	36,00	138,70	95,10	186,80	98,70	130,90
2012	123,60	349,50	227,80	98,60	150,70	16,20	5,50	69,90	76,90	64,30	160,60	116,90
2013	112,10	136,60	177,30	285,40	98,00	51,90	13,60	44,60	49,80	188,60	71,90	71,50
2014	207,30	288,40	144,00	82,40	207,50	50,70	62,30	99,30	52,40	175,30	85,00	127,70
2015	149,80	194,70	91,60	131,70	137,70	29,10	86,80	77,40	96,90	33,90	101,00	166,10
2016	69,50	176,10	148,90	184,60	171,30	49,90	45,80	42,30	127,40	225,40	157,40	304,00
2017	166,80	135,20	146,60	226,10	106,50	25,30	123,50	41,00	73,70	226,40	76,60	78,40
2018	141,60	113,40	304,00	127,30	112,90	123,70	33,70	64,10	105,20	209,60	300,40	361,30
2019	44,90	87,60	178,00	193,90	156,80	35,30	63,50	83,60	94,70	182,00	174,50	197,40

Nota. Datos de precipitación a partir de la información recepcionada por correo eléctrico con fecha 20 de julio del 2020 del SENAMHI.

Estación meteorológica de Rodríguez de Mendoza

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2010	126,70	124,80	217,10	231,30	142,10	88,80	52,60	63,40	137,00	150,80	180,60	105,40
2011	230,20	133,70	223,70	210,30	152,80	102,60	64,10	46,10	127,60	154,00	163,50	105,30
2012	137,70	141,20	233,30	214,30	154,90	71,60	56,90	53,80	153,50	166,40	171,10	114,90
2013	156,40	346,10	64,60	71,40	266,50	152,60	28,10	36,90	140,50	51,00	79,70	145,30
2014	60,20	167,20	166,70	136,90	228,80	168,00	19,20	22,30	152,70	9,50	69,10	166,60
2015	98,10	136,80	279,60	90,40	266,80	22,30	33,70	14,70	143,80	215,70	122,30	70,00
2016	178,30	296,10	288,10	147,50	148,80	13,8	51,90	11,30	65,80	297,20	144,90	139,60
2017	118,70	209,10	197,80	138,10	207,40	33,00	13,10	60,10	99,40	109,60	162,80	123,80
2018	178,10	110,90	206,90	229,40	178,90	206,40	165,80	80,50	195,90	179,80	168,00	109,80
2019	126,40	274,70	117,90	115,20	248,60	91,50	44,00	68,00	148,10	93,10	123,80	138,30

Nota. Datos de precipitación a partir de la información recepcionada por correo eléctrico con fecha 20 de julio del 2020 del SENAMHI.

Apéndice 7. Precipitación promedio de estaciones meteorológicas

Estación	Z (m s.n.m.)	Precipitación (mm*año⁻¹)
Soritor	902	1 793,08
Jepelacio	1 057	1 326,74
Naranjillo	880	1 673,06
Leymebamba	2 800	1 140,68
Rioja	823	1 524,74
Moyobamba	879	1 351,28
Rodríguez de Mendoza	2 900	1 635,11

Nota. Elaboración propia a partir de los datos de precipitación obtenidos del SENAMHI (2020)

Apéndice 8. Correlación entre estación patrón y estaciones meteorológicas

Estación/Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Patrón	129,8	159,42	191,86	142,36	123,26	71,72	63,93	60,98	102,49	148,59	152,65	145,05
Soritor	134,92	170,31	233,84	167,52	127,72	89,97	82,191	68,09	116,53	171,47	221,09	209,43
Jepelacio	100,57	118,03	205,85	123,32	94,9	66,92	63,01	53,45	106,17	134,6	142,7	117,23
Naranjillo	145,79	171,49	188,77	176,72	134,58	77,71	79,66	83,44	105,35	179,97	181,47	148,1
Leymebamba	137,51	134,14	151,16	112,33	78,02	37,77	55,52	38,05	68,22	125,25	90,96	111,75
Rioja	127,06	169,54	207,27	144,82	114,13	67,95	59,79	71,22	92,54	149,63	174,16	146,64
Moyobamba	121,69	158,33	156,54	113,37	113,93	57,66	54,39	66,88	92,16	136,5	119,55	160,28
Rodríguez de Mendoza	141,08	194,06	199,57	158,48	199,56	104,09	52,94	45,71	136,43	142,71	138,58	121,9

Apéndice 9. Resultados del cálculo del IMF anual

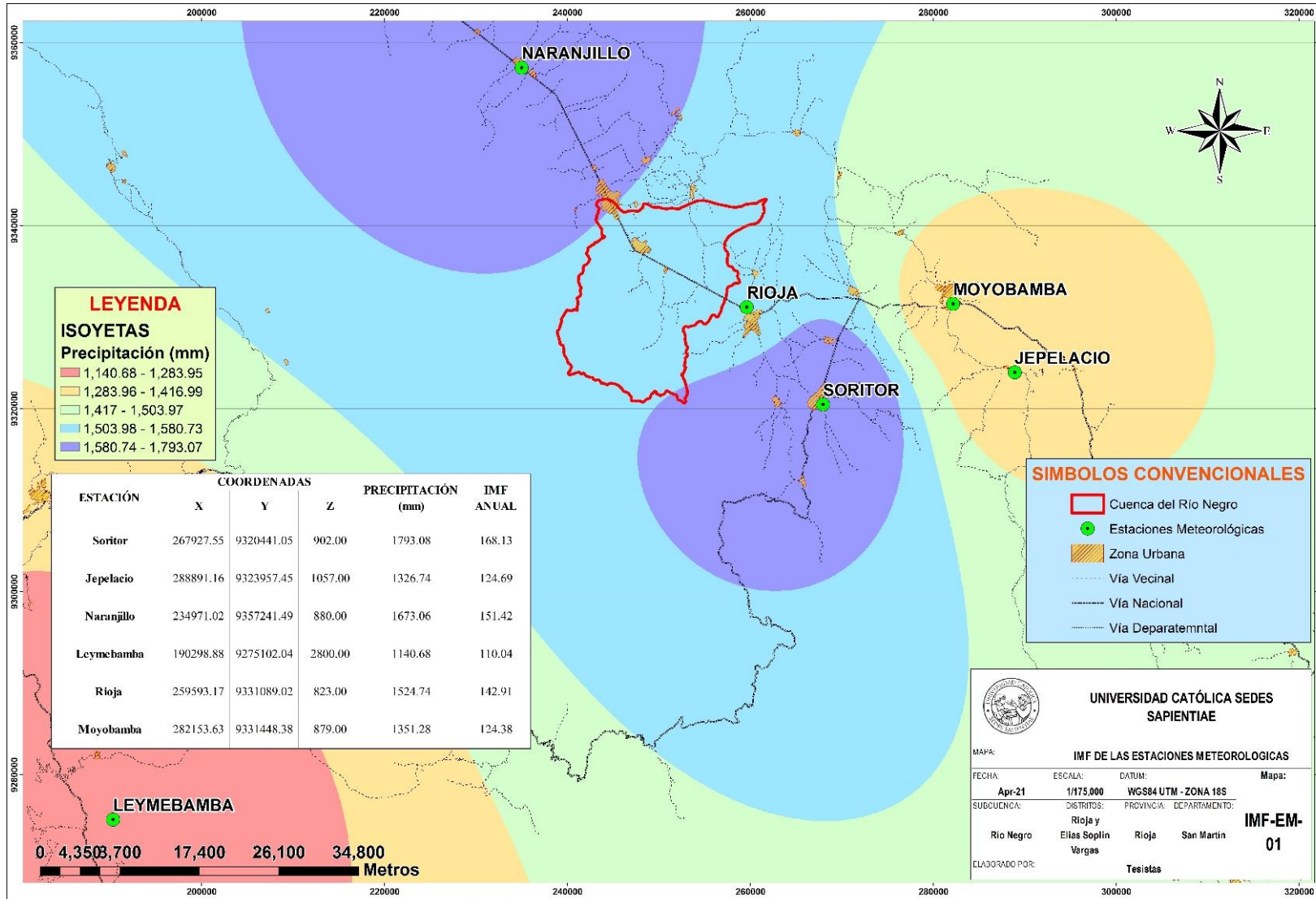
ESTACIONES	PP_MES (mm)												TOTAL ANUAL	IMF ANUAL
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic		
SORITOR	134,92	170,31	233,84	167,52	127,72	89,97	82,191	68,09	116,53	171,47	221,09	209,43	1793,08	168,131
Pi	18203,41	29005,50	54681,15	28062,95	16312,40	8094,60	6755,36	4636,25	13579,24	29401,96	48880,79	43858,97	301472,57	
IMF_MENSUAL	10,15	16,18	30,50	15,65	9,10	4,51	3,77	2,59	7,57	16,40	27,26	24,46		
JEPELACIO	100,57	118,03	205,85	123,32	94,90	66,92	63,01	53,45	106,17	134,60	142,70	117,23	1326,74	124,691
Pi	10114,93	13931,79	42373,40	15206,84	9005,44	4477,75	3969,76	2856,37	11271,86	18117,16	20364,43	13743,11	165432,82	
IMF_MENSUAL	7,62	10,50	31,94	11,46	6,79	3,38	2,99	2,15	8,50	13,66	15,35	10,36		
NARANJILLO	145,79	171,49	188,77	176,72	134,58	77,71	79,66	83,44	105,35	179,97	181,47	148,10	1673,06	151,424
Pi	21254,72	29409,16	35635,25	31230,31	18112,09	6039,15	6346,19	6961,40	11098,83	32389,56	32931,36	21934,20	253342,24	
IMF_MENSUAL	12,70	17,58	21,30	18,67	10,83	3,61	3,79	4,16	6,63	19,36	19,68	13,11		
LEYMEBAMBA	137,51	134,14	151,16	112,33	78,02	37,77	55,52	38,05	68,22	125,25	90,96	111,75	1140,68	110,037
Pi	18909,00	17993,54	22849,35	12618,03	6087,12	1426,57	3082,47	1447,80	4653,97	15687,56	8273,72	12488,06	125517,20	
IMF_MENSUAL	16,58	15,77	20,03	11,06	5,34	1,25	2,70	1,27	4,08	13,75	7,25	10,95		
RIOJA	127,06	169,54	207,27	144,82	114,13	67,95	59,79	71,22	92,54	149,63	174,16	146,64	1524,74	142,908
Pi	16143,40	28744,94	42959,47	20971,87	13024,90	4616,75	3574,84	5071,81	8563,65	22389,14	30332,87	21504,27	217897,90	
IMF_MENSUAL	10,59	18,85	28,17	13,75	8,54	3,03	2,34	3,33	5,62	14,68	19,89	14,10		
MOYOBAMBA	121,69	158,33	156,54	113,37	113,93	57,66	54,39	66,88	92,16	136,5	119,55	160,28	1351,28	124,384
Pi	14808,46	25068,39	24504,77	12852,76	12980,04	3324,68	2958,27	4472,93	8493,47	18632,25	14292,20	25689,68	168077,90	
IMF_MENSUAL	10,96	18,55	18,13	9,51	9,61	2,46	2,19	3,31	6,29	13,79	10,58	19,01		

Apéndice 10. Resultado del IMF por cada estación meteorológica

Estación	X	Y	Z	Precipitación (mm)	IMF Anual
Soritor	267927,55	9320441,1	902	1793,076	168,131
Jepelacio	288891,16	9323957,5	1057	1326,738	124,691
Naranjillo	234971,02	9357241,5	880	1673,060	151,424
Leymebamba	190298,88	9275102	2800	1140,68	110,037
Rioja	259593,17	9331089	823	1524,74	142,908
Moyobamba	282153,63	9331448,4	879	1351,28	124,384

Nota. Elaboración propia a partir de los datos de precipitación obtenidos del SENAMHI (2020).

Apéndice 11. Mapa de isoyetas en base al IMF de las estaciones meteorológicas

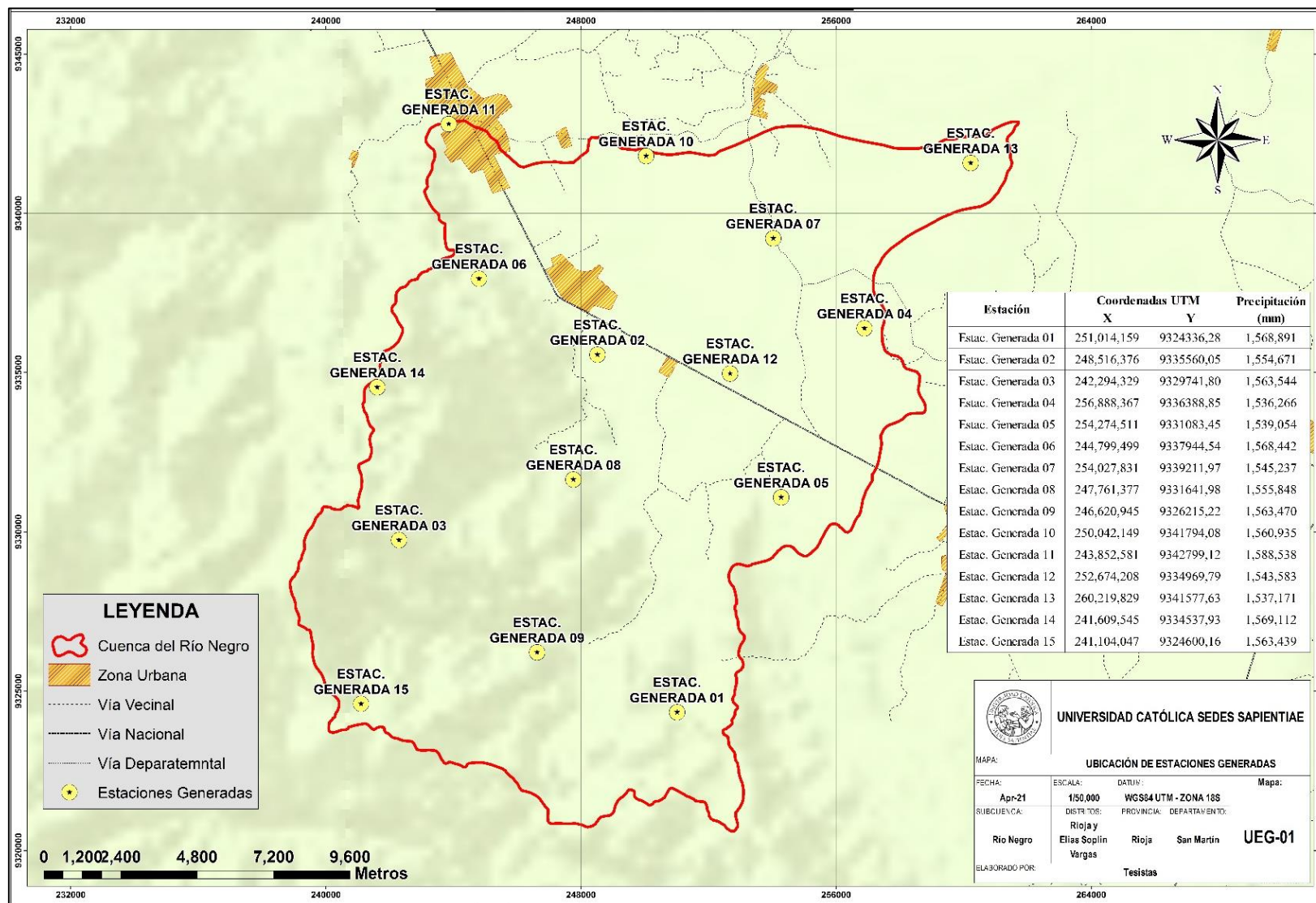


Apéndice 12. Distribución de estaciones puntuales dentro de la subcuenca

Estación	Coordenadas UTM		Precipitación (mm)
	X	Y	
Estac. Generada 01	251014,159	9324336,28	1568,891
Estac. Generada 02	248516,376	9335560,05	1554,671
Estac. Generada 03	242294,329	9329741,80	1563,544
Estac. Generada 04	256888,367	9336388,85	1536,266
Estac. Generada 05	254274,511	9331083,45	1539,054
Estac. Generada 06	244799,499	9337944,54	1568,442
Estac. Generada 07	254027,831	9339211,97	1545,237
Estac. Generada 08	247761,377	9331641,98	1555,848
Estac. Generada 09	246620,945	9326215,22	1563,470
Estac. Generada 10	250042,149	9341794,08	1560,935
Estac. Generada 11	243852,581	9342799,12	1588,538
Estac. Generada 12	252674,208	9334969,79	1543,583
Estac. Generada 13	260219,829	9341577,63	1537,171
Estac. Generada 14	241609,545	9334537,93	1569,112
Estac. Generada 15	241104,047	9324600,16	1563,439

Nota. Elaboración propia a partir de las isoyetas generadas dentro de la subcuenca.

Apéndice 13. Mapa de distribución de estaciones generadas



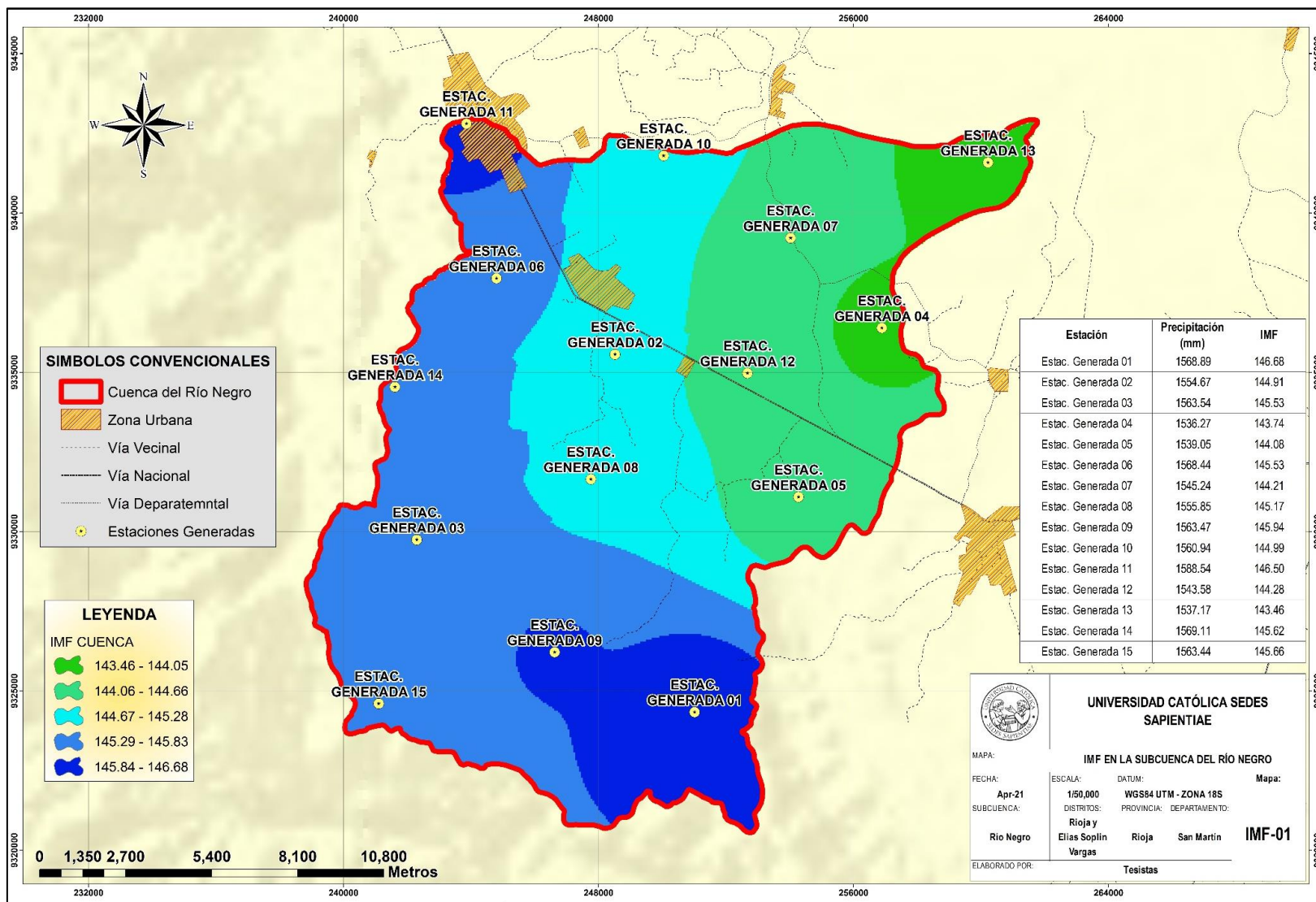
Nota. Elaboración propia a partir de las Isoyetas generadas por la precipitación de las estaciones meteorológicas SENAMHI (2020).

Apéndice 14. IMF por cada estación meteorológica generada dentro de la subcuenca

Estación	Precipitación (mm)	IMF Anual
Estac. Generada 01	1568,89	146,68
Estac. Generada 02	1554,67	144,91
Estac. Generada 03	1563,54	145,53
Estac. Generada 04	1536,27	143,74
Estac. Generada 05	1539,05	144,08
Estac. Generada 06	1568,44	145,53
Estac. Generada 07	1545,24	144,21
Estac. Generada 08	1555,85	145,17
Estac. Generada 09	1563,47	145,94
Estac. Generada 10	1560,94	144,99
Estac. Generada 11	1588,54	146,50
Estac. Generada 12	1543,58	144,28
Estac. Generada 13	1537,17	143,46
Estac. Generada 14	1569,11	145,62
Estac. Generada 15	1563,44	145,66

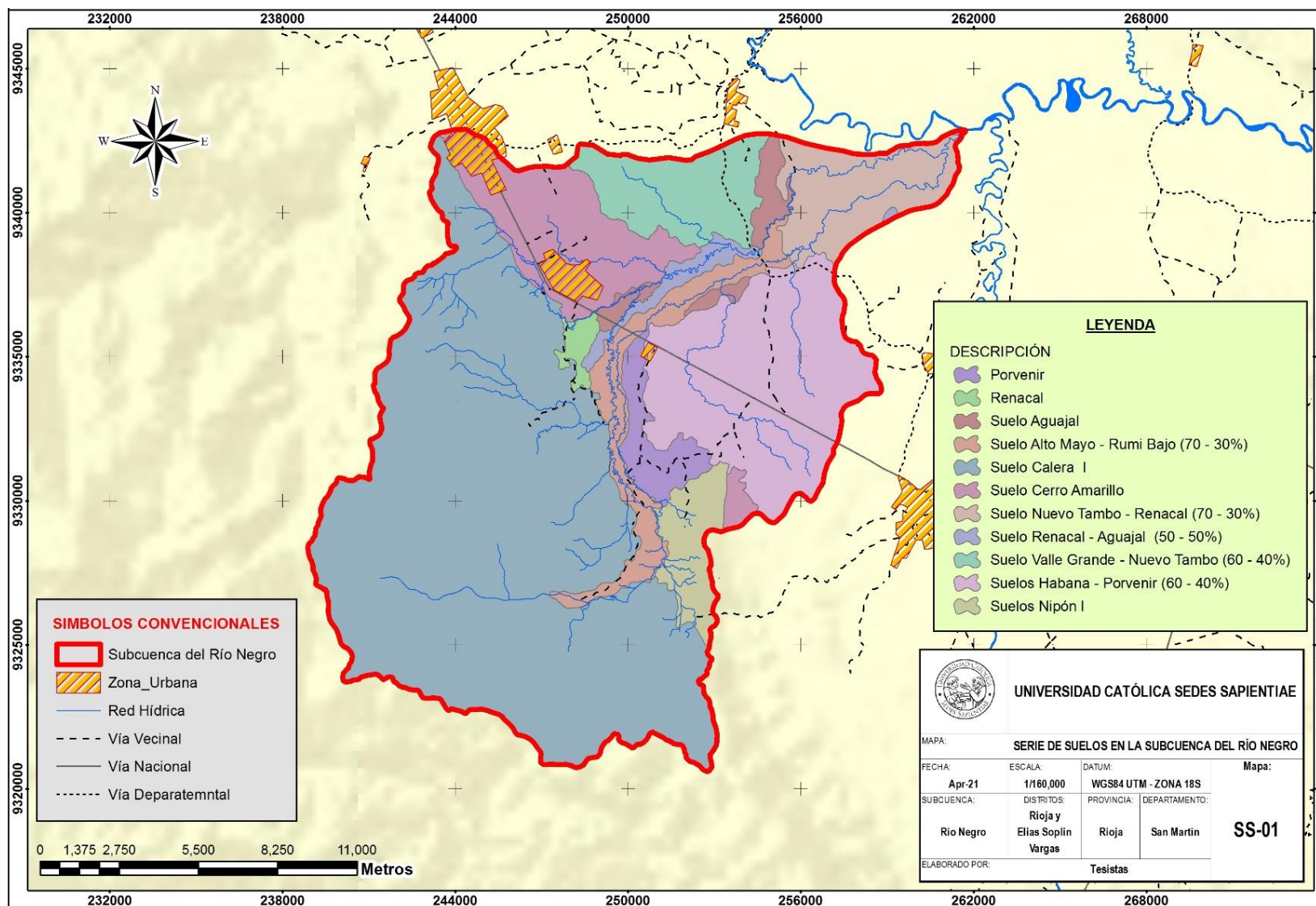
Nota. Elaboración propia a partir de los datos del IMF generado en las isoyetas.

Apéndice 15. Mapa de isoyetas dentro de la subcuenca





Nota. Elaboración propia a partir de los datos de precipitación obtenida del SENAMHI (2020)

Apéndice 16. Mapa de Distribución de la serie de suelos dentro de la subcuenca




Nota. Elaboración propia a partir a partir de la serie de suelos obtenida de la ZEE Alto Mayo (PEAM, 2007)

Apéndice 17. Resultado de análisis de las muestras de suelo



LABORATORIO DE ANÁLISIS AGRÍCOLAS DE SUELOS - ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE NUEVA CAJAMARCA													
		Av. Cajamarca Norte N° 1151, Los Olivos IV Etapa - Distrito de Nueva Cajamarca Provincia de Rioja, San Martín. Teléfono 556443											
		RESULTADO DE ANALISIS DE SUELO - CARACTERIZACION											
NOMBRE : CRISTIAN ALARCON LINARES PROCEDENCIA : Sub Cuenca del río Negro, Segunda Jerusalem - Rioja FECHA DE INGRESO : 16-jul-21		PROFUNDIDAD : 0 - 30 cm FECHA DE REPORTE : 26-jul-21 CULTIVO : ATENCION :											
Nro	MUESTRA	COORDENADAS		COBERTURA	Análisis Físico						Análisis Químico		
					Textura			Clase Textural	ESTRUCTURA cuadro 5		Densidad Aparente	pH	Materia Orgánica
					Arena %	Arcilla %	Limo %		Tipo	Clase			
1	A - 001	245575	9335676	PURMA	43.2	20.1	36.7	Franco	Granular	media	1.42	6.3	4.3
2	B - 001	245418	9335408	PASTO	37.6	16.9	45.5	Franco	Granular	fina	1.43	5.3	4.4
3	C - 001	245062	9334846	CAFETAL	34.8	21.6	43.6	Franco	Prismática	muy grosera	1.39	5.9	3.5
4	D - 001	245623	9334265	BOSQUE	40.4	15.5	44.1	Franco	Granular	media	1.45	6.1	5.4
5	E - 001	247566	9332478	PASTO	20.9	11.2	67.9	Franco Limoso	Granular	fina	1.48	5.8	2.0
6	F - 001	246107	9323420	CAFETAL	41.4	24.5	34.1	Franco	Prismática	muy grosera	1.38	6.5	3.8
7	G - 001	246582	9323965	CAFETAL	62.0	16.3	21.8	Franco Arenoso	Migajosa	media	1.48	7.7	5.3
8	H - 001	246925	9324623	PURMA	47.6	18.6	33.8	Franco	Granular	fina	1.43	6.6	4.8
9	I - 001	247103	9324894	CAFETAL	64.5	13.1	22.5	Franco Arenoso	Prismática	muy grosera	1.52	7.6	3.4
10	J - 001	251768	9327456	PASTO	53.8	26.3	19.9	Franco Arcillo Arenoso	Migajosa	media	1.39	6.1	1.7
11	K - 001	253653	9332441	CAFETAL	51.2	32.6	16.3	Franco Arcillo Arenoso	Prismática	muy grosera	1.36	4.9	1.9
12	L - 001	255133	9335508	PASTO	61.7	11.2	27.1	Franco Arenoso	Granular	fina	1.54	7.4	3.4
13	M - 001	249768	9338927	PASTO	30.5	22.5	46.9	Franco	Migajosa	media	1.37	5.7	1.8

METODOLOGIA EMPLEADA EN LOS ANALISIS (Anexo de la Disposición Complementaria Transitoria del Decreto Supremo N° 013-2010-AG del 20 de noviembre del 2010):

Textura	: Hidrómetro de Bouyoucos	Materia Orgánica	: Walkley y Black
pH	: Potenciómetro en suspensión suelo: agua	Nitrógeno	: Micro Kjeldahl
Conductividad Eléctrica	: Extracto acuoso en la relación suelo: agua 1:1	Fósforo	: Olsen Modificado
Carbonatos	: Gasovolumétrico con calcinómetro de Bernard	Capacidad de Intercambio Catiónico	: Suma de Bases cambiables
Sodio y Potasio	: Fotometría de Llama		
Calcio y Magnesio	: Versenato E.D.T.A		
Aluminio cambiante	: Yuan, extracción con KCl 1N		
Acidez Activa	: Yuan, extracción con KCl 1N		



V"B° Ing. Carlos Egoávil De la Cruz
C.I.P. N° 32743

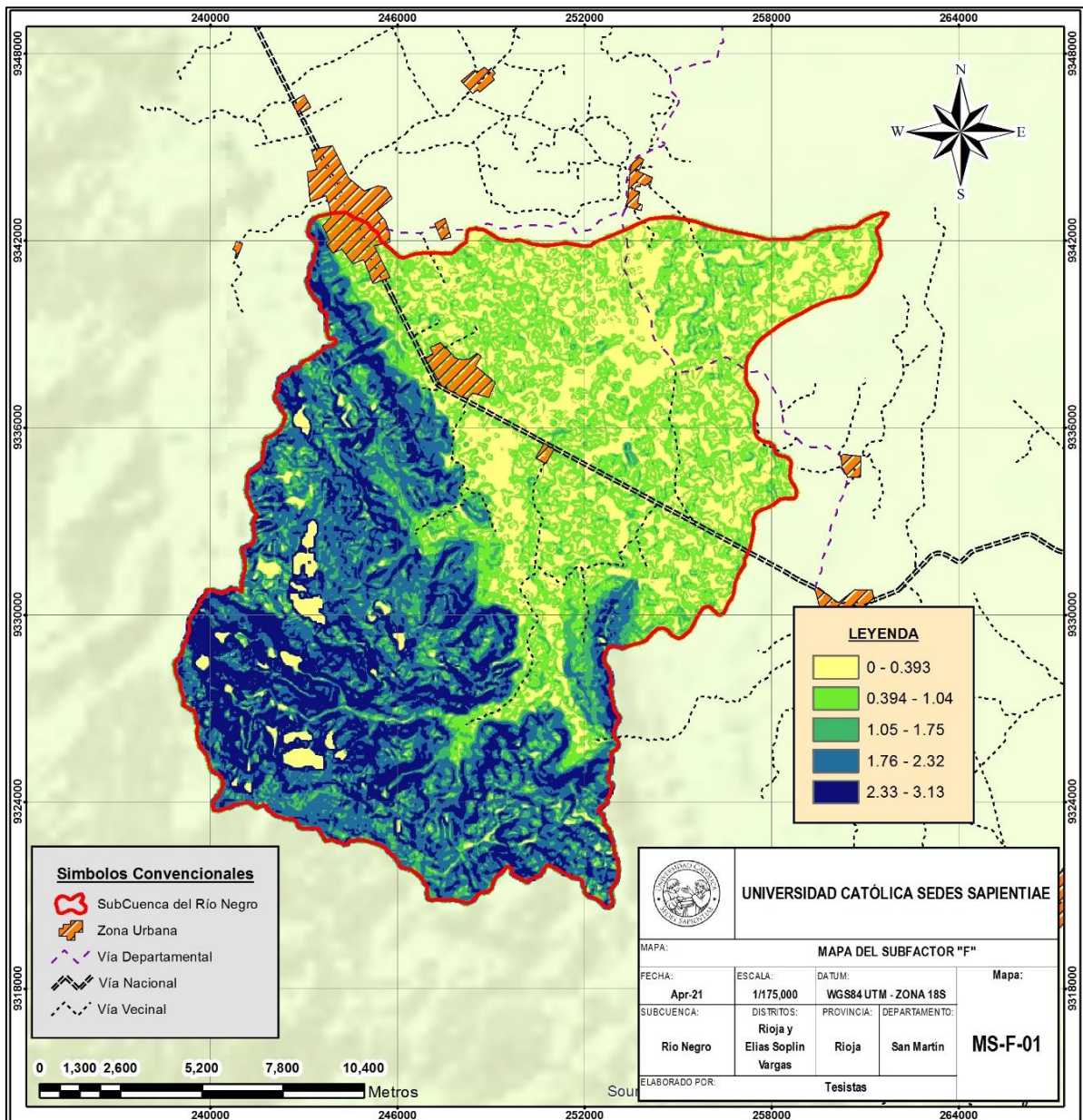
Gleoder Ruiz Flores
Laboratorista de Suelos

Apéndice 18. Actualización de la serie de suelos de la subcuenca

Descripción de Suelos	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	M.O. (%)
Suelo Calera I	55	18,1	26,9	4,2
Suelo Valle Grande - Nuevo Tambo (60 - 40%)	20	46	34	2
Suelo Nuevo Tambo - Renacal (70 - 30%)	25	30	45	7,24
Suelo Cerro Amarillo	15	20	65	1,36
Suelo Alto Mayo - Rumi Bajo (70 - 30%)	26	42	32	4,14
Suelo Aguajal	45	38	17	8,41
Suelo Renacal - Aguajal (50 - 50%)	39	29	32	4,4
Suelos Habana - Porvenir (60 - 40%)	26	44	30	6,2
Renacal	30	30	40	7,24
Porvenir	51,2	26,8	22	1,17
Suelos Nipón I	65	20	15	1,72

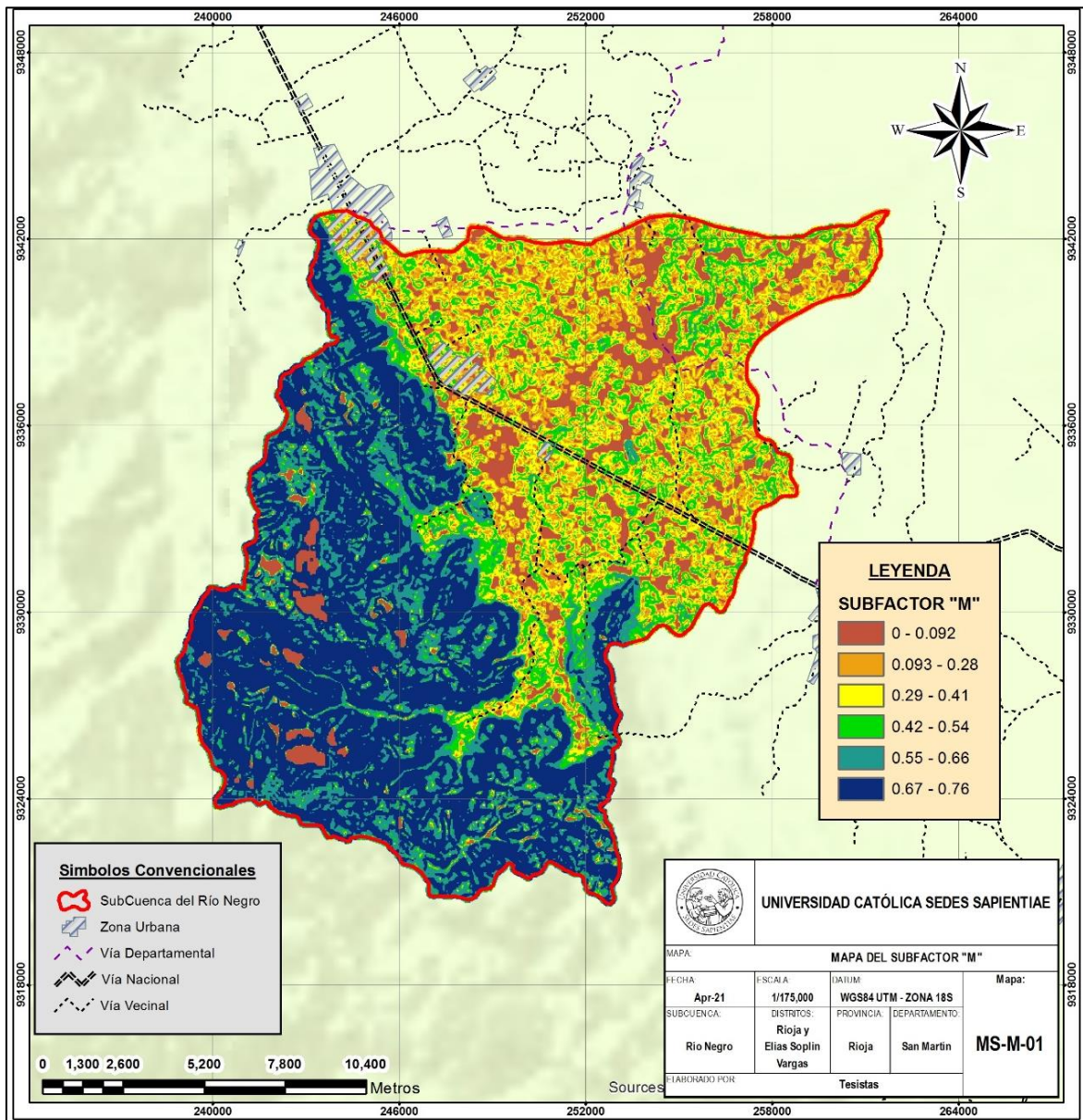
Nota. Elaboración propia a partir de los análisis de suelo realizados en el PEAM.

Apéndice 19. Mapa del Subfactor F



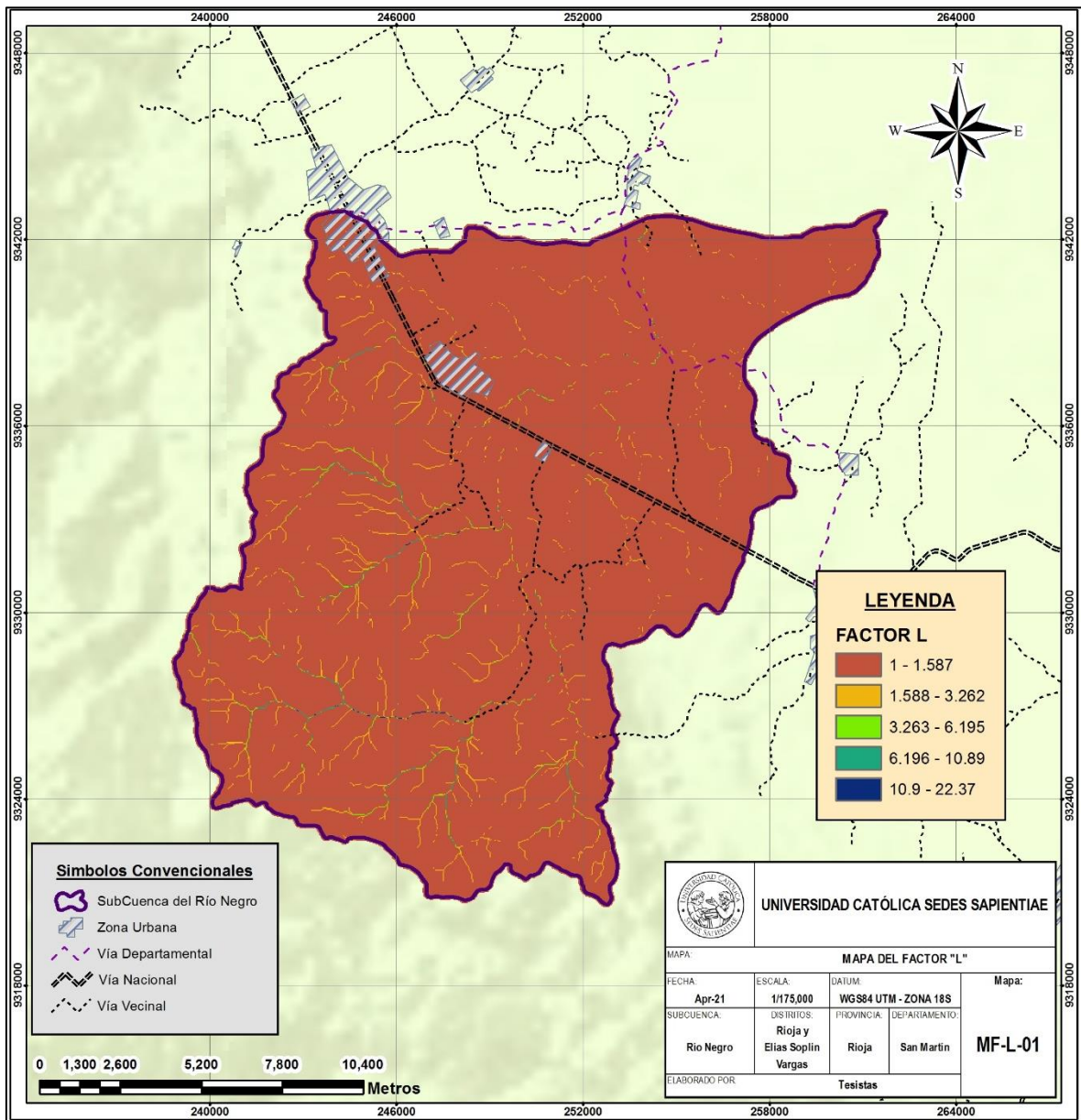
Nota. Elaboración propia (A partir de Shape del MINAM), se observa el cálculo del Subfactor F, en donde se utiliza la pendiente convertida en radianes, también se visualiza la variación de la pendiente desde las zonas más planas de color mostaza, hasta las zonas con mayor pendiente de color azul.

Apéndice 20. Mapa Subfactor M



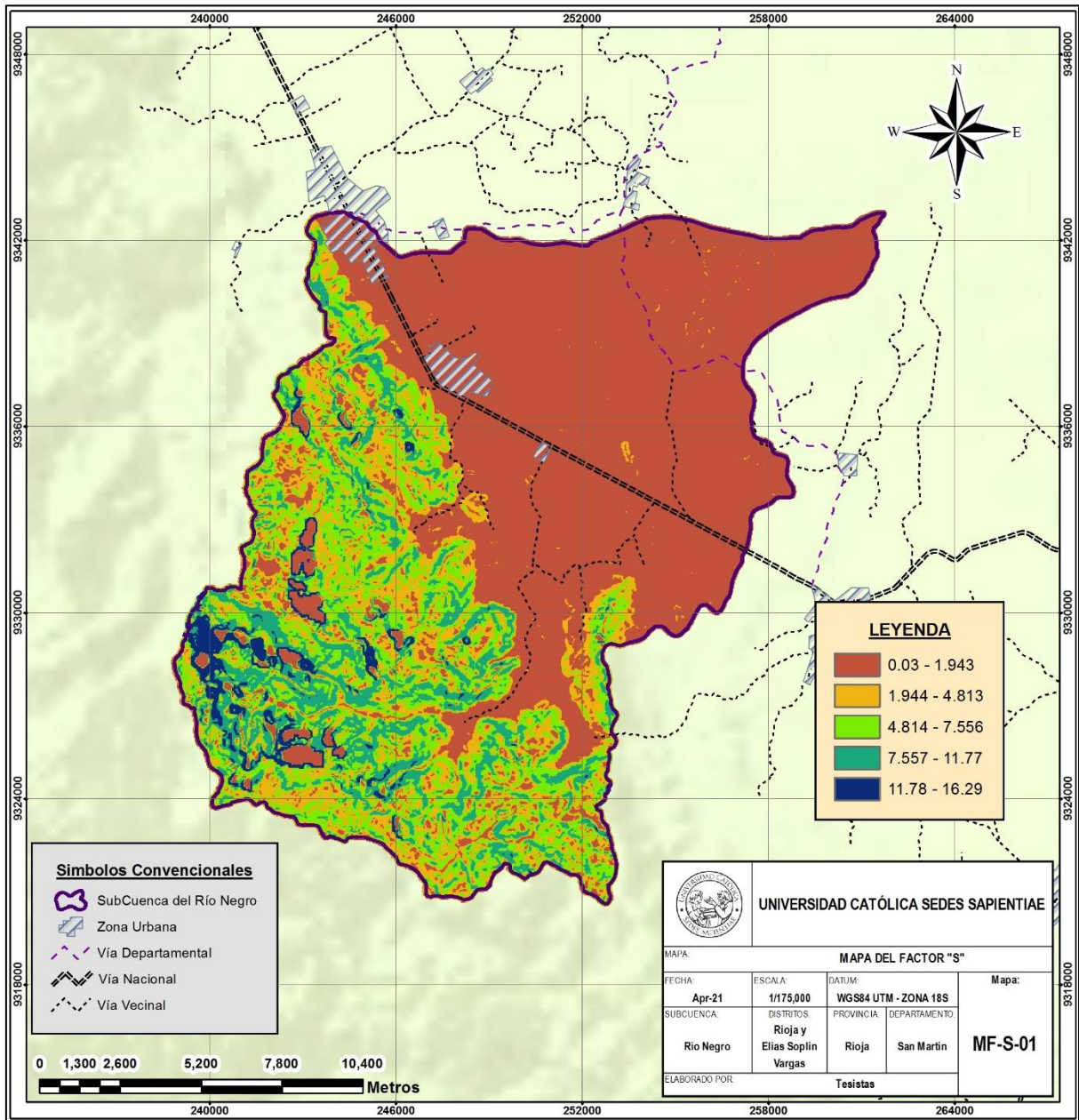
Nota. Elaboración propia (A partir de Shape del MINAM), Se observa el mapa del Subfactor "M", en el mapa se observa las diferentes pendientes que posee la subcuenca del Río Negro.

Apéndice 21. Mapa Factor L



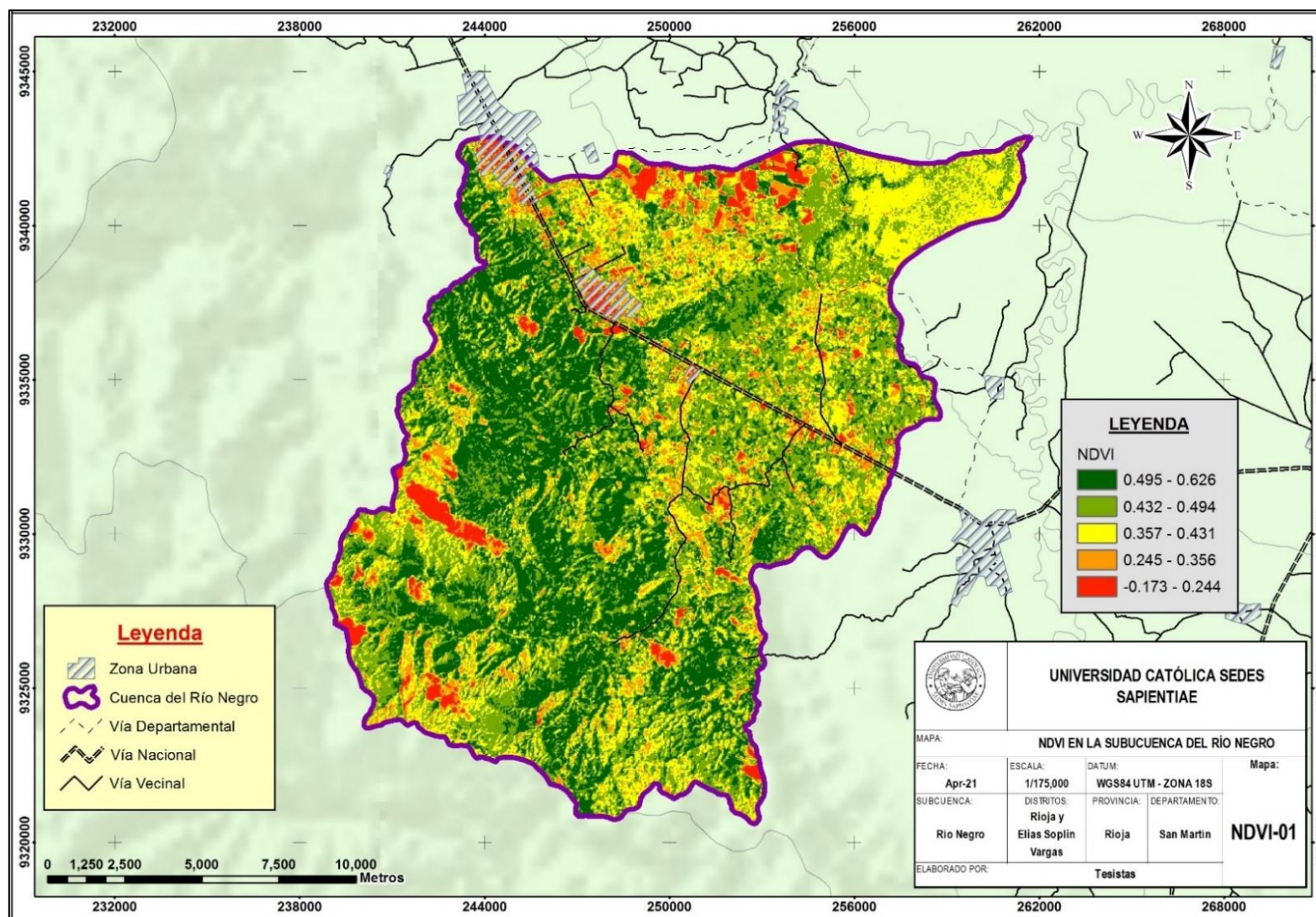
Nota. Elaboración propia (A partir de Shape del MINAM), en el presente mapa, se observa el cálculo del factor L, en donde se presenta los valores ya procesados en los anteriores pasos.

Apéndice 22. Mapa Factor S



Nota. Elaboración propia a partir del Shape del MINAM, en el presente mapa, se observa el cálculo del factor S, en donde se presenta los valores ya procesados de F y M y las diferentes pendientes de la subcuenca.

Apéndice 23. Mapa del NDVI en la subcuenca del río Negro



Nota. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales obtenidos del MINAM, en el mapa se puede observar los diferentes tipos de cobertura de bosque en la subcuenca del río Negro, los cuales varían de -0.173 a 0.626; donde según su valor mientras más se acerque a la unidad significa que es un suelo sin presencia de cobertura vegetal.