



**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER EL
TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DEL SUELO
MEDIANTE EL MODELO RUSLE EN LA
MICROCUENCA DEL RÍO JUCUSBAMBA, PROVINCIA
DE LUYA, REGIÓN AMAZONAS (PERÚ)**

Autor (a): Augusto Abrahám Raymundo Jáuregui

Asesor (a): Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres

Coasesor (a): Ing. Elgar Barboza Castillo

Registro: _____

CHACHAPOYAS - PERÚ

2018



**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER EL
TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DEL SUELO
MEDIANTE EL MODELO RUSLE EN LA
MICROCUENCA DEL RÍO JUCUSBAMBA, PROVINCIA
DE LUYA, REGIÓN AMAZONAS (PERÚ)**

Autor (a): Augusto Abrahám Raymundo Jáuregui

Asesor (a): Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres

Coasesor (a): Ing. Elgar Barboza Castillo

Registro: _____

CHACHAPOYAS - PERÚ

2018

DEDICATORIA

A MI FAMILIA

Dedico el presente trabajo a mí padre, a mí madre y a mis hermanos por el apoyo incondicional brindado en el proceso de mi formación profesional.

A MIS AMIGOS Y PROFESORES

Por su apoyo en el proceso de mi formación profesional, por los conocimientos impartidos en clase, consejos y motivación para seguir superándome cada día.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la vida y ser mi ángel guardián cada día, a mis padres y hermanos, quienes confiaron en mí y me brindaron todo su apoyo en cada instante de mi formación profesional y en el desarrollo de la presente tesis.

Al asesor Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres y coasesor Ing. Elgar Barboza Castillo, por todo el apoyo, colaboración, confianza, amistad, tiempo y asesoramiento continuo durante la formulación, ejecución y redacción del informe final de la presente tesis en estas importantes disciplinas de hidrología de cuencas y geomática (SIG y teledetección).

A los docentes de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas y miembros del jurado de tesis M. Sc. Segundo Manuel Oliva Cruz, Dra. Cástula Alvarado Chuqui e Ing. Rolando Salas López, por sus aportaciones y sugerencias al informe inicial, dando la oportunidad de poder mejorar las ideas y mostrar en un lenguaje más fácil de entender.

Y a todos los amigos y colegas que estuvieron ahí apoyándome en cada momento con sus consejos y aportaciones para la ejecución de la presente tesis.

El Autor...

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

Dr. Policarpio Chauca Valqui

Rector

Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón

Vicerrector Académico

Dra. Flor Teresa García Huamán

Vicerrectora de Investigación

Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

VISTO BUENO DEL ASESOR

El docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, hace constar que he asesorado la realización de la tesis titulada **“EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DEL SUELO MEDIANTE EL MODELO RUSLE EN LA MICROCUENCA DEL RÍO JUCUSBAMBA, PROVINCIA DE LUYA, REGIÓN AMAZONAS (PERÚ)”** del tesista egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental:

Bach. **AUGUSTO ABRAHAM RAYMUNDO JÁUREGUI**

El docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, da el Visto Bueno al Informe Final de la tesis en mención, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndome a supervisar el levantamiento de observaciones para su posterior sustentación.

Chachapoyas, diciembre de 2018.

Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres

Asesor de tesis

VISTO BUENO DEL COASESOR

El docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, hace constar que he asesorado la realización de la tesis titulada **“EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DEL SUELO MEDIANTE EL MODELO RUSLE EN LA MICROCUENCA DEL RÍO JUCUSBAMBA, PROVINCIA DE LUYA, REGIÓN AMAZONAS (PERÚ)”** del tesista egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental:

Bach. **AUGUSTO ABRAHAM RAYMUNDO JÁUREGUI**

El docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, da el Visto Bueno al Informe Final de la tesis en mención, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndome a supervisar el levantamiento de observaciones para su posterior sustentación.

Chachapoyas, diciembre de 2018.

Ing. Elgar Barboza Castillo

Co-asesor de tesis

JURADO EVALUADOR

M. Sc. Segundo Manuel Oliva Cruz

Presidente

Dra. Cástula Alvarado Chuqui

Secretaria

Ing. Rolando Salas López

Vocal



ANEXO 2-N

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS

En la ciudad de Chachapoyas, el día 28 de diciembre del año 2018, siendo las 10:00AM horas, el aspirante: RAYMUNDO JAUREGUI AUGUSTO ABRAHAM defiende públicamente la Tesis titulada: EVALUACIÓN DE LA PERDIDA DEL SUELO MEDIANTE EL MODELO RUSLE EN LA MICROCUENCA DEL RIO JUCUS-BAMBA, PROVINCIA DE LUYA, REGIÓN AMAZONAS (PERÚ) para optar el Título Profesional en INGENIERIA AMBIENTAL otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, ante el Jurado, constituido por:
 Presidente : Ing. SEGUNDO MANUEL OLIVA CRUZ
 Secretario : Ing. ROLANDO SALAS LOPEZ
 Vocal : Dra. CASTULA ALVARADO CHUQUI



Procedió el (los) aspirante (s) a hacer la exposición de los antecedentes, contenido de la tesis y conclusiones obtenidas de la misma, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la tesis presentada, los miembros del jurado pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones u objeciones consideraran oportunas, las cuales fueron contestadas por el los aspirante (s).

Tras la intervención de los miembros del jurado y las oportunas contestaciones del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los miembros del jurado presentes en el acto, a fin de que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el jurado determinará la calificación global concedida a la tesis, en términos de:

Notable o sobresaliente () Aprobado (x) No apto ()

Otorgada la calificación el presidente del Jurado comunica, en sesión pública, la calificación concedida. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las horas 11:00 AM del mismo día, el jurado concluye el acto de sustentación del Trabajo de Investigación.


PRESIDENTE


SECRETARIO


VOCAL

OBSERVACIONES:

DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO

Yo, **Augusto Abraham Raymundo Jáuregui**, identificado con DNI **70853359**, egresado de la Escuela Profesional de **Ingeniería Ambiental** de la Facultad de **Ingeniería Civil y Ambiental** de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.

DECLARO BAJO JURAMENTO QUE:

1. Soy autor de la tesis titulada: "**EVALUACIÓN DE LA PÉRDIDA DEL SUELO MEDIANTE EL MODELO RUSLE EN LA MICROCUENCA DEL RÍO JUCUSBAMBA, PROVINCIA DE LUYA, REGIÓN AMAZONAS (PERÚ)**", que presento para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**.
2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.
3. La tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.
4. La tesis no ha sido publicada, ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
5. La información presentada es real y no ha sido falsificada, ni duplicada, ni copiada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo toda la responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, para obtener el Título Profesional, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. Asimismo, por la presente me comprometo a asumir además todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse para LA UNTRM en favor de terceros por motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontraren causa en el contenido de la tesis.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones civiles y penales que de mi acción deriven.

Chachapoyas, diciembre de 2018.

Augusto Abraham Raymundo Jáuregui

ÍNDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
AUTORIDADES UNIVERSITARIAS	IV
VISTO BUENO DEL ASESOR	V
VISTO BUENO DEL COASESOR	VI
JURADO EVALUADOR	VII
ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL	VIII
DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO	IX
ÍNDICE	X
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
I. INTRODUCCIÓN	15
II. MATERIALES Y MÉTODOS	18
2.1 Materiales	18
2.1.1 Material cartográfico y satelital	18
2.1.2 Equipos y otros materiales	18
2.1.3 Software	18
2.2 Área de estudio	18
2.3 Diseño metodológico	20
2.4 Análisis de datos	28
III. RESULTADOS	29
3.1 Estimación de los parámetros del modelo RUSLE.....	29
3.2 Cuantificación y cartografía de la pérdida de suelo	38
3.3 Análisis de datos.....	38
IV. DISCUSIÓN	40
V. CONCLUSIONES	44
VI. RECOMENDACIONES	45
VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
ANEXOS	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas para calcular el factor R.	23
Tabla 2. Nombre de suelo y porcentajes de arena, limo, arcilla y carbono orgánico para la microcuenca del río Jucusbamba	25
Tabla 3. Valor del factor P según la pendiente (%)	27
Tabla 4. Clases y rangos de pérdida de suelo.	28
Tabla 5. Precipitación anual media y el valor de factor R correspondiente	29
Tabla 6. Valores de los parámetros para calcular el factor K.	31
Tabla 7. Clases de cobertura y uso actual del suelo (%) para la microcuenca del río Jucusbamba.....	33
Tabla 8. Matriz de confusión y exactitud temática	35
Tabla 9. Análisis de datos para los rangos de pérdida de suelo.	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la microcuenca del río Jucusbamba en la provincia de Luya, departamento Amazonas.....	19
Figura 2. Diseño metodológico para evaluar la pérdida de suelo en la microcuenca del río Jucusbamba.	20
Figura 3. Marco conceptual de la pérdida de suelo para el modelo RUSLE.....	22
Figura 4. Mapa del factor R.....	30
Figura 5. Mapa del factor K.....	32
Figura 6. Mapa del factor LS.....	34
Figura 7. Mapa del factor C.....	36
Figura 8 . Mapa del factor P.	37
Figura 9. Mapa de pérdida de suelo por erosión hídrica para la microcuenca del río Jucusbamba.....	39

RESUMEN

La erosión del suelo es un problema importante a nivel mundial, el cual deriva de las malas prácticas agrícolas y actividades antrópicas. Este problema afecta a la calidad física y química de la tierra y del agua. En este trabajo de investigación se evaluó la pérdida del suelo mediante la Ecuación de Pérdida de Suelo Universal Revisada (RUSLE) con el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección en la microcuenca del río Jucusbamba (Perú). Los factores de la ecuación se estimaron a partir de información base como datos de precipitación (Factor R), mapa de suelos de la FAO (Factor K), modelo de elevación digital de terreno (Factor LS), mapa de cobertura y uso actual del suelo (Factor C) y mapa de pendiente (Factor P). Los resultados indican que el 93,34 % (0 a 5 tn/ha.año) del área total existe una pérdida leve, en el 3,94% (5 a 10 tn/ha.año) existe una pérdida moderada, en el 1,82% (10 - 20 tn/ha.año) ocurre una pérdida alta, en el 0,61% (20 - 40 tn/ha.año) la pérdida de suelo es muy alta, y solo en el 0,29% (> 40 tn/ha.año) la pérdida de suelo es severa. Se concluye que las zonas con alta, muy alta y severa erosión del suelo se localizan en la parte media y baja de la microcuenca.

Palabras clave: SIG, teledetección, erosión del suelo, hidrología, cuencas hidrográficas.

ABSTRACT

Soil erosion is a major problem worldwide, which derives from poor agricultural practices and anthropogenic activities. This problem affects the physical and chemical quality of the land and water. In this research work, soil loss is evaluated through the Universal Revised Soil Loss Equation (RUSA) with the use of Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing in the Jucusbamba River micro-watershed (Peru). The factors of the equation are estimated from the data base of use (Factor R), soil map of the FAO (K Factor), digital terrain right model (LS Factor), coverage map and current use of Soil (Factor C) and slope map (Factor P). The results indicate that 93.34% (0 to 5 tn / ha.year) of the total area there is a slight loss, in 3.94% (5 to 10 tn / ha.year) there is a moderate loss, in the 1.82% (10 - 20 tn / ha.year) a high loss occurs, at 0.61% (20-40 tn / ha.year) the soil loss is very high, and only at 0.29 % (> 40 tn / ha.year) the loss of soil is severe. It is concluded that areas with high, very high and severe soil erosion are located in the middle and lower part of the microbasin.

Keywords: GIS, remote sensing, soil erosion, hydrology, watersheds.

I. INTRODUCCIÓN

La pérdida del suelo por erosión hídrica, es uno de los problemas más importantes y un peligro ambiental crítico en la actualidad, debido a la disminución progresiva de la relación entre los recursos naturales, la población y el cambio de clima (Gelagay & Minale, 2016). Esta pérdida de suelo se activa por diferentes factores: prácticas agrícolas inapropiadas, deforestación, sobrepastoreo, incendios forestales y actividades de construcción, haciendo que las partículas del suelo sean más propensas a la erosión (Terranova et al., 2009).

Un adecuado análisis y evaluación de este problema depende en gran medida de su contexto espacial, económico, ambiental y agrícola (Cotler et al., 2007). Por lo tanto, se necesita una buena gestión de la pérdida de suelo para reducir la degradación de la tierra y la contaminación del agua debido a la sedimentación (Devatha et al., 2015). Para estimar la erosión del suelo y establecer planes de manejo de la erosión, se han desarrollado y utilizado muchos modelos de computadora dentro del ámbito de la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) que son herramientas de múltiples usos para modelar los principales problemas relacionados con los recursos hídricos (Pham et al., 2018).

La modelización de la erosión del suelo puede considerar muchas de las complejas interacciones que influyen en las tasas de erosión, simulando los procesos de erosión en la cuenca (Devatha et al., 2015). Varios modelos paramétricos como empíricos (estadística), conceptuales (semi empíricos) y modelos basados en procesos físicos (deterministas) están disponibles para calcular la pérdida de suelo. Uno de estos modelos es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), desarrollada en el año 1965 por Wischmeier & Smith (1978). Originalmente, se desarrolló como USLE principalmente para estimar la erosión del suelo en tierras de cultivo o topografía de pendiente suave.

Posteriormente se desarrollaron sus versiones revisadas como RUSLE y modificadas como MUSLE (Wischmeier & Smith, 1978; Renard et al. 1996; Lee & Lee, 2006). Los modelos de erosión conjuntamente con las aplicaciones de SIG constituyen herramientas eficaces para estudios de pérdida de suelo por erosión (Portuguez, 2015).

A nivel internacional se han realizado estudios de evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica a través del modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), complementado con técnicas de SIG y teledetección (Prasannakumar et al., 2012; Devatha et al., 2015; Gelagay & Minale, 2016; Kayet et al., 2018; Pham et al., 2018). En Perú destacan los estudios realizados en el río Ilave, hidrográficamente ubicado en la Vertiente del Lago Titicaca (Ccama, 2012), en la quebrada Chaya Grande de la subcuenca del río Yapatera (Córdova, 2015), en la cuenca del río Siguas en Arequipa (Portuguez, 2015) y en la subcuenca del río Shullcas (Huancayo) (Solano, 2016). En el departamento de Amazonas Cabrejos (2016), determinó el riesgo, vulnerabilidad y cuantificó la erosión hídrica en la microcuenca del río Atuen (Amazonas). Por su parte, el GORE & IIAP (2010), ejecutaron el estudio de Zonificación Ecológica Económica para la región de Amazonas para determinar las unidades ecológicas económicas que presentan alto riesgo por estar expuestas a la erosión, inundación, deslizamientos, huaycos y otros procesos que afectan o hacen vulnerables al territorio y a sus poblaciones, así como los derivados de la existencia de las fallas geológicas.

En la actualidad, la microcuenca del río Jucusbamba presenta casos de erosión hídrica, por efectos de las distintas actividades antropogénicas que se realizan a lo largo y ancho de su territorio, y por las alteraciones climáticas como consecuencia del calentamiento global, lo cual se traduce en pérdidas importantes de la capacidad productiva de los suelos y pastos. Esto representa una serie de amenazas en producción de alimentos de primera necesidad, que pone en riesgo el bienestar y la salud de la población. La información sobre la pérdida de suelo es, por lo tanto, esencial para planificar y priorizar proyectos de control y restauración dentro de la microcuenca, y de esta manera comprender el proceso de erosión e interacción (Ganasri & Ramesh, 2015).

Por otra parte, el transporte de sedimentos de las partes altas hacia las partes bajas genera problemas de inundación en la microcuenca, que se traduce muchas veces en pérdidas humanas, daños a viviendas e infraestructuras, y pérdidas de tierras agrícolas como lo reportaron los diarios Perú 21 y RPP Noticias en diciembre de 2012.

Por lo expuesto, se indica el problema socioambiental, que debe ser materia de estudio para prevenir y/o controlar pérdidas económicas, sociales y ambientales, ello justifica

el desarrollo de la presente investigación referido a la evaluación de la pérdida del suelo mediante el modelo RUSLE en la microcuenca del río Jucusbamba, con la finalidad de contar con información cartográfica de las zonas con alto rango de pérdida de suelo por erosión hídrica, el cual será un instrumento de gestión para la intervención del gobierno local, regional y nacional en materia de manejo, conservación y restauración de las zonas afectadas por erosión. Además, cartografiar el área hidrográfica ayudará en la toma de decisiones para la implementación de prácticas de conservación del suelo y los mecanismos de gestión en el hidroecosistema.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

2.1.1 Material cartográfico y satelital

Para el desarrollo de la investigación se utilizó la siguiente información geoespacial y satelital.

- Cartas Nacionales del Instituto Geográfico Nacional, a escala 1: 100 000 (13g y 13h).
- Capa vectorial de límites distritales, provinciales y departamentales del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).
- Capa vectorial del mapa digital mundial de suelo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Modelo Elevación Digital de Terreno del Sensor Alos Palsar de 12,5 m de resolución espacial.
- Imagen Satelital Sentinel 2A del mes de noviembre del año 2017 con resolución espacial de 10 metros.

2.1.2 Equipos y otros materiales

- GPS Garmin Montana 650, precisión $\pm 3m$.
- Cámara fotográfica.
- Laptop Toshiba, procesador i7 de RAM 8 GB y disco duro 1 GB.
- Disco duro externo Toshiba 1 GB.
- Libreta de campo.
- Impresora Epson 380.

2.1.3 Software

- QGIS v. 3,0
- ArcGIS v. 10,5
- Google Earth Pro v. 7,3
- Microsoft Office v. 2013

2.2 Área de estudio

La microcuenca del río Jucusbamba (Figura 1) se localiza en la provincia de Luya, departamento de Amazonas (Perú), entre los extremos de coordenadas $6^{\circ}17'41,62''$ y $6^{\circ}3'42,28''$ de latitud sur y $77^{\circ}54'51,41''$ y $78^{\circ}4'26,52''$ de longitud oeste.

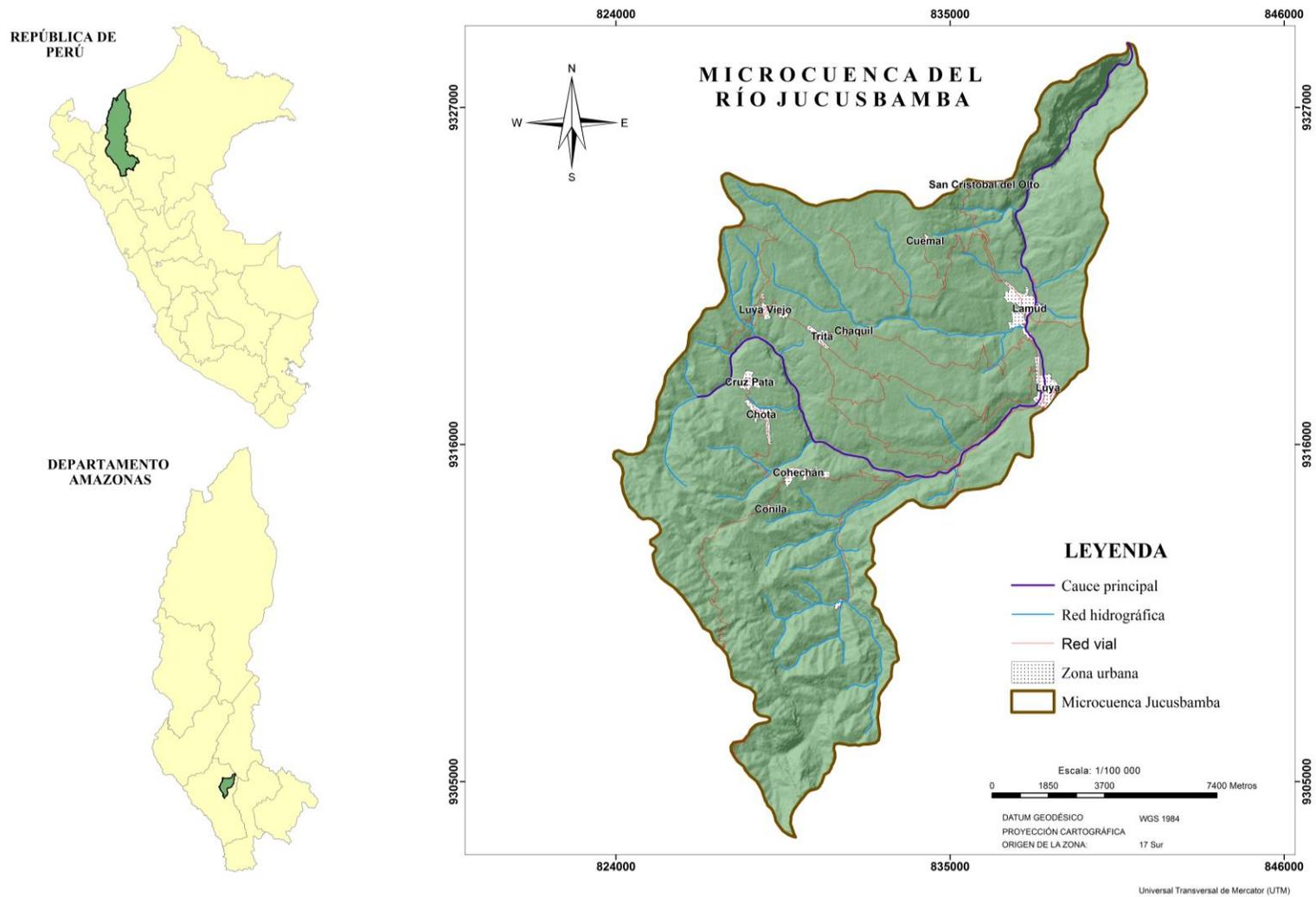


Figura 1. Mapa de ubicación de la microcuenca del río Jucusbamba en la provincia de Luya, departamento Amazonas.

Abarca una superficie de 19 133,13 ha y la longitud del cauce principal es de 30,12 km. El relieve está representado por montañas de laderas muy empinadas a empinadas con y altitudes que oscilan entre los 1436 a 3468 msnm (Escobebo, 2010). El clima se caracteriza por ser ligeramente húmedo a templado cálido con una temperatura media anual de 18 °C con precipitaciones superiores a 1000 mm/año (Vargas, 2010). Presenta formaciones vegetales de bosque húmedo Montano Bajo Tropical (bh-MBT) y bosque muy húmedo Montano Tropical (bmh-MT) (Holdridge, 1987). Los principales núcleos poblacionales que están concentrados dentro de la microcuenca son las ciudades de Luya, Lamud, San Cristóbal del Olto, Trita, Luya Viejo, Cruz Pata, Conila y Cohechan con una población de 11 333 habitantes (INEI, 2015). La actividad económica predominante es la agricultura (siembra de cultivos andinos predominado el cultivo de papa), la ganadería en pequeña escala y el turismo.

2.3 Diseño metodológico

La evaluación de la pérdida del suelo por erosión hídrica mediante el modelo RUSLE en la microcuenca del río Jucusbamba, se realizó de acuerdo al siguiente diseño metodológico (Figura 2).

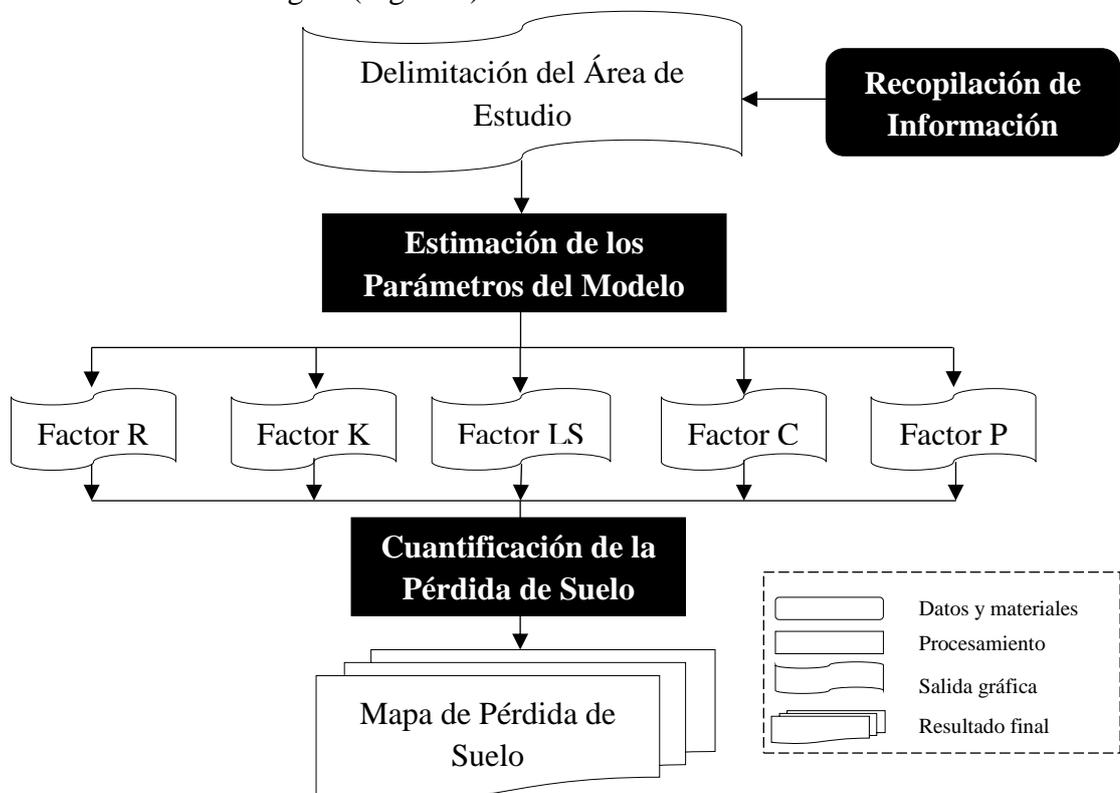


Figura 2. Diseño metodológico para evaluar la pérdida de suelo en la microcuenca del río Jucusbamba.

a) Recopilación de información

Para el desarrollo del estudio se utilizaron fuentes de datos primarios y secundarios. Los datos primarios se recolectaron a través de salidas al campo y observación directa en los diferentes estratos del terreno, con el uso de un receptor GPS (Sistema de Posicionamiento Global).

Los datos secundarios como el mapa mundial del suelo de la FAO se extrajeron del portal geográfico (FAO, 2007) para el área de estudio; el Modelo Digital de Elevación de Terreno (MDET) con resolución espacial de (12,5x12,5 m) fue descargado de la plataforma Alaska Satellite Facility (Alaska Satellite Facility, 2018), de la cual se derivó el factor topográfico (LS).

La imagen satelital Sentinel 2A fue descargado de la plataforma Land Viewer Eos (EOS, 2018). La red de drenaje se obtuvo de las cartas nacionales 13g y 13h (1: 100 000) del IGN. Además, se utilizaron los registros de precipitaciones de la red de estaciones de meteorológicas del Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza (UNTRM) y del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) para estimar el factor R.

b) Estimación de los parámetros del modelo RUSLE (Ecuación 1)

Esta ecuación es una función de cinco factores de entrada en formato de modelo ráster y se expresa como:

$$A = R * K * LS * C * P \dots\dots\dots Ecuación 1$$

Donde:

- A: Pérdida de suelo anual promedio (tn/ha.año)
- R: Factor de erosividad de lluvia (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.año⁻¹)
- K: Factor de erosionabilidad del suelo (tn.ha.h.ha⁻¹.MJ⁻¹.mm⁻¹)
- LS: Factor topográfico (adimensional)
- C: Factor de cobertura y gestión (adimensional)
- P: Práctica de soporte (adimensional)

Estos cinco factores son los datos de entrada para el modelo RUSLE (Ecuación 1). Los recursos para identificar sus valores son los datos del terreno, lluvia, cobertura y uso de la tierra y datos de las propiedades físicas del suelo.

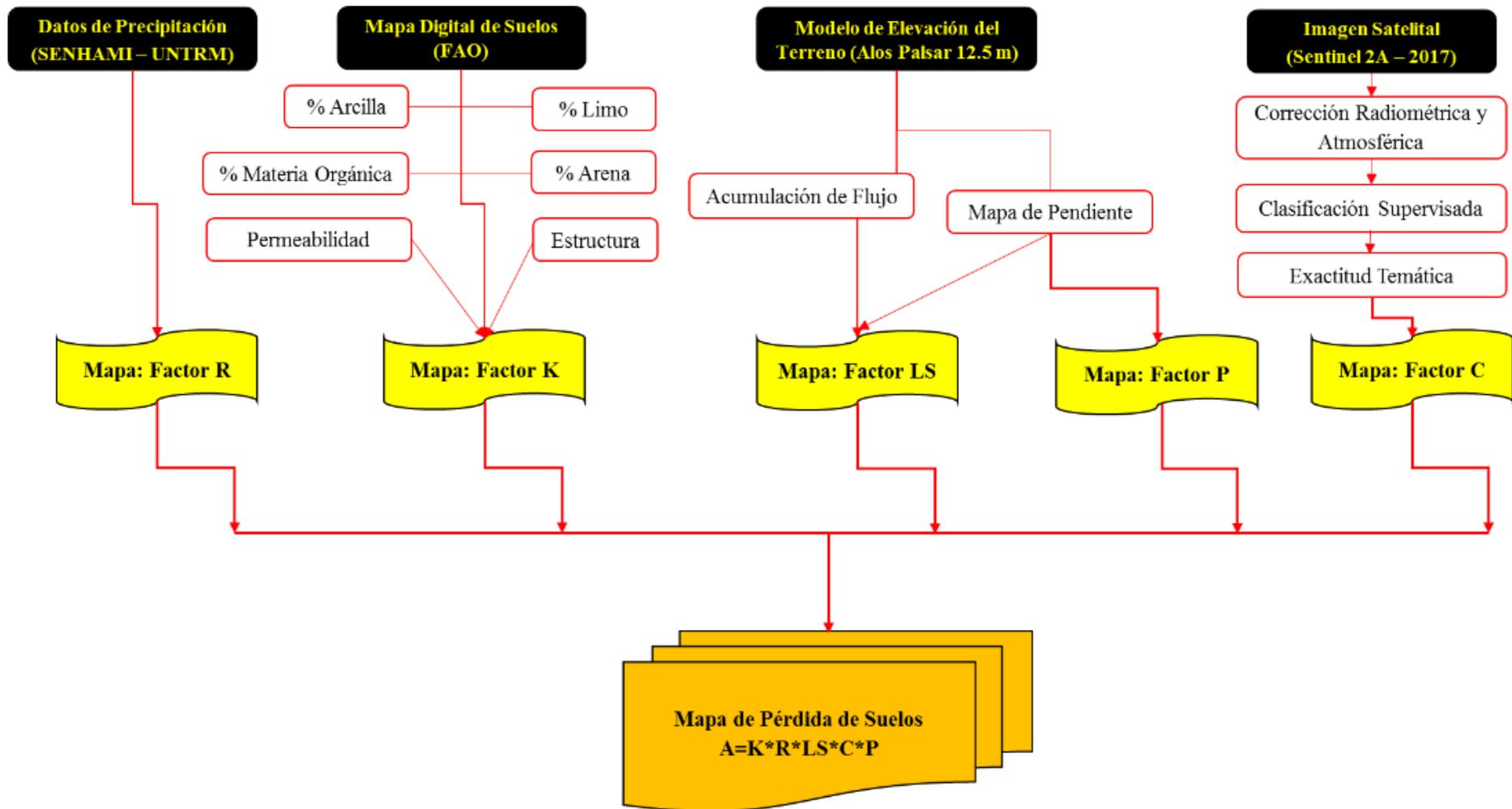


Figura 3. Marco conceptual de la pérdida de suelo para el modelo RUSLE.

Estas variables de modelo se implementaron en una base de datos SIG (Geodatabase). El geoprocesamiento para la estimación de la erosión del suelo se realizó utilizando el software ArcGIS 10,5, en función a los datos disponibles recopilados de la UNTRM, SENAMHI, Alaska Satellite Facility y la FAO.

El flujo de trabajo de la aplicación SIG se muestra en la Figura 3. Todas las capas espaciales utilizadas se proyectaron en el sistema de coordenadas WGS 1984 UTM Zona 17 Sur, con una escala de impresión 1:125 000.

• **Factor de erosividad de lluvia (R)**

El factor R cuantifica el resultado del impacto de la lluvia y también reproduce la cantidad y la tasa del factor de escorrentía que pueden asociarse con los eventos de precipitación (Gelagay & Minale, 2016).

La erosividad puede predecirse mediante una ecuación de regresión adecuada en un caso de registros de precipitaciones insuficientes. Por lo tanto, dado que la energía cinética de la lluvia y los datos de intensidad no estaban disponibles en KW, el factor de erosividad R se calculó de acuerdo con la ecuación de Hurni et al., (2016), derivada de un análisis de regresión espacial (Gelagay & Minale, 2016) que se basa en los datos de precipitación anual media (P) disponibles. Los datos utilizados de precipitación fueron de los años 2014 a 2017, recopilados del SENAMHI y de la UNTRM. Se obtuvo la precipitación media anual por cada estación meteorológica como se muestra en Tabla 1.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas para calcular el factor R.

Nº	Nombre de la Estación	Ubicación		Elevación (msnm)	Precipitación (mm)
		Este (m)	Norte (m)		
1	Chachapoyas	846750	9312753	2445	881,85
2	UNTRM	805927	9347788	2350	1119,70
3	Jazan	834884	9341977	1350	1047,73
4	Jamalca	805927	9347788	1776	1058,65
5	Lonya Grande	779975	9336106	1523	1787,45
6	Luya Viejo	828840	9320640	2960	498,70

Fuente: SENHAMI y UNTRM.

Con los datos de precipitación media anual, se calculó el factor R (Ecuación 2). Luego se interpoló mediante el método Inverse Distance Weighting (IDW) con el uso de ArcGIS 10,5 y sus herramientas de geoprocésamiento, el tamaño de pixel fue de 12,5 m.

$$R = -8,12 + (0,562 * P) \dots\dots\dots \text{Ecuación 2}$$

Donde:

R = Erosividad ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$)

P = Precipitación promedio anual (mm)

• **Factor de erosionabilidad del suelo (K)**

El factor K representa el efecto de las propiedades físicas y las características del perfil del suelo sobre la pérdida de este (Pham et al., 2018). Este factor desempeña un papel importante en las estrategias de conservación del suelo (Shabani et al., 2014) y refleja la tasa de pérdida de suelo por índice de erosividad de la precipitación.

El factor K de un suelo, está en función de su textura; % de sedimento más arena muy fina, % de arena, % de materia orgánica, estructura del suelo y permeabilidad (Wischmeier & Smith, 1978). Según Ganasri & Ramesh (2015), el factor de erosionabilidad del suelo (K) que se muestra en Ecuación 3, se obtienen mejor a partir de mediciones directas en parcelas de escorrentía natural.

$$K = 27,66 * m^{1,14} * 10^{-8} * (12 - a) + (0,0043 * (b - 2)) + (0,003 * (c - 3)) \dots\dots\dots \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

K = Erosionabilidad del suelo ($\text{tn} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$).

m = Limo (en%) + Arena muy fina (en%) \times (100 - Arcilla (en%))

a = Materia orgánica (%).

b = Código de estructura: (1) es muy estructurado o particulado, (2) está bastante estructurado, (3) está ligeramente estructurado y (4) es sólido.

c = Código de permeabilidad de perfil: (1) es rápido, (2) es moderado a rápido, (3) es moderado, (4) es moderado a lento, (5) es lento y (6) muy lento.

Los tipos de suelo e información adicional (Tabla 2) se extrajeron del mapa digital del suelo del mundo de la FAO, la información fue descargada en formato vectorial se realizó una proyección geográfica al sistema de coordenadas WGS 1984, UTM zona 17 Sur. Luego se procedió a calcular el factor de erosionabilidad (Ecuación 3). Finalmente se convirtió de formato vector a formato ráster con una resolución de 12,5 m y se reclasificó según los valores del factor K para cada tipo de suelo, utilizando herramientas de reclasificación en ArcGIS 10,5.

Tabla 2. Nombre de suelo y porcentajes de arena, limo, arcilla y materia orgánica para la microcuenca del río Jucusbamba

Simb.	Nombre del Suelo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Materia Orgánica (%)
BE	Eutric Cambisols	36,4	37,2	26,4	1,07
I	Lithosols	58,9	16,2	24,9	0,97
HL	Luvic Phaeozems	39,1	26,5	34,6	1,46

Fuente: FAO, 2001.

• **Factor topográfico (LS)**

El factor topográfico representa una relación de pérdida de suelo por debajo de las condiciones especificada y la altura del talud “estándar” del 9% y la pendiente de 22,6 m (Renard et al., 1996; Ganasri & Ramesh, 2015). Las alturas y las pendientes más bajas tienen la mayor potencialidad para la erosión del suelo y el factor LS genera una alta velocidad de flujo superficial en una escorrentía igualmente más alta (Kayat et al., 2018).

Por lo tanto, el cálculo de *LS* requiere factores tales como la acumulación de flujo y la inclinación de la pendiente, los cuales se calcularon por medio de ArcGIS 10,5 y su extensión Spatial Analyst, utilizando el MDET, siguiendo la Ecuación 4 (Zhang et al., 2013).

$$LS = \left[\frac{Q_a M}{22,13} \right]^y * (0,065 + 0,045 * S_g + 0,0065 * S_g^2) \dots\dots\dots Ecuación 4$$

Donde, LS = Pendiente o inclinación de pendiente, Q_a = Acumulación de flujo, S_g = Pendiente en porcentaje, M = Tamaño de píxel e y = Coeficiente adimensional que asume el valor de 0,2 - 0,5. El valor varía de 0,2 a 0,5 dependiendo de la pendiente y el valor del gradiente de pendiente, 0,5 para

pendientes que exceden 4,5%, 0,4 para pendientes de 3 - 4,5%, 0,3 para 1-3% y 0,2 para pendientes inferiores a 1% (Wischmeier & Smith, 1978). El MDET utilizado fue del satélite Alos Palsar con resolución de 12,5 m.

- **Factor de cobertura y gestión (C)**

El factor C, es uno de los factores más importantes que controla el riesgo de erosión del suelo y refleja el efecto de las prácticas de cultivo y manejo sobre la erosión del suelo (Patil & Sharma, 2013). En general, el factor C oscila entre 0 y 1. Un valor C igual a 1 indica que no hay cobertura y la superficie se trata como tierra estéril, mientras que un valor C cerca de 0 indica efectos de cobertura muy fuertes y suelo bien protegido (Pham et al., 2018).

Para obtener el factor C, en campo se procedió a georreferenciar con un receptor GPS los tipos de cobertura y uso de la tierra (zonas de entrenamiento o ROIs) en la microcuenca y se tomó puntos de control terrestre (GCP) para la evaluar la exactitud temática del mapa final (MINAM, 2014; Correa et al., 2016). En gabinete se realizó la descarga de la imagen satelital desde la página de Land Viewer Eos (EOS, 2018) con resolución espacial de 10 m del mes de noviembre de 2017.

El procesamiento digital de la imagen consistió en realizar la calibración radiométrica y atmosférica de todas las bandas espectrales por separado (Chuvieco, 2010; Barboza et al., 2018), aplicando la corrección de Substracción de Objetos Oscuros (DOS1) incorporada en el Plugin de Clasificación Semiautomática (SCP, por sus siglas en inglés) (Congedo, 2018) en el software libre QGIS (versión 3.2.0).

Para la clasificación supervisada se identificaron siete clases de cobertura y uso del suelo según la leyenda propuesta por MINAN (2016) en su anexo 1: a) áreas urbanizadas, b) pastos, c) áreas agrícolas heterogéneas, d) bosques, e) bosques plantados, f) área con vegetación herbácea y arbustiva, y g) áreas sin o con poca vegetación. Además, para mejorar la clasificación digital se realizó un análisis visual de la imagen clasificada, para ello se modificaron algunos polígonos donde se produjo cambios de uso o errores de clasificación debido a la similaridad espectral de las clases (por ejemplo, pastos y área sin vegetación) (Barboza et al., 2018).

El análisis de confiabilidad y exactitud temática se efectuó mediante la creación de matrices de confusión a partir de la tabulación cruzada de la información generada por la clasificación y la verdad-terreno (Laurente, 2011). Se comparó 196 puntos de verificación obtenidos según Chuvieco (2016), que toma en cuenta las áreas relativas de cada una de las clases, establecidas a través de un muestreo aleatorio sistemático no alineado estratificado (MINAM, 2014).

- **Factor de práctica de soporte (P)**

El factor de práctica de conservación (*P*) representa la relación entre la pérdida de suelo por una práctica de apoyo y la del cultivo en hileras rectas hacia arriba y hacia abajo de la pendiente y se utiliza para dar cuenta de los impactos positivos de esas prácticas de apoyo (Ganasari & Ramesh, 2015). El factor *P* explica las prácticas de control que reducen el potencial de erosión de la escorrentía por su influencia en los patrones de drenaje, la concentración de escorrentía, la velocidad de escorrentía y las fuerzas hidráulicas ejercidas por la escorrentía en el suelo (Kayet et al., 2018).

Tabla 3. Valor del factor P según la pendiente (%)

Pendiente (%)	Área (ha)	%	Factor P
0 - 5	612,66	3,20	0,1
5 - 10	1600,84	8,37	0,12
10 - 20	4382,37	22,90	0,14
20 - 30	3953,45	20,66	0,19
30 - 50	5197,26	27,16	0,25
50 - 100	2930,92	15,32	0,33
> 100	455,62	2,38	1
Total	19133,13	100,00	

Fuente: Modificado de Gelaga & Minale, 2016.

El valor del factor *P* varía de 0 a 1, el valor que se acerca a 0 indica una buena práctica de conservación y el valor aproximado a 1 indica una mala práctica de conservación (Correa et al., 2016). Para calcular utilizamos la metodología propuesta por Gelaga & Minale (2016) que consistió en clasificar la pendiente en (%) de acuerdo a la Tabla 3.

c) Cuantificación y cartografiado de la pérdida de suelo

Para cuantificar la tasa potencial de pérdida de suelo en el área de estudio, se cartografió su distribución espacial siguiendo las recomendaciones de otros estudios relacionados, todos los mapas de los cinco parámetros (estuvieron el mismo sistema de coordenadas).

La resolución espacial de la información ráster tuvo un tamaño de celda de 12,5×12,5 m. Las capas de cada factor se sobrepusieron y se multiplicaron píxel por píxel, utilizando la calculadora ráster de software SIG.

La pérdida de suelo se clasificó de acuerdo a la Tabla 4, con la finalidad de observar los rangos de pérdida por clase (ligera, moderada, alta y muy alta).

Tabla 4. Clases y rangos de pérdida de suelo.

Clases de Pérdida de Suelo	Rangos (tn.ha⁻¹.año⁻¹)
Severo	> 40
Muy alta	20 - 40
Alta	10 - 20
Moderada	5 - 10
Leve	0 - 5

Fuente: Kayet et al. (2018).

2.4 Análisis de datos

Para el análisis estadístico se utilizó la herramienta de *Zonal Statistics as Table* de ArcGIS para conocer la media y la desviación estándar de la pérdida de suelo por cada clase.

III. RESULTADOS

En este estudio, el modelo (RUSLE) se integró con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de teledetección para realizar el cálculo pixel por pixel y de esta manera obtener la pérdida de suelo (tn/ha.año) e identificar y cartografiar las áreas de vulnerables a la erosión del suelo.

La resolución espacial de cada mapa o de cada factor que incorpora el modelo fue de 12,5 metros, la información se obtuvo de diferentes fuentes. Los resultados se presentan por cada factor, luego se muestra la estimación de pérdida de suelo para toda la microcuenca y se finaliza con un análisis de los datos a partir de pruebas de estadística básica.

3.1 Estimación de los parámetros del modelo RUSLE

- **Factor de erosión de lluvia (R)**

La Tabla 5 describe la precipitación media anual en la microcuenca del río Jucusbamba varía de 498,70 mm (estación Luya Viejo) a 1787,45 mm (estación Lonya Grande). Por otra lado, los valores del factor de erosividad de lluvia (Tabla 5 y Figura 4), los cuales fueron calculados a partir del método de IDW, reporta que el valor más bajo del factor R es de 272,15 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.año⁻¹ (estación Luya Viejo), seguido de la estación Chachapoyas y Jazán (487,48 y 580,70 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.año⁻¹).

Las estaciones de Jamalca y UNTRM presentan valores de 586,84 y 621,15 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.año⁻¹ respectivamente. Sin embargo, la estación de Lonya Grande muestra el nivel más alto de erosión de lluvia con 996,43 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.año⁻¹.

Tabla 5. Precipitación anual media y el valor de factor R correspondiente.

Nº	Nombre de la Estación Meteorológica	Precipitación (mm)	Factor R (MJ.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹ .año ⁻¹)
1	Chachapoyas	881,85	487,48
2	UNTRM	1119,70	621,15
3	Jazan	1047,73	580,70
4	Jamalca	1058,65	586,84
5	Lonya Grande	1787,45	996,43
6	Luya Viejo	498,70	272,15

Fuente: SENAMHI y UNTRM.

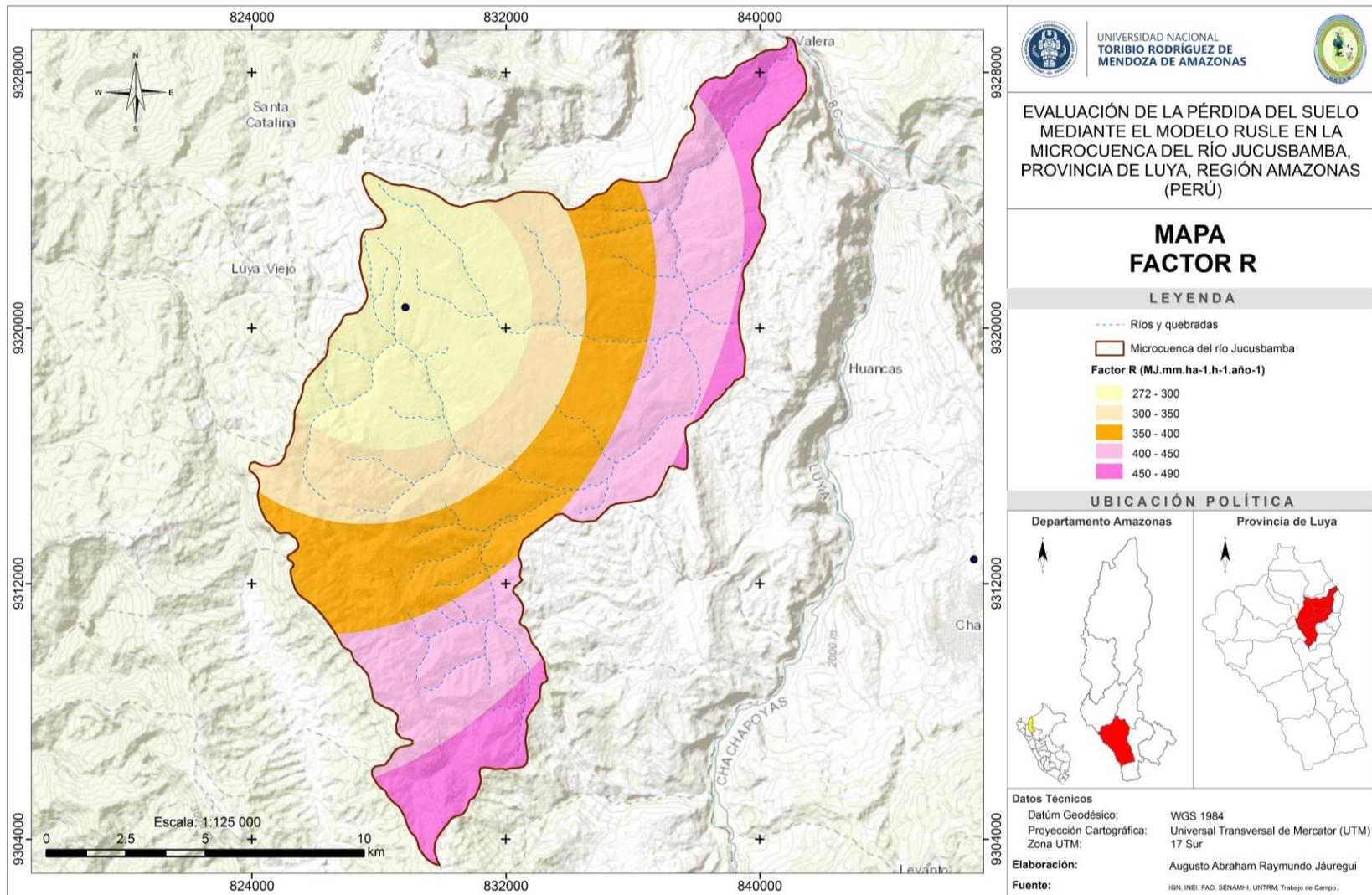


Figura 4. Mapa del factor R.

- **Factor de erosionabilidad del suelo (K)**

El tipo de suelo en el área de estudio según la FAO (2001) está comprendido por tres tipos: Luvic Phaeozems, Lithosols y Eutric Cambisols. Los Phaeozems se caracterizan por ser suelos porosos y fértiles, y son excelentes tierras de cultivo. Son suelos porosos y bien aireados con estructuras de migajas a cuadras de moderadas a fuertes, muy estables. Se ubican hasta una profundidad de 100 cm desde la superficie del suelo. Los cultivos que se producen por lo general son cereales y legumbres de regadío o también se pueden utilizar para la cría y engorde de ganado en pastos mejorados. La sequía periódica y la erosión eólica e hídrica son las principales limitaciones (FAO, 2001).

Por otra, los suelos Lithosols (*lithos*: piedra) se caracterizan por su profundidad menor de 10 centímetros, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. Su fertilidad natural y la susceptibilidad a la erosión son muy variables dependiendo de otros factores ambientales (INEGI, 2004).

Los suelos Eutric Cambisols, son suelos con diferenciación de horizonte inicial; se encuentran en una etapa de transición de desarrollo, desde un suelo joven hasta un suelo maduro con un horizonte B. Estos suelos se encuentran entre los suelos más productivos de la tierra (FAO, 2001).

En la Tabla 6 se observa los valores de arena (%), limo (%), arcilla (%) y materia orgánica (%). Además, de los valores de la estructura del suelo, permeabilidad y los valores del factor R. Los valores varían de 0,042, 0,047 y 0,055 tn.ha.h.ha¹.MJ⁻¹.mm⁻¹ respectivamente por cada tipo de suelo (Tabla 6 y Figura 5).

Tabla 6. Valores de los parámetros para calcular el factor K.

Simb,	Nombre del Suelo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Carbono Orgánico (%)	m	a	b	c	Factor K
BE	Eutric Cambisols	36,4	37,2	26,4	1,07	5416,96	1,07	2,0	3,0	0,055
I	Lithosols	58,9	16,2	24,9	0,97	5640,01	0,97	1,0	1,0	0,047
HL	Luvic Phaeozems	39,1	26,5	34,6	1,46	4290,24	1,46	3,0	2,0	0,042

Fuente: Elaboración propia en base al mapa de suelos de la FAO, 2001.

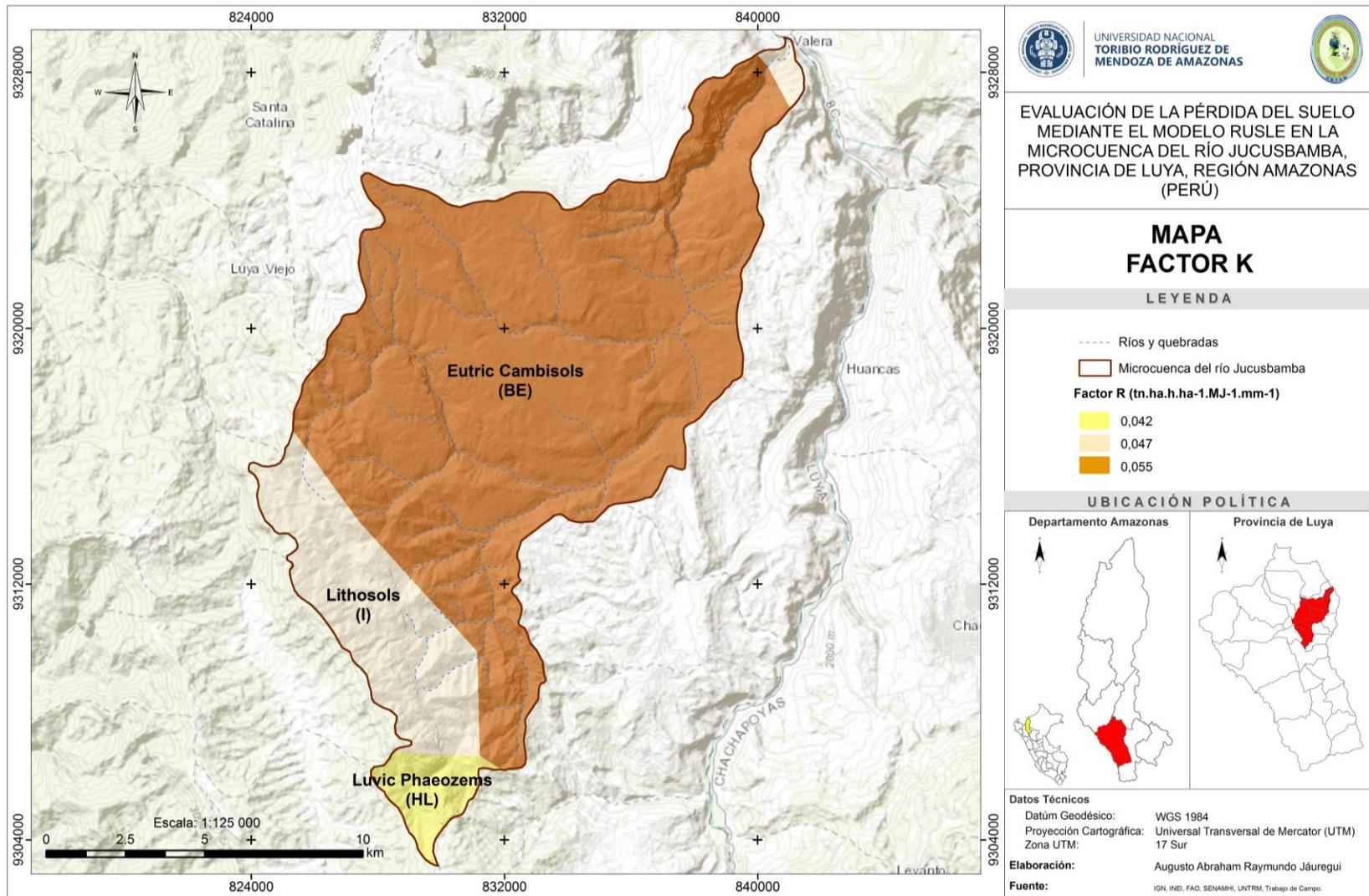


Figura 5. Mapa del factor K.

- **Factor de pendiente (LS)**

El área de estudio es una de las zonas con mayores altitudes elevadas en la provincia de Luya. Los datos de modelo digital (terreno), muestra que el terreno es muy complicado, con áreas de pendiente entre 20 a 50 %.

El resultado de la aplicación de la Ecuación 4, muestra que los valores del factor LS para la microcuenca del río Jucusbamba varía de 0 a más de 547 (Figura 6), predominado los intervalos de 0 - 4 y de 4 - 50, lo que significa que la pendiente es muy pronunciada y las longitudes de las pendientes son cortas. Este factor conduce a un índice de flujo de lluvia muy poderoso y hace que la erosión del suelo sea más grave.

- **Factor de cobertura y gestión (C)**

La clasificación supervisada (Tabla 7 y Anexo 1) permitió identificar siete tipos de cobertura (Anexo 2). Las áreas urbanizadas ocupan el 1,77 % del área total de la microcuenca, los pastos y áreas agrícolas heterogéneas (representados por leguminosas y tubérculos) 30,04% y 29,80% respectivamente.

Las áreas con vegetación herbácea y arbustiva ocupan el 18,69 %. Los bosques naturales representan el 11,84 % y los bosques plantados (pino y eucalipto) representan el 6,89% y finalmente las áreas sin o con poca vegetación con forman el 0,97% del área total de la microcuenca.

Tabla 7. Clases de cobertura y uso actual del suelo (%) para la microcuenca del río Jucusbamba

Cobertura y Uso Actual de la Tierra	Área (ha)	%	Factor C	Autor
a. Áreas urbanizadas	338,15	1,77	0,50	Singh & Kumar, (2017)
b. Pastos	5746,97	30,04	0,03	Röder et al., (2006)
c. Áreas agrícolas heterogéneas	5702,60	29,80	0,25	Gaspari et al., (2009)
d. Áreas con vegetación herbácea y arbustiva	3575,31	18,69	0,01	Pacheco et al., (2014)
e. Bosques	2265,66	11,84	0,01	Singh & Kumar, (2017)
f. Bosques plantados	1318,37	6,89	0,13	Singh & Kumar, (2017)
g. Áreas sin o con poca vegetación	186,06	0,97	1,00	Röder et al., (2006)
Total	19 133,13	100		

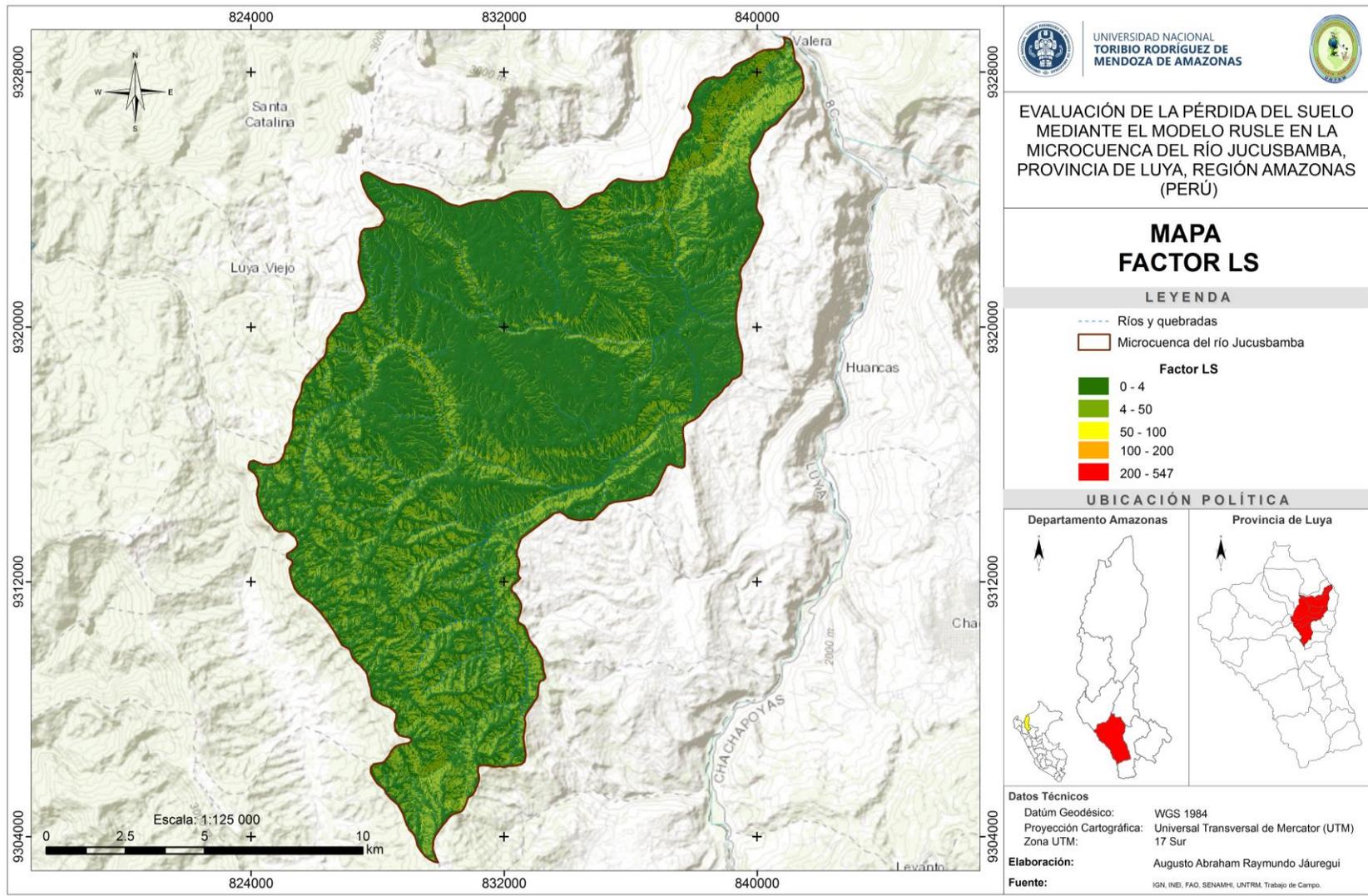


Figura 6. Mapa del factor LS.

La matriz de confusión elaborada a partir de la tabulación cruzada de las siete clases (a, b, c, d, e, f y g) identificadas, permitió validar la información generada en la clasificación supervisada, se obtuvieron 196 puntos de muestreo, de los cuales 128 puntos fueron coincidentes en campo (Tabla 8) y 68 no coincidieron. Se obtuvo un índice de Kappa de 0,59.

Tabla 8. Matriz de confusión y exactitud temática

Resultados de la clasificación	Cobertura y Uso Actual del Suelo							Total	Exactitud de Usuario	Error Comisión
	Refer ... a	Refer ... b	Refer ... c	Refer ... d	Refer ... e	Refer ... f	Refer ... g			
Clase a	12	3		1		2	4	22	0,55	0,45
Clase b		29	5	1				35	0,83	0,17
Clase c		9	16			1		26	0,62	0,38
Clase d		2		11	1	2		16	0,69	0,31
Clase e		2			26			28	0,93	0,07
Clase f		3	10		5	30		48	0,63	0,38
Clase g			7		4	6	4	21	0,19	0,81
Total	12	48	38	13	36	41	8	196	<i>Puntos de muestreo</i>	
Exactitud Productor	1,00	0,06	0,42	0,85	0,72	0,73	0,50	128	<i>Puntos coincidentes</i>	
Error de Omisión	0,00	0,94	0,58	0,15	0,28	0,27	0,50	Índice de Kappa = 0,59		

En la Figura 7, se muestra el mapa de cobertura y uso actual de la tierra, el cual derivó de la clasificación supervisada de la imagen satelital Sentinel 2A. La magnitud y distribución espacial del factor C varía de 0,001 a 1,00 de acuerdo a la cobertura y uso del suelo, estos valores fueron definidos por autores en sus diferentes estudios publicados.

- **Factor de práctica de soporte (P)**

El mapa de pendiente para la microcuenca del río Jucusbamba, se transformó a modelo vectorial para asignar los valores del factor P según el rango de pendiente, y luego se convirtió a modelo ráster con un tamaño de pixel de 12,5 metros, con la finalidad de mostrar espacialmente la distribución dichos valores, para luego ser multiplicado con los otros factores en la calculadora ráster.

En la Figura 8 se ilustra, los rangos de pendiente en % y el factor P a lo largo y ancho de la microcuenca.

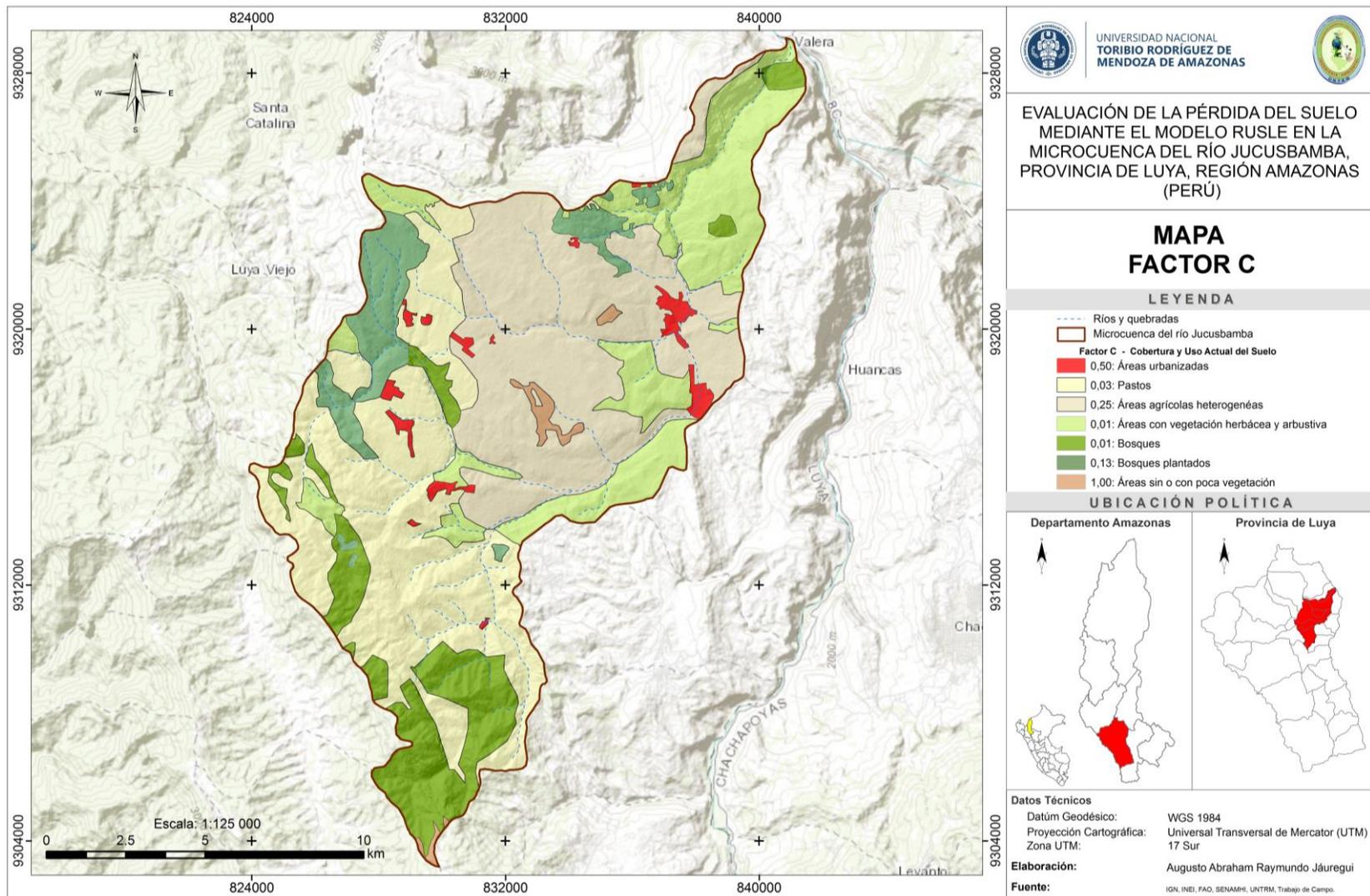


Figura 7. Mapa del factor C.

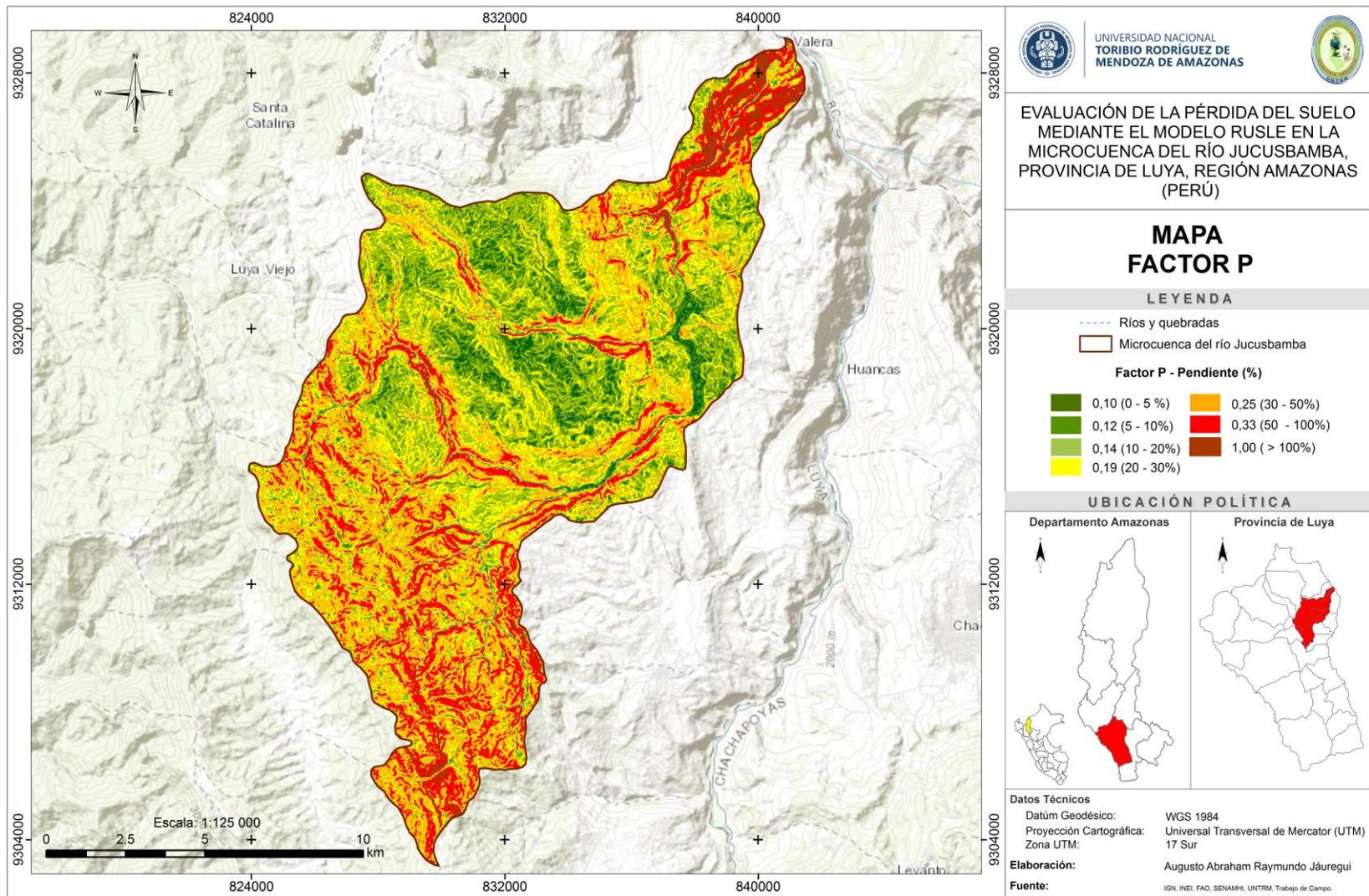


Figura 8 . Mapa del factor P.

3.2 Cuantificación y cartografía de la pérdida de suelo

Las zonas de pérdida de suelo se generaron superponiendo las diferentes capas que presentan los factores evaluados. Los valores de pérdida de suelo obtenidos por la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), han dependido de los cinco factores antes mencionados, y sus valores pueden variar notablemente debido a las condiciones climáticas cambiantes (Kayet et al., 2018). La pérdida de suelo promedio anual se clasificó en clases como se muestra en la Tabla 9.

La pérdida de suelo leve ocupa el 93,34 % (17 859,38 ha) de toda el área de estudio, seguido por la pérdida de suelo moderada que es aproximadamente el 3,94 % (754,60 ha). La pérdida alta se centra en el 1,82 % del área total de la microcuenca con 348,58 ha. A su vez las pérdidas de suelo muy alta y severa solo ocupan el 0,61 y 0,29 % (115,94 y 54,63 ha) de la superficie total de la microcuenca. En la Figura 9, se observa las zonas que presentan mayor pérdida de suelo promedio anual, las cuales se localizan en la parte media y baja de microcuenca, especialmente donde el uso del suelo son áreas agrícolas heterogéneas.

3.3 Análisis de datos

El análisis de los datos permitió conocer la media y la desviación estándar con respecto a las clases de pérdida. El rango de pérdida leve muestra una desviación estándar menor (1,02) y la pérdida de suelo severo presenta un valor más alto con 33,31.

Tabla 9. Análisis de datos para los rangos de pérdida de suelo.

Clases de Pérdida de Suelo	Rangos (tn/ha ⁻¹ .año ⁻¹)	Media	Desviación Estándar	Área(ha)	%
Severo	> 40	67,71	33,31	54,63	0,29
Muy alta	20 - 40	27,21	5,49	115,94	0,61
Alta	10 - 20	13,60	2,72	348,58	1,82
Moderada	5 - 10	6,93	1,38	754,60	3,94
Leve	0 - 5	0,73	1,02	17 859,38	93,34

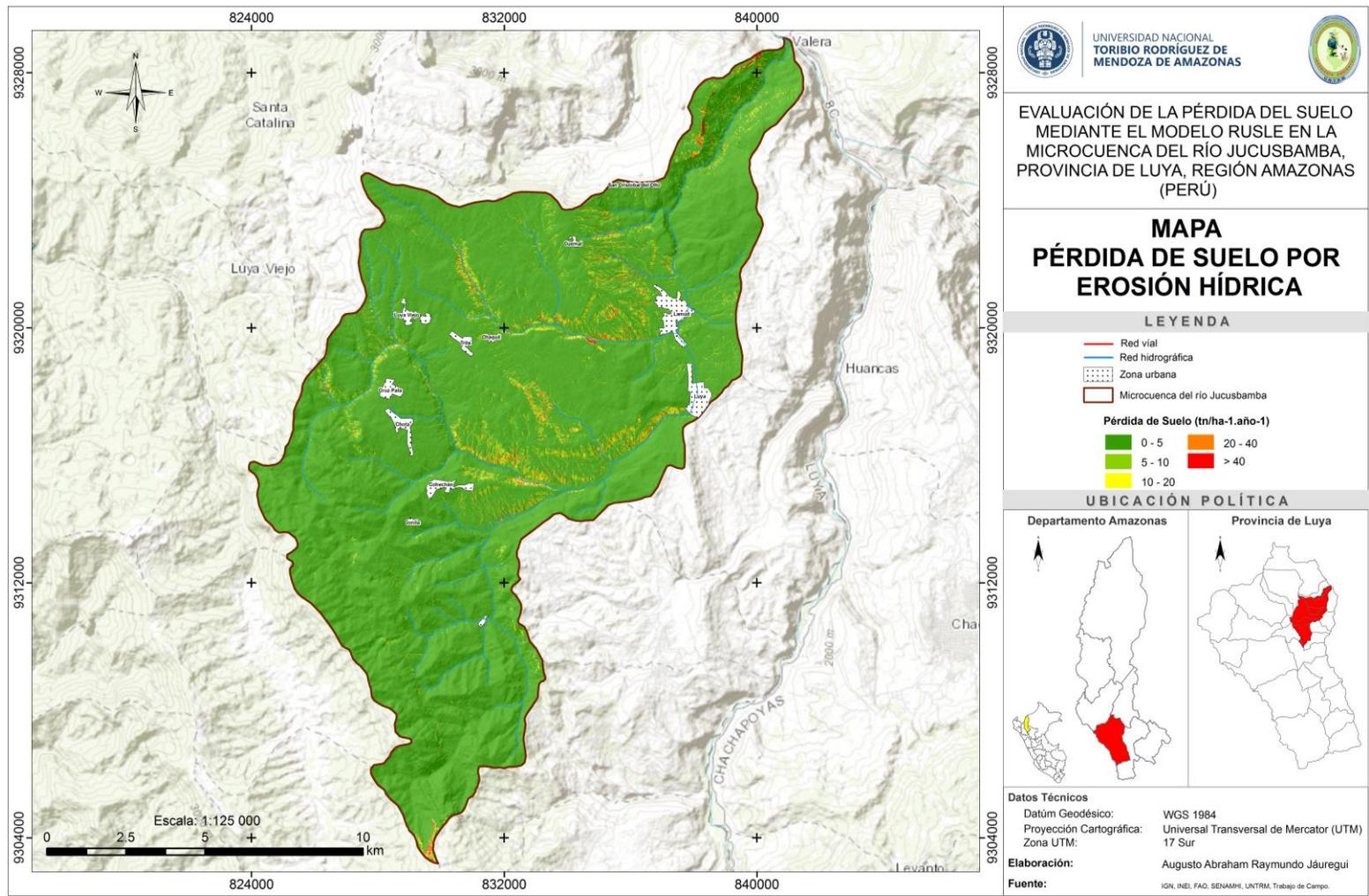


Figura 9. Mapa de pérdida de suelo por erosión hídrica para la microcuenca del río Jucusbamba.

IV. DISCUSIÓN

La ecuación RUSLE es un modelo directo y empírico, que tiene la capacidad de predecir la tasa anual de erosión del suelo. La pérdida de suelo estuvo relacionada espacialmente con la vegetación, la pendiente, el gradiente altitudinal y los mapas de precipitación. Nájera González et al. (2016), considera que la erosión depende principalmente de la topografía, el bosque, la escorrentía y la cubierta terrestre de la región estudiada.

El cálculo del factor R es un método utilizado en muchos lugares del mundo, es un proceso complejo que implica la recopilación de datos a largo plazo (Pham et al., 2018). Sin embargo, en ausencia de datos suficientes, se propusieron los modelos simplificados para estimar la erosividad de la lluvia mediante la correlación Factor R y precipitación mensual y anual propuestos por Hurni et al. (2016) y Gelagay & Minale, 2016). Los valores del factor R en la microcuenca del río Jucusbamba se encuentra en un rango de 272 a 976 MJ/h.ha.año, lo cual repercute en el impacto de lluvia y la escorrentía del suelo.

El factor K es esencial en las prácticas de predicción y conservación de la erosión del suelo, los principales obstáculos para cualquier estimación precisa de la erodabilidad del suelo a gran escala son la falta de datos necesarios sobre las características del suelo y el uso inadecuado de las variables - factores (Wang et al., 2016). La erosionabilidad es un parámetro clave y un requisito esencial para la predicción de la erosión, las prácticas de conservación y evaluación de los impactos ambientales relacionados de la erosión. De modo que, en la microcuenca del río Jucusbamba se obtuvieron los valores de K ($0,042 \text{ tn.ha.h.ha}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$) para los suelos Luvis Phaeozems, $0,057 \text{ tn.ha.h.ha}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ para los suelos Lithosols y $0,055 \text{ tn.ha.h.ha}^{-1} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ para los suelos Eutric Cambisols y según Nájera González et al. (2016), considera como erodabilidad muy alta y susceptibles al poder de desprendimiento de la lluvia (Gelagay & Minale, 2016)

Métodos para estimar LS basados en sistemas de información geográfica se han desarrollado en las últimas dos décadas (Zhang et al., 2017). La longitud de la pendiente (L) es el efecto de la longitud de la pendiente sobre la erosión, define la distancia desde el punto de origen del flujo superficial hasta el punto en que la pendiente disminuye en la medida en que comienza la deposición, o cuando el agua de

escorrentía ingresa a un canal bien definido. Por lo tanto, la pérdida de suelo por unidad de área aumenta a medida que aumenta la longitud de la pendiente (Wischmeier & Smith, 1978; Kayet et al., 2018). La inclinación la pendiente (S) representa el efecto de la inclinación de la pendiente sobre la erosión (Tomas et al., 2018). Los efectos de la pendiente tienen un mayor impacto en la pérdida de suelo que la longitud de la pendiente. A mayor pendiente, mayor es la erosión. La peor erosión ocurre entre 10 y 25% de pendiente (Ganasri & Ramesh, 2015). El factor LS calculado para microcuenca del río Jucusbamba consideró la acumulación de flujo y la pendiente en porcentaje como una entrada. A partir del análisis, se observa que el valor del factor topográfico aumenta en un rango de 0 - 547 (%) a medida que aumenta la acumulación de flujo y la pendiente.

El factor C se encuentra entre los cinco factores que se utilizan para estimar el riesgo de erosión del suelo dentro de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y su versión revisada. Los valores del factor C son los más importantes para el manejo de cultivos (Ganasri & Ramesh, 2015). Panagos et al. (2015a), considera que el único factor de riesgo de erosión del suelo que los formuladores de políticas y agricultores pueden modificar a un costo razonable es el factor de cobertura y manejo (factor C), ya que reduce la erosión del suelo en tierras cultivables, evitando así la pérdida de nutrientes y preservando carbono orgánico del suelo. Nájera González et al. (2016), clasifica la cobertura del suelo para la microcuenca del río Jucusbamba en un rango de bajo (factor c promedio de 0,34). A su vez el mapa de cobertura y uso de suelo que sirvió como insumo principal para el factor C, reportó un índice de Kappa de 0,59, considerado como moderada (MINAM, 2014), y similar a los resultados reportados por Laurente (2011), Mendoza et al. (2015), y Barboza et al. (2018), en sus respectivos estudios.

El factor de práctica de soporte (factor P) raramente se tiene en cuenta en el modelado de riesgo de erosión del suelo a escala subcontinental, ya que es difícil de estimar para áreas grandes (Panagos et al., 2015b). Una de las técnicas para reducir la pérdida del suelo por el agua es practicar la agricultura de contorno y las terrazas. Sin embargo, dichas técnicas requieren de alguna inversión económica.

La erosión del suelo es un problema ambiental grave, económico y social. No solo contribuye a la degradación severa de la tierra y la pérdida económica a un ritmo

alarmante, sino que también amenaza el desarrollo social sostenible (Tang, 2004). Para combatir esta competencia que cada vez es mayor por los recursos limitados del suelo, es aplicar un modelo eficaz de predicción de la erosión del suelo para prevenir y reducir el riesgo a la erosión.

La pérdida de suelo tiene una estrecha relación con el uso de la tierra (Ganasri & Ramesh, 2015). La pérdida de suelo en la microcuenca del río Jucusbamba estuvo relacionada espacialmente con la cobertura vegetal, uso actual del suelo, tipo de suelo, la pendiente, el gradiente altitudinal y la precipitación.

El resultado del análisis de parámetros de RUSLE le da una idea de que la longitud de la pendiente y el factor de gradiente (LS) son los principales parámetros de RUSLE influyentes seguidos por el factor de erosionabilidad del suelo (K). Esto se debe a que los suelos Eutric Cambisols que presentaron los valores de erosionabilidad más altos (0,055) son dominantes en la parte superior media de la cuenca, resultados similares a los reportados por Gelagay & Minale, (2016). Además, los factores P y C en el modelo RUSLE deben mejorarse para minimizar el riesgo de erosión del suelo. Para reducir el factor C, los usuarios de la tierra deberían plantar árboles con hojas anchas (Pham et al., 2018).

La pérdida anual potencial de suelo se estima a partir de la multiplicación de los factores (R, K, LS, C y P) que representa el escenario geofísico del área de estudio, analizado mediante el uso del programa ArcGIS para análisis espacial. Reporta la tasa promedio de erosión del suelo estimada para la microcuenca del río Jucusbamba oscila entre 0 y $> 50 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, con una desviación estándar de $8,79 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. Los resultados son similares a los reportados por (Cabrejos, 2016; Nájera González et al., 2016; Pham et al., 2018) en otras zonas de estudio.

La posible pérdida de suelo en el área de estudio se ha categorizado en cinco clases (leve, moderada, alta, muy alta y severa). En la figura 9, se observa las zonas del área de estudio tienen valores más altos de pérdida de suelo, lo que puede deberse a la pendiente pronunciada (Ganasri & Ramesh, 2015).

El mapa pérdida de suelo se realizó considerando las cinco clases antes mencionadas. Se observa que la mayor parte del área de estudio se encuentra en la categoría de erosión leve a moderada, que se puede encontrar en casi todas las áreas, la erosión muy

alta ocurre solo en unas pocas áreas donde existe una pendiente pronunciada con suelo estéril. La erosión moderada ocurre en suelos donde existe un área agrícola con pendiente leve. La integración los SIG y la teledetección en el modelo RUSLE, es factible para investigar la erosión del suelo en el departamento de Amazonas y el Perú. Solo se tiene que tener todos los datos de entrada del modelo RUSLE. Para MEDT e imágenes satelitales se pueden obtener de diferentes plataformas.

V. CONCLUSIONES

- El 93,34 % de la pérdida de suelo en la microcuenca del río Jucusbamba es leve, el 3,94% moderada, el 1,82% alta, el 0,61% es muy alta, y solo en el 0,29% la pérdida de suelo es severa.
- Los parámetros del modelo RUSLE (erosividad de lluvia, erosividad de suelo, pendiente, cobertura y práctica de soporte) en la microcuenca del río Jucusbamba, se determinaron a partir de la información cartográfica base y análisis espacial con herramientas de sistemas de información geográfica.
- Las herramientas de sistemas de información geográfica permitieron cartografiar los factores del modelo RUSLE y representar geoespacialmente las zonas de pérdida de suelos a lo largo y ancho de la microcuenca del río Jucusbamba.
- Las zonas con alta, muy alta y severa erosión del suelo se localizan en parte media y baja de la zona de estudio. Es de prioridad especial la implementación de medidas de control. Si bien el modelo analítico actual ayuda a mapear e identificar las zonas de erosión, la calidad de los datos es fundamental, pues ayudan a aumentar la capacidad de predicción y precisión en el análisis SIG y la teledetección.

VI. RECOMENDACIONES

- La aplicación del modelo RUSLE permitió identificar zonas vulnerables a erosión del suelo, la cual se debe prestar especial atención, priorizando estas zonas con desarrollo de actividades como la reforestación y/o forestación.
- Los métodos para cartografiar deben centrarse en los usos del suelo y la cobertura superficial actual para mejorar la precisión en la determinación del valor de C.
- Los resultados obtenidos de la presente investigación pueden ayudar a desarrollar escenarios de gestión y proporcionar alternativas a la Autoridad Local del Agua (ALA) en la formulación de políticas para gestionar el riesgo de erosión en las diferentes cuencas de la región.
- Se recomienda el uso de sistema de información geográfica y teledetección para evaluar la erosión del suelo y estimar la pérdida de erosión en las cuencas hidrográficas del departamento.
- Es necesario implementar prácticas adecuadas de conservación del suelo en las zonas con niveles de erosión muy alta a severa. Las instituciones competentes pueden usar dicha información como información base para proponer medidas de restauración y conservación del suelo y disminuir la pérdida de suelo en el área de estudio.
- Se recomienda continuar con estudios similares de evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica a escala de microcuencas, subcuencas y cuencas del departamento de Amazonas, con la finalidad de focalizar proyectos de gestión, manejo y conservación de cuencas hidrográficas en la región.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alaska Satellite Facility. (2018). Alos palsar global radar imagery, 2006-2011. Recuperado de <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/>
- Barboza, E., Salas, R., Mendoza, M., Oliva, M., & Corroto, F. (2018). Uso actual del suelo y calidad hidrogeomorfológica del río San Antonio: alternativas para la restauración fluvial en el Norte de Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(2): 203-214.
- Cabrejos, M. N. (2016). *Modelamiento geoespacial en la determinación del riesgo, vulnerabilidad y de la cuantificación de la erosión hídrica en la microcuenca del río Atuén-Amazonas*. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú.
- Ccama, U. (2012). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Ilave utilizando técnicas de teledetección y SIG*. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el Espacio*. Ariel, Barcelona, España.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press/Taylor & Francis.
- Congedo, L. (2018). *Semi-automatic classification plugin documentation*. Versión 6.1.0.1.
- Córdova, Y. E. (2015). *Estimación de la tasa de erosión hídrica en la microcuenca de la quebrada chaye grande de la subcuenca del río Yapatara*. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Piura. Piura, Perú.
- Correa, S. W., Mello, C. R., Chou, S. C., Curi, N., & Norton, L. D. (2016). Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. *Catena*, 147:110-124.
- Cotler, H., Sotelo, E., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S. & Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta ecológica*, (83).

- Devatha, C. P., Deshpande, V. & Renukprasad, M. S. (2015). Estimation of soil loss using USLE model for Kulhan Watershed, Chattisgarh-a case study. *Aquatic Procedia*, 4: 1429-1436.
- Escobedo, R. (2010). *Fisiografía informe temático*. proyecto zonificación ecológica y económica del departamento de Amazonas, convenio entre el IIAP y el Gobierno Regional de Amazonas. Iquitos – Perú.
- EOS. (2018). EOS Data Analytics: Sentinel-2 Archive. Recuperado de <https://eos.com/landviewer/?lat=>
- Ganasri, B. P. & Ramesh, H. (2015). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7(6): 953-961.
- Gaspari, F. J., Delgado, M. I., & Denegri, G. A. (2009). Estimación espacial, temporal y económica de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. *Terra Latinoamericana*, 27(1), 43-51.
- Gelagay, H. S. & Minale, A. S. (2016). Soil loss estimation using GIS and Remote sensing techniques: A case of Koga watershed, Northwestern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 4: 126-136.
- Gobierno Regional Amazonas (GRA) & Instituto de Investigación de la Amazonía Peruana (IIAP). (2010). *Zonificación Ecológica Económica departamento de Amazonas*. Iquitos, Perú.
- Holdridge, L. R. (1987). *Ecología basada en zonas de vida*. Costa Rica: Agroamérica.
- Hurni, H., Berhe, W.A., Chadhokar, P., Daniel, D., Gete, Z., Grunder, M. & Kassaye, G. (2016). *Soil and Water Conservation in Ethiopia: Guidelines for Development Agents*. Second revised edition. Bern, Switzerland: Centre for Development and Environment (CDE), University of Bern, with Bern Open Publishing (BOP). 134 pág.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2015). PERÚ: *Estimaciones y proyecciones de población por sexo, según departamento, provincia y distrito, 2000-2015*. Lima, Perú.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2004). *Guías para la Interpretación de Cartografía Edafología*. México.
- Kayet, N., Pathak, K., Chakrabarty, A. y Sahoo, S. (2018). Evaluation of soil loss estimation using the RUSLE model and SCS-CN method in hillslope mining áreas. *International Soil and Water Conservation Research*, 6: 31-42.
- Laurente, M. Á. (2011). Medición de la deforestación mediante percepción remota en la microcuenca río Supte, Tingo María-Perú, *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (11), 1-15.
- Lee, G.S. & Lee, K. H. (2006). Scaling effect for estimating soil loss in the RUSLE model using remotely sensed geospatial data in Korea. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 3: 135-157.
- Mendoza, M. E., Salas, R. & Barboza, E. (2015). Análisis multitemporal de la deforestación usando la clasificación basada en objetos, distrito de Leymebamba (Perú). *Revista de Investigación para el Desarrollo Sustentable*, 3(2): 67-76.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2014). Protocolo: evaluación de la exactitud temática del mapa de deforestación. Lima, Perú: Dirección General de Ordenamiento Territorial.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2016). R.M.N°-081-2016-MINAM Procedimiento Técnico y Metodológico para la Elaboración del "Estudio Especializado de Análisis de los Cambios de la Cobertura y Uso de la Tierra. Lima, Perú.
- Nájera González, O., Bojórquez Serrano, J. I., Flores Vilchez, F., Murray Núñez, R. M. & González García-Sancho, A. (2016). Riesgo de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México. *Cultivos Tropicales*, 37(2), 45-55.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2001). *Lecture notes on the major soils of the world*, Roma.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2007). Digital soil map of the world. Recuperado de <https://goo.gl/8ZuahC>

- Pacheco, H., Marcano, A. & Cartaya, S. (2014). Cálculo del factor C de la USLE, en la cuenca del río Carache, TrujilloVenezuela usando imágenes del Satélite Miranda VRSS-1. *XVI Simposio Internacional SERPEL 2014*. Sociedad Latinoamericana en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial Capítulo Colombia.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E. & Montanarella, L. (2015a). Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land use policy*: 48, 38-50.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., van der Zanden, E. H., Poesen, J. & Alewell, C. (2015b). Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environmental science & policy*: 51, 23-34.
- Patil, R. J. & Sharma, S. K. (2013). *Remote Sensing and GIS based modeling of crop/cover management factor (C) of USLE in Shakker river watershed. In Proceedings of International Conference on Chemical, Agricultural and Medical Sciences (CAMS-2013)*. Kuala Lumpur, Malaysia (pp. 29-30).
- Perú 21. (26 de diciembre 2012). Amazonas: más de 300 damnificados por desborde de río Jucusbamba. Recuperado de <https://peru21.pe/lima/amazonas-300-damnificados-desborde-rio-jucusbamba-9185>
- Pham, T. G., Degener, J. & Kappas, M. (2018). Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(2), 99-110.
- Portuguez, D. (2015). Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la cuenca del río Siguas utilizando geoinformatica. *Anales Científicos*: 76 (2): 324-329.
- Prasannakumar, V., Vijith, H., Abinod, S. & Geetha, N. (2012). Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geoscience Frontiers*: 3(2), 209-215.

- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G.A., McCool, D. K. & Yoder, D. C. (1996). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*. Hand book. no. 703. Washington DC: USDA, Agricultural.
- Röder, J., García, R. V., & Villaseñor, P. Z. (2006). Aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo “USLE” en sig para estimar riesgo potencial de erosión en el área protegida “Sierra de Quila”. *XVII Semana de la Investigación Científica. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias*. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México, 156-162.
- RPP Noticias. (29 de diciembre de 2012). Calles de Luya intransitables tras desborde de río en Amazonas. Recuperado de <https://rpp.pe/peru/actualidad/video-calles-de-luya-intransitables-tras-desborde-de-rio-en-amazonas-noticia-435999>
- Shabani, F., Kumar, L. y Esmaili, A. (2014). Improvement to the prediction of the USLE K factor. *Journal of Geomorphology*: 201 (1): 229-234.
- Singh, G., & Kumar, R. (2017). Grid-cell based assessment of soil erosion potential for identification of critical erosion prone areas using USLE, GIS and remote sensing: A case study in the Kapgari watershed, India. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(3), 202-211.
- Solano, R. (2016). *Estimación de la Pérdida de Suelos por Erosión Hídrica en la Subcuenca del río Shullcas 2000 – 2013, Huancayo*. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo – Perú.
- Tang, K. L. (2004). *Soil and water conservation in China* Science Press, Beijing, China.
- Terranova, O., Antronico, L., Coscarelli, R. & Iaquina, P. (2009). Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: an application model for Calabria (southern Italy). *Geomorphology*: 112(3-4), 228-245.
- Vargas, J. 2010. *Clima, informe temático*. Proyecto Zonificación Ecológica y Económica del departamento de Amazonas, convenio entre el IIAP y el Gobierno Regional de Amazonas. Iquitos, Perú.

- Wang, B., Zheng, F. & Guan, Y. (2016). Improved USLE-K factor prediction: A case study on water erosion areas in China. *International Soil and Water Conservation Research: 4*(3), 168-176.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D. D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Conservation Planning*. Agriculture Handbook pág. 282.
- Zhang, H., Wei, J., Yang, Q., Baartman, J. E., Gai, L., Yang, X., ... & Geissen, V. (2017). An improved method for calculating slope length (λ) and the LS parameters of the Revised Universal Soil Loss Equation for large watersheds. *Geoderma: 308*, 36-45.
- Zhang, H., Yang, Q., Li, R., Liu, Q., Moore, D., He, P., ... & Geissen, V. (2013). Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. *Computers & Geosciences: 52*, 177.

ANEXOS

Anexo 1. Proceso de corrección atmosférica de la imagen satelital Sentinel 2 A en el software QGIS 3.2.

Conversión de Sentinel-2

Directorio conteniendo bandas Sentinel-2: C:/Users/EBARBOZA/Desktop/Imágenes Sentinel Luya/S2A_MSIL1C_20171120T152641_N0206_R025_T17MR

Select metadata file (MTD_MSI): C:/Users/EBARBOZA/Desktop/Imágenes Sentinel Luya/S2A_MSIL1C_20171120T152641_N0206_R025_T17MR

Aplicar la corrección atmosférica DOS1 only to blue and green bands Usar valores SinDatos 0

Crear Juego de Bandas y utilizar sus herramientas Add bands in a new Band set

Metadatos

Satélite: Sentinel-2A Product:

	Banda	Valor de Cuantificación	Irradiancia solar
1	T17MRP_20171120T152641_B01.jp2	10000	1913.57
2	T17MRP_20171120T152641_B02.jp2	10000	1941.63
3	T17MRP_20171120T152641_B03.jp2	10000	1822.61
4	T17MRP_20171120T152641_B04.jp2	10000	1512.79
5	T17MRP_20171120T152641_B05.jp2	10000	1425.56
6	T17MRP_20171120T152641_B06.jp2	10000	1288.32
7	T17MRP_20171120T152641_B07.jp2	10000	1163.19
8	T17MRP_20171120T152641_B08.jp2	10000	1036.39
9	T17MRP_20171120T152641_B09.jp2	10000	813.04
10	T17MRP_20171120T152641_B10.jp2	10000	367.15
11	T17MRP_20171120T152641_B11.jp2	10000	245.59
12	T17MRP_20171120T152641_B12.jp2	10000	85.25
13	T17MRP_20171120T152641_B8A.jp2	10000	955.19

Ejecutar

RUN

Anexo 2. Cobertura y uso de suelo en la microcuenca del río Jucusbamba.



Figura 10. Toma de zonas de entrenamiento (Áreas urbanizadas).



Figura 11. Toma de zonas de entrenamiento (Áreas urbanizadas).



Figura 12. Toma de zonas de entrenamiento (Áreas sin o con poca vegetación).



Figura 13. Toma de zonas de entrenamiento (Pastos).



Figura 14. Toma de zonas de entrenamiento (Áreas con vegetación herbácea arbustiva).



Figura 14. Toma de zonas de entrenamiento (Bosques plantados).

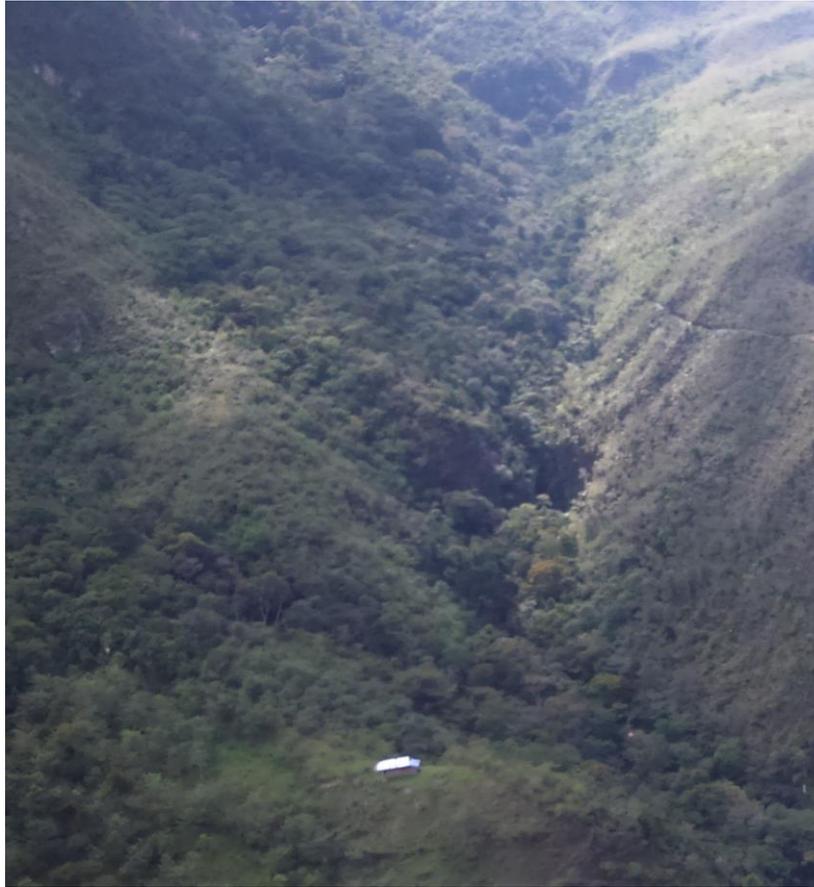


Figura 16. Toma de zonas de entrenamiento (Bosques).



Figura 17. Vista de zonas de entrenamiento (Google Earth Pro).