

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL**



**“MODELAMIENTO CARTOGRÁFICO DE LOS  
NIVELES DE EROSIÓN POTENCIAL DEL  
SUELO EN LA ZONA AGRÍCOLA  
DE LA CUENCA CHANCOS”**

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

**AUTOR:**

**Bach. REYNALDO DAVID FLORES COLETO**

**ASESOR:**

**Ing. ARNULFO SERNA ROMAN**

**Huaraz, Ancash, Perú**

**Enero, 2019**



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL**



**“MODELAMIENTO CARTOGRÁFICO DE LOS  
NIVELES DE EROSIÓN POTENCIAL DEL  
SUELO EN LA ZONA AGRÍCOLA  
DE LA CUENCA CHANCOS”**

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

**AUTOR:**

**Bach. REYNALDO DAVID FLORES COLETO**

**ASESOR:**

**Ing. ARNULFO SERNA ROMAN**

**Huaraz, Ancash, Perú**

**Enero, 2019**





**FORMATO DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TESIS Y TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN, PARA OPTAR GRADOS ACADÉMICOS Y TÍTULOS PROFESIONALES EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL - UNASAM**

Conforme al Reglamento Nacional de Trabajos de Investigación – RENATI  
Resolución de Consejo Directivo de SUNEDU N° 033-2016-SUNEDU/CD

1. Datos del Autor:

Apellidos y Nombres: FLORES COLETO REYNALDO DAVID

Código de alumno: 03.0294.3.AB

Teléfono: 936074286

Correo electrónico: rcoleta10@hotmail.com

DNI o Extranjería: 42481775

2. Datos del Autor:

Trabajo de investigación

Trabajo académico

Trabajo de suficiencia profesional

Tesis

3. Título profesional o grado académico:

Bachiller

Título

Segunda especialidad

Licenciado

Magister

Doctor

4. Título del trabajo de investigación:

**MODELAMIENTO CARTOGRÁFICO DE LOS NIVELES DE EROSIÓN POTENCIAL DEL SUELO EN LA ZONA AGRÍCOLA DE LA CUENCA CHANCOS**

5. Facultad de: CIENCIAS DEL AMBIENTE

6. Escuela, Carrera o Programa: INGENIERÍA AMBIENTAL

7. Asesor:

Apellidos y Nombres: ARNULFO SERNA ROMAN

Teléfono: 943146725

Correo electrónico: asernar@hotmail.com

DNI: 31612011

A través de este medio autorizo a la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, publicar el trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Institucional Digital, Repositorio Nacional Digital de Acceso Libre (ALICIA) y el Registro Nacional de Trabajos de Investigación (RENATI).

Asimismo, por la presente dejo constancia que los documentos entregados a la UNASAM, versión impresa y digital, son las versiones finales del trabajo sustentado y aprobado por el jurado y son de autoría del suscrito respecto de la legislación en materia de propiedad intelectual.

Firma: .....

D.N.I.: 42481775

FECHA: Huaraz, 15 de mayo de 2019



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO**

*"Una Nueva Universidad para el Desarrollo"*

Av. Centenario N° 200 – Teléfono (043) 640020 anexo 1103

HUARAZ - ÁNCASH - PERÚ



*"Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad"*

**ACTA DE SUSTENTACIÓN Y DEFENSA DE TESIS**

Los Miembros del Jurado en pleno que suscriben, reunidos en la fecha, en el Auditorium de la FCAM-UNASAM, de conformidad a la normatividad vigente conducen el Acto Académico de Sustentación y Defensa de Tesis **MODELAMIENTO CARTOGRAFICO DE LOS NIVELES DE EROSIÓN POTENCIAL DEL SUELO EN LA ZONA AGRÍCOLA DE LA CUENCA CHANCOS**, que presenta **REYNALDO DAVID FLORES COLETO** para optar el **Título Profesional de Ingeniero Ambiental**.

En seguida, después de haber atendido la exposición oral y escuchada las respuestas a las preguntas y observaciones formuladas, lo declaramos:

**APROBADO**

Con el calificativo de: ..... *Quince* ..... (15 )

En consecuencia, **REYNALDO DAVID FLORES COLETO** queda expedito para que el Consejo de Facultad de la Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" apruebe el otorgamiento de su **Título Profesional de Ingeniero Ambiental** de conformidad al Art. 113 numeral 113.9 del Reglamento General de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario N° 399-2015-UNASAM), el Art. 48° del Reglamento General de Grados y Títulos de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario - Rector N° 761-2017-UNASAM) y el Art. 160° del Reglamento de Gestión de la Programación, Ejecución y Control de las Actividades Académicas (Resolución de Consejo Universitario - Rector N° 232-2017-UNASAM).

Huaraz, 14 de mayo de 2019

  
-----  
**Dr. Alfredo Walter Reyes Nolasco**  
Jurado (presidente)

  
-----  
**Ing. Ricardo Ray Villanueva Ramirez**  
Jurado (Secretario)

  
-----  
**Ing. Heider Edegardo Mallqui Meza**  
Jurado (Vocal)

-----  
**Ing. Arnulfo Serna Román**  
Asesor

## **DEDICATORIA**

*A Dios por darme la vida y ser la fuerza que me fortalece a diario, sin su apoyo, no sería la persona que soy.*

*A mi madre por todo su sacrificio para poder educarme en la universidad y ser alguien en la vida.*

Flores Coletto Reynaldo David

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco inmensamente a toda mi familia por su apoyo desinteresado en todo momento, quienes siempre están a mi lado, en especial en los momentos más difíciles, siempre dándome aliento para seguir adelante, así poder concretizar mis metas en lo profesional como en lo personal.

## RESUMEN

Uno de los problemas ambientales de mayor importancia a nivel global que aqueja a la humanidad es la erosión de los suelos. Y la zona agrícola de la cuenca Chancos donde se realizó la presente investigación, no es ajeno a dicho problema, debido a los factores geomorfológicos y climáticos característicos de la zona; por ello es necesario conocer la magnitud de dicho problema, para realizar planes uso y manejos eficientes del recurso suelo.

El objetivo principal de esta tesis fue determinar los niveles de erosión potencial del suelo en la zona agrícola de la cuenca Chancos, para ello se empleó la metodología USLE propuesta por Wischmeier y Smith (1978). mediante el análisis multiplicativo de los factores de erosividad (R), erodabilidad (K), y el factor topográfico (LS). La erosividad de la lluvia se determinó mediante el Índice Modificado de Fournier (IMF) y espacializados mediante interpolación Spline, la erodabilidad del suelo o factor K se determinó a partir de los datos la textura, materia orgánica, el tipo de estructura y permeabilidad del suelo, estos dos últimos obtenidos en base a la textura del suelo. La textura y la materia orgánica se obtuvieron mediante los análisis de laboratorio de 22 muestras de suelo distribuidos en toda la zona de estudio, el factor topográfico LS se determinó a partir de un DEM. Todos los procesos de obtención de cada uno de los factores de la USLE, y el análisis respectivo se realizaron con el apoyo de sistemas de información geográficas.

Los resultados de la investigación muestran que el 57.90% de toda la superficie de la zona de estudio presentan un grado de erosión potencial moderada con pérdidas de suelo de 10 a 50 Tn ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y solo el 31.58% presenta una erosión potencial alta con pérdidas de suelo de 50 a 200 Tn ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, la clasificación de los niveles de erosión potencial del suelo se hizo de acuerdo a FAO (1980).

**Palabras claves:** Erosión, erosión potencial, ecuación universal de pérdida de suelos, modelación, sistemas de información geográfica.

## ABSTRACT

One of the most important environmental problems on a global level that afflicts humanity is the erosion of soils. The agricultural area of Chancos basin where the present investigation was carried out, is no stranger to this problem, due to the geomorphological and climatic factors characteristic of the area; therefore, it is necessary to know the magnitude of this problem, in order to carry out efficient use and management plans of the soil resource.

The main objective of this thesis was to determine the levels of potential soil erosion in the agricultural area of Chancos basin, for which the USLE methodology proposed by Wischmeier and Smith (1978) was used, through the multiplicative analysis of the erosivity factors (R), erodability (K), and the topographic factor (LS). The erosivity of the rain was determined by the Modified Fournier Index (IMF) and spatialized by Spline interpolation, the soil erodability or K factor was determined from the data the texture, organic matter, the type of structure and soil permeability, texture and organic matter was obtained by laboratory analysis of 22 soil samples distributed throughout the study area, the LS topographic factor was determined from a DEM. All the processes of obtaining each of the factors of the USLE, and the respective analysis were carried out with the support of geographic information systems.

The results of the research show that 57.90% of the entire area of the study area has a moderate degree of erosion potential with soil losses of 10 to 50 Tn ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> and only 31.58% presents a potential erosion high with soil losses of 50 to 200 Tn ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, the classification of potential erosion levels of the soil was made according to FAO (1980).

**Keywords:** Erosion, potential erosion, universal soil loss equation, modeling, geographic information systems.

## ÍNDICE

CONTENNIDO.....	Pág.
AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN .....	i
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
RESUMEN .....	v
ABSTRACT .....	vi
ÍNDICE .....	vii
LISTA DE TABLAS .....	x
LISTA DE FIGURAS .....	xi
SIGLAS.....	xii
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Planteamiento del problema.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. Hipótesis .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Objetivos.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3.1. Objetivo general .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3.2. Objetivos específicos .....</b>	<b>2</b>
<b>1.4. Fundamentación.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>5</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Antecedentes.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Bases teóricas .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2.1. Erosión del suelo .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2.1.1. Erosión hídrica del suelo.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.1.2. Clases de erosión hídrica.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2.1.3. Procesos de la erosión hídrica .....</b>	<b>9</b>
<b>2.2.1.4. Efectos de la erosión en los niveles de nutrientes del suelo</b>	<b>10</b>
<b>2.2.1.5. Factores que intervienen en la erosión .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.1.6. Formas de evaluar la erosión del suelo.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.1.7. Pérdida tolerable de suelo (T) .....</b>	<b>15</b>

2.2.2. Ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) .....	15
2.2.2.1. Factor de erosividad de la lluvia (R) .....	16
2.2.2.2. Factor de erodabilidad del suelo (K) .....	18
2.2.2.3. Factor topográfico (LS) .....	21
2.2.2.4. Factor de la cobertura vegetal (C) .....	22
2.2.2.5. Factor de prácticas de conservación de suelos (P) .....	24
2.2.3. Modelamiento de la erosión del suelo .....	24
2.2.3.1. Modelamiento espacial o modelamiento cartográfico .....	25
2.3. Definición de términos básicos .....	27
<b>CAPÍTULO III</b> .....	28
<b>METODOLOGÍA</b> .....	28
3.1. Ubicación del área de estudio .....	28
3.2. Descripción del área de estudio .....	29
3.2.1. Clima .....	29
3.2.2. Hidrografía .....	32
3.2.3. Geología .....	33
3.2.4. Suelos .....	34
3.2.5. Vegetación .....	40
3.2.6. Uso de la tierra .....	41
3.3. Métodos y diseño de la investigación .....	42
3.3.1. Tipo de tesis .....	42
3.3.2. Diseño de la investigación .....	43
3.3.3. Diseño y caracterización de la muestra .....	43
3.3.4. Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....	43
3.3.5. Cálculo de los factores de la erosión potencial según el modelo USLE 45	
3.3.6.1. Estimación de la erosividad de la lluvia (Factor R) .....	45
3.3.6.2. Estimación de la erodabilidad del suelo (Factor K) .....	49
3.3.6.3. Estimación del factor topográfico (Factor LS) .....	52
3.3.6.4. Estimación de los niveles de erosión potencial .....	53
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	55
<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> .....	55
4.1. Erosividad de la lluvia (Factor R) .....	55
4.2. Erodabilidad de los suelos (Factor K) .....	56

<b>4.3. Factor topográfico (Factor LS)</b> .....	59
<b>4.4. Erosión potencial del suelo</b> .....	60
<b>4.5. Discusión</b> .....	62
<b>CAPÍTULO V</b> .....	65
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	65
<b>5.1. Conclusiones</b> .....	65
<b>5.2. Recomendaciones y lineamientos para prevenir la erosión del suelo</b> .....	66
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	67
<b>ANEXO</b> .....	72
<b>ANEXO 1</b> .....	73
Análisis físico de suelos .....	73
<b>ANEXO 2</b> .....	75
Mapas temáticos. ....	75

## LISTA DE TABLAS

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
Tabla 01 Clasificación de la erosión hídrica (FAO, 1980)	14
Tabla 02 Clasificación de los valores de erosividad (CORINE, 1992)	18
Tabla 03 Características de la estructura del suelo (Wischmeier y Smith, 1978)	20
Tabla 04 Clases de permeabilidad del suelo (USDA, 1983)	20
Tabla 05 Rangos de erodabilidad (Renard et al., 1997)	20
Tabla 06 Coordenadas UTM del área de estudio	28
Tabla 07 Operacionalización de las variables de la erosión potencial	44
Tabla 08 Descripción de las estaciones pluviométricas seleccionadas	45
Tabla 09 Precipitaciones mensuales de la estación Yungay	45
Tabla 10 Precipitaciones mensuales de la estación LLanganuco	46
Tabla 11 Precipitaciones mensuales de la estación Huaraz	46
Tabla 12 Precipitaciones mensuales de la estación Chancos	46
Tabla 13 Precipitaciones mensuales de la estación Anta	46
Tabla 14 Precipitaciones medias mensuales y anuales	47
Tabla 15 Valores mensuales y anuales de la erosividad (Factor R)	47
Tabla 16 Valores de las estaciones seleccionadas para la correlación lineal	48
Tabla 17 Valores anuales de erosividad (factor R) para su respectiva interpolación	49
Tabla 18 Distribución de calicatas para muestreo de suelos, por tipos, y fases de pendientes	50
Tabla 19 Factor de erodabilidad del suelo por cada tipo y fases del suelo correspondiente al área de estudio	51
Tabla 20 Características físicas de los suelos del área de estudio de acuerdo a Wischmeier y Smith (1978), y USDA (1983)	52
Tabla 21 Clasificación de los valores de erosividad del área de estudio (factor K)	56
Tabla 22 Erodabilidad en los suelos de la zona agrícola de la cuenca Chancos	57
Tabla 23 Erodabilidad (K) de las tres clases texturales del suelo	58
Tabla 24 Superficie del área de estudio asociada a diferentes niveles de erosión potencial	61

## LISTA DE FIGURAS

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
Figura 01    Figura 01: Representación de los procesos de desprendimiento, transporte y deposición de sedimentos en el proceso de erosión hídrica	9
Figura 02    Ubicación geográfica del área de estudio	29
Figura 03    Régimen de la distribución mensual de las precipitaciones en el área de estudio	30
Figura 04    Zonas de vida del área de estudio, en base al mapa ecológico del Perú (ONERN, 1976)	31
Figura 05    Esquema metodológico para obtener el modelo cartográfico de la erosión potencial	44
Figura 06    Diagrama de dispersión de los valores de la erosividad y la altura	48
Figura 07    Distribución mensual de la erosividad (factor R), basados en los datos pluviométricos de la estación Chanco ubicada dentro del área de estudio	56
Figura 08    Diagrama de dispersión que muestra el grado de relación entre la erodabilidad del suelo y la materia orgánica	58
Figura 09    Relación entre los componentes de la textura del suelo, materia orgánica y el Factor K	59
Figura 10    Relación de las pendientes con el factor topográfico LS	60
Figura 11    Fotografía de suelo con erosión potencial moderada	61
Figura 12    Pérdida de suelo debido a la erosión potencial hídrica	62
Figura 13    Pérdida de suelo promedio asociado a los tipos de suelo	62

## LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA

<b>DENOMINACIÓN</b>	<b>UNIDAD DE MEDIDA</b>	<b>ABREVIATURA</b>
Altura	Metro	(h)
Energía	Joule	(J)
Temperatura	Celsius	(°C)
Precipitación	Milímetro	(mm)
Superficie	Hectárea	(ha)
Peso	Tonelada	(Tn)

<b>FACTOR DE CONVERSIÓN</b>	<b>PREFIJO</b>	<b>SÍMBOLO</b>
10 <sup>6</sup>	Mega	M

## SIGLAS

<b>SIGLA</b>	<b>DENOMINACIÓN</b>
A	Área de contribución aguas arriba
C	Factor de cobertura vegetal del suelo. Parámetro del modelo USLE
DEM	Siglas en inglés para modelo digital de elevación
FAO	Siglas en inglés para la organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura FAO (Food and Agriculture Organization)
GPS	Siglas en inglés para sistema de posicionamiento global
IGN	Instituto geográfico nacional – PERU
IMF	Índice modificado de Fournier
INGEMMET	Instituto geológico minero y metalúrgico - PERU
K	Factor de erodabilidad del suelo, parámetro del modelo USLE
L	Factor de longitud de pendiente, parámetro del modelo USLE
LS	Factor topográfico, parámetro del modelo USLE
ONERN	Oficina nacional de recursos naturales
P	Factor de prácticas de conservación del suelo, parámetro de USLE
PNUD	Programa de las naciones unidas para el desarrollo
R	Índice de erosividad de la lluvia, parámetro del modelo USLE
S	Factor de inclinación de pendiente, parámetro del modelo USLE
SIG	Sistema de información geográfica
USDA	United States Department of Agriculture
USLE	Universal Soil Loss Equation

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

La degradación del suelo se define como un proceso que rebaja la capacidad actual y potencial del suelo para producir bienes o servicios (FAO, 1980). En la actualidad, la degradación de los suelos es considerada la causa principal de los problemas biofísicos y socioeconómicos (Vega y Febles, 2006).

De todos los tipos de degradación del suelo, la erosión hídrica es la mayor amenaza para la agricultura sostenible y, constituye la causa principal de la desertificación de los suelos, y esto puede ser acelerado por la intervención humana a través de la deforestación, el sobrepastoreo y prácticas de cultivos no sostenibles (Zapata, 2003).

Por otra parte, Morgan (1997) indica que, la erosión hídrica del suelo es uno de los principales indicadores de la degradación de los ecosistemas, con importantes implicaciones ambientales y socioeconómicas que pueden conducir a la desertificación de las zonas más vulnerables.

La erosión es la principal causa de que el planeta pierda cada año millones de hectáreas de tierra cultivable y de pastos, y es una amenaza para el sustento de más de mil millones de personas (Febles et al., 2009). Según un estudio publicado por la prestigiosa revista Science, en los últimos años casi la tercera parte del suelo agrícola mundial se ha perdido por erosión hídrica, y sigue perdiéndose a una velocidad de más de 10 millones de hectáreas por año (Pimental et al., 1995). Las huellas de la erosión las observa todo el mundo, pero no es tan fácil de reconocer sus consecuencias presentes y futuras. En toda América del Sur, la tasa promedio de pérdida de suelo es de  $115 \text{ Tn ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (FAO, 1994).

Solo mediante la cuantificación precisa de las tasas de pérdida de suelo se pueden identificar las áreas más susceptibles a la erosión hídrica, e implementar medidas de control. Para cuantificar la pérdida de suelos por erosión hídrica, existen diversos modelos, La más aceptada mundialmente es la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (USLE), modificada y desarrollada por Wischmeier y Smith (1978).

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar los niveles de erosión potencial del suelo en la zona agrícola de la cuenca Chancos, para tal propósito se empleó el modelo de predicción de erosión hídrica denominado USLE, el cual está diseñado para predecir la pérdida anual de suelo causada por la lluvia y el escurrimiento sobre una ladera. Este modelo empírico, es un instrumento metodológico que sirve para la toma de decisiones sobre el manejo y las medidas de conservación del suelo más adecuadas.

Para llevar a cabo la modelación de la erosión, la herramienta principal que se utilizó fue el Sistema de Información Geográfica (GIS). Lo que se define como un conjunto de herramientas informáticas diseñadas para obtener, almacenar, recuperar y desplegar datos espaciales del mundo real (Canty, 2014).

### **1.1. Planteamiento del problema**

¿Cuáles son los niveles de erosión potencial del suelo en la zona agrícola de la cuenca Chancos?

### **1.2. Hipótesis**

Los niveles de erosión potencial del suelo en la zona agrícola de la cuenca Chancos son altas.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Determinar los niveles de erosión potencial del suelo en la zona agrícola de la cuenca Chancos.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

a. Generar un mapa de erosividad hídrica a partir de datos pluviométricos.

- b. Elaborar un mapa de erodabilidad del suelo en base a las características de textura, estructura y materia orgánica.
- c. Elaborar un mapa de pendientes que represente el factor fotográfico del suelo.
- d. Elaborar el modelo cartográfico de los niveles de erosión potencial del suelo.
- e. Proponer lineamientos de prevención de riesgo de erosión para mejorar la estabilidad del suelo y promover el uso sostenible del recurso natural suelo.

#### **1.4. Fundamentación**

En la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD), conocida como “Cumbre de la Tierra” o “Cumbre de Río”, celebrada en Río de Janeiro, Brasil (1992), la degradación del suelo fue reconocida como uno de los problemas ambientales globales de mayor incidencia.

En la actualidad, la degradación de los suelos es considerada la causa principal de los problemas biofísicos y socioeconómicos (Vega y Febles, 2006). Entre los diversos tipos de degradación del suelo se destacan la erosión, la salinización y la alcalinización, la degradación química (contaminación, acidificación), la degradación física (compactación) e incluso la degradación biológica, como la mineralización acelerada de la materia orgánica (Loveland y Webb, 2003).

De todos los tipos de degradación del suelo, la erosión hídrica es la mayor amenaza para la agricultura sostenible y, constituye la causa principal de la desertificación de los suelos, y esto puede ser acelerado por la intervención humana a través de la deforestación, el sobrepastoreo y prácticas de cultivos no sostenibles (Zapata, 2003).

Globalmente, los costos económicos de los impactos de la erosión en las tierras agrícolas han sido estimados en unos 400 mil millones de dólares por año, y los más afectados son los países en vías de desarrollo, caracterizados por tierras limitadas y recursos hídricos escasos y un rápido crecimiento poblacional (Bernard y Liavri, 2000).

Por consiguiente, es importante estimar la erosión hídrica del suelo, para tal propósito el mapeo de riesgos de erosión del suelo mediante la aplicación de SIG, constituye cada vez más una necesidad para la planificación de usos sostenibles de la tierra, y en especial para un manejo adecuado de las cuencas, esto por su aplicación práctica y económica para estudios de éste tipo.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes**

Uno de los acontecimientos que marcaron el inicio de la investigación sobre la problemática ambiental de erosión del suelo, tuvo lugar en mayo de 1934, cuando se originó en EE. UU. Nube de polvo que alcanzó los 4500 metros de altitud y oscureció el cielo desde las llanuras de Texas, hacia el norte y hasta la costa atlántica (Lal, 2007). Este evento de gran magnitud inspiró la creación del Servicio de Conservación del Suelo de EE. UU. (US Soil Conservation Service, SCS), actualmente conocido como Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (Natural Resource Conservation Service of USDA, NRCS).

Para dar respuesta al problema de la pérdida de suelo por erosión hídrica, Cook (1936) identificó por primera vez los factores de control de la pérdida de suelo, describiendo los de susceptibilidad del suelo frente a la erosión (erodabilidad), de erosión potencial de la lluvia y de la escorrentía y del efecto protector de la cubierta vegetal. Unos años más tarde, Zingg (1940) publicó la primera ecuación para calcular la pérdida de suelo, considerando el efecto de la inclinación y longitud de la pendiente. Estas investigaciones permitieron a Smith y Whitt (1948) presentar la primera ecuación completa de predicción de la pérdida de suelo anual para zonas de cultivo. Tras este primer modelo de pérdida de suelo se han sucedido diversas mejoras ampliaciones, que han dado lugar a la variedad de modelos que conocemos hoy en día. La más aceptada mundialmente es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), modificada y desarrollada por Wischmeier y Smith (1978).

Estudios realizados por Oldeman (1994) nos muestran que la superficie mundial afectada por procesos de degradación del suelo es de 1966 Mha y la superficie continental afectada por la erosión del suelo por usos de terreno son: África 494 Mha, Asia 747 Mha, América del Sur 244 Mha, América Central 63 Mha, América del Norte 96 Mha, Europa 218 Mha y Oceanía 108 Mha.

En el Perú, también se hicieron estudios sobre la erosión de los suelos, tal es el caso de Ancash donde se realizó el estudio semidetallado de suelos del Callejón de Huaylas (ONERN, 1973), en dicho estudio se identifican que las tierras que presentan síntomas de erosión entre ligera y moderada llegan 18,025 Ha (11.8% del área evaluada), existiendo alrededor de 34,964 Ha. (22.8%) que presentan erosión severa y, finalmente, 97,408 Ha (63.7%) que han sido consideradas extremadamente erosionadas.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Erosión del suelo**

La erosión del suelo se produce por la desagregación y transporte de sus partículas por diversos agentes erosivos, principalmente el agua y el viento, y su acumulación ocurre cuando la energía de estos agentes es insuficiente para continuar con su transporte. Los procesos de erosión, pérdida y acumulación del suelo forman parte de la dinámica natural del medio exógeno terrestre, de tal modo que se habla de pérdida de suelo tolerable cuando ésta no supera la tasa de renovación del suelo, es decir, no alcanza el nivel de degradación intensa o irreversible (Morgan, 1994).

En función del agente erosivo, se definen los siguientes tipos de erosión: hídrica, eólica, por deslizamientos de ladera húmedos y secos, nival, glacial, por agentes biológicos y antropogénica, de éstos el más importante es la erosión hídrica (Wischmeier, 1959).

Las condiciones meteorológicas y el clima, preparan el material parental para la erosión y la lluvia actúa como el mayor agente para la erosión. La cobertura vegetal, el tipo y las características del suelo, la geomorfología, la geología y los usos del suelo, establecen el grado de propensión del suelo a ser afectado por los agentes generadores de erosión (Almorox, 1994).

Las altas tasas de pérdida de suelos en el pacífico centroamericano se debe principalmente a la presencia de suelos volcánicos que son muy susceptible a la erosión, con mayor intensidad de las lluvias, fuertes pendientes, quemadas estacionales, así como suelos desnudos al inicio del período lluvioso y mayor concentración de población (Oldeman, 1994).

#### **2.2.1.1. Erosión hídrica del suelo**

La erosión hídrica, es un fenómeno compuesto de dos procesos consistentes en el desprendimiento de las partículas del suelo y su transporte por el agente erosivo. Como su nombre lo indica, se trata de la erosión causada por el agua, en especial, por la lluvia. Cuando no existe suficiente energía para este transporte, se presenta un tercer proceso que es la sedimentación (Morgan, 1997).

La erosión hídrica, es un proceso de desagregación, transporte y deposición de materiales del suelo por agentes erosivos; además, señala que los agentes erosivos son dinámicos; en el caso de la erosión hídrica, son la lluvia y el escurrimiento superficial o las inundaciones. La lluvia desprende las partículas y la escorrentía las transporta a distancias considerables causando azolve de ríos, presas, lagos e incluso áreas del mar en la desembocadura de los ríos (FAO, 1994).

La erosión hídrica, es un proceso físico que consiste en el desprendimiento, transporte y sedimentación de las partículas del suelo por efectos de la acción del agua.

#### **2.2.1.2. Clases de erosión hídrica**

Henry (1986) apunta que, la erosión causada por el agua puede dividirse en cuatro tipos: Erosión por salpicadura, erosión laminar, erosión en surcos, y erosión en cárcavas.

a. **Erosión por salpicadura**, Es originada por la caída de las gotas de lluvia sobre el suelo; su impacto está en función de la forma y tamaño de las gotas (erosividad), y de la resistencia del suelo a su poder erosivo (erodabilidad) (Henry, 1986).

b. **Erosión laminar**, Consiste en la remoción de delgadas capas de suelo extendidas en forma más o menos uniforme en toda la superficie del suelo; es poco apreciable ya que la cantidad total de suelo removido en un aguacero es generalmente pequeña, y ya cuando se detecta sólo queda una delgada capa de suelo. La erosión laminar es el efecto combinado de la acción del golpeteo que desprende las partículas de suelo y la escorrentía; Su acción selectiva sobre las partículas genera pavimentos de erosión, los cuales se producen por la remoción y arrastre de las partículas más livianas arcilla y materia orgánica quedando sobre la superficie suelos gravillosos o pedregosos. De aquí se desprende su efecto también sobre la fertilidad de los suelos y su productividad; este tipo de erosión arrastra únicamente la capa superior del suelo, y se propicia en suelos localizados en condiciones de fuerte pendiente, sin vegetación adecuada y con bajo contenido de materia orgánica (FAO, 1980).

Morgan (1997), describe la erosión laminar como un proceso de desgaste del suelo generalmente lento, debido a la influencia de algún factor físico o agente erosivo que es el agua. Este proceso mecánico consta de dos fases, el desprendimiento de las partículas del suelo y el arrastre de estas partículas, teniendo efectos directos sobre la fertilidad del suelo.

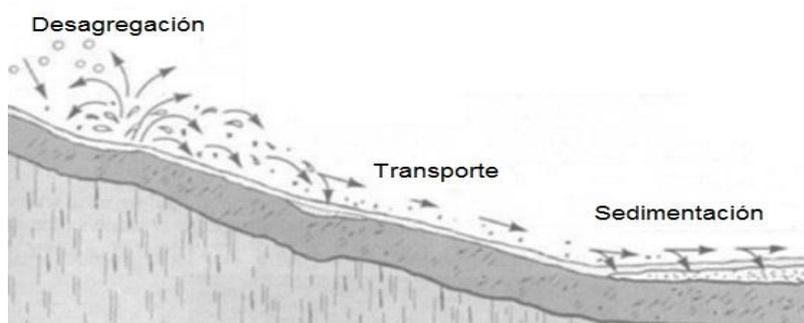
c. **Erosión en surcos**, La erosión en surcos es la forma de erosión más fácilmente perceptible, tiene su origen a causa del escurrimiento superficial del agua que se concentra en sitios irregulares o depresiones superficiales del suelo desprotegido o trabajado inadecuadamente (Foster, 1991).

Este fenómeno es producto de pequeñas irregularidades de las pendientes de terreno, la escorrentía se concentra en algunos sitios hasta adquirir volumen y velocidad suficientes para hacer cortes y formar surcos, que son canales continuos de anchura reducida y escasa profundidad, pudiendo ser eliminados por la labranza agrícola (Lal, 2007).

d. **Erosión en cárcavas**, Surge generalmente luego de la erosión laminar y la erosión en surcos, al aumentar el volumen de escorrentía o su velocidad; suele ser producto del descuido en la aplicación de medidas protectoras cuando se tienen formas incipientes de erosión, pudiéndose alcanzar estados de gran avance y desarrollo de difícil control posterior. En ocasiones se hace referencia a cárcavas en su fase inicial como surcos profundizados (Foster, 1991).

### 2.2.1.3. Procesos de la erosión hídrica

El agua es un erosivo muy energético. Cuando el suelo ha quedado desprotegido de la vegetación y sometido a las lluvias, los torrentes arrastran las partículas del suelo hacia arroyos y ríos. El suelo, desprovisto de la capa superficial, pierde la materia orgánica (humus) y entra en un proceso de deterioro que puede originar hasta un desierto (Henry, 1986). Véase los procesos de erosión hídrica en la siguiente figura:



**Figura 01:** Representación de los procesos de desprendimiento, transporte y deposición de sedimentos en el proceso de erosión hídrica.

1º. **Desprendimiento**, El agente más determinante para el desprendimiento en el caso de la erosión hídrica, lo constituyen las gotas de lluvia, las cuales, al golpear sobre una superficie desnuda, provoca que las partículas de suelo sean proyectadas al aire por distancias variables. La lluvia también compacta la superficie del suelo y baja la tasa de infiltración del mismo; como consecuencia, se presenta el escurrimiento, el cual conforme incrementa su velocidad de flujo y se encauza, produce, a su vez, desprendimiento y transporte de partículas (Figueroa, 1991).

2º. **Transporte**, Es el fenómeno provocado por el escurrimiento superficial del agua de lluvia que no logra infiltrarse en el suelo debido a las características físicas del suelo y a la topografía del terreno. Los factores más importantes que influyen o determinan esta etapa son: el escurrimiento superficial, la pendiente del terreno y la textura del suelo (Lal, 2000).

3º. **Sedimentación**, Este proceso se presenta cuando la energía o la capacidad de arrastre del agua ya no es suficiente para continuar el transporte de las partículas de suelo, dándose así el hundimiento o acumulación de las partículas del suelo en zonas llanas donde la pendiente de la ladera generalmente es inferior a cinco por ciento (Bernard y liavri, 2000).

#### **2.2.1.4. Efectos de la erosión en los niveles de nutrientes del suelo**

La erosión es un proceso que actúa de manera selectiva, arrastrando las partículas más finas y más reactivas del suelo (arcilla y materia orgánica) y dejando las partículas más gruesas, pesadas y menos reactivas, de esta manera la erosión provoca una disminución de la concentración de nutrientes en el suelo degradado remanente (FAO; 1994).

Morgan (1997), nos dice que la consecuencia directa de la erosión del suelo es la disminución de la productividad agrícola, debido a la pérdida de nutrientes, a su deterioro físico, a la pérdida de profundidad y en casos extremos a la pérdida total del suelo.

#### **2.2.1.5. Factores que intervienen en la erosión**

Los factores que controlan el sistema de erosión del suelo son: la erodabilidad del suelo, la erosividad del agente erodante, el tipo de cobertura vegetal y los diversos factores socioeconómicos (Renard et al., 1997).

**a. Erodabilidad del suelo**, La erodabilidad del suelo es su vulnerabilidad o susceptibilidad a la erosión. Un suelo con erodabilidad elevada sufrirá más erosión que un suelo con erodabilidad baja; si ambos están expuestos al mismo tipo de

lluvia. Dentro de los factores que influyen en la erodabilidad están en primer lugar las características físicas del suelo, es decir, el tipo edáfico, y en segundo lugar, el manejo a que se le haya sometido. Entonces desde el punto de vista para su control, interesan aquellas propiedades en que incrementan su capacidad de infiltración, ya que serán importantes para reducir escorrentía, y aquellas que aumentan la resistencia a su dispersión y transporte para que ésta sea mínima (Kirkby y Morgan, 1984).

Se considera que la erodabilidad varía en función de la textura del suelo, la estabilidad de los agregados, la resistencia al corte, la capacidad de infiltración y el contenido de materia orgánica y cementantes químicos del suelo. La textura del suelo afecta a la erodabilidad del mismo, según su resistencia al transporte por peso y/o rugosidad. La resistencia al corte del suelo es una medida de su cohesión y resistencia a las fuerzas cortantes que ejercen la gravedad, los líquidos en movimiento y las cargas mecánicas. La capacidad de infiltración del suelo está relacionada con el tamaño, estabilidad y forma de los poros en el perfil (Foster et al., 1981).

Por lo general, los suelos erosionables tienen un bajo contenido de arcilla. No existen suelos erosionables en el grupo de las arenas, y éstas en los suelos erosionables de arena limosa son finas. Los suelos que contienen más del 30-35% de arcilla son, generalmente coherentes y forman agregados estables de suelos, que son resistentes al impacto de las gotas de lluvia a la erosión por dispersión. Las arcillas, a menudo, son suelos con terrones; sus superficies ásperas almacenan mucha agua y son resistentes a la erosión laminar y por arroyuelos (FAO, 1967).

**b. Erosividad**, La erosividad está definida como la capacidad potencial que tiene la lluvia para causar erosión. La forma más adecuada de expresar la erosividad de la lluvia ha sido un índice basado en la energía cinética de la misma; de tal forma, la erosividad de una lluvia sería en función de su intensidad y duración, y de la masa, diámetro y velocidad de las gotas de ésta (Laws, 1943).

Las gotas de lluvia compactan la superficie del suelo y las salpicaduras y el flujo del agua desprenden partículas del mismo, estos procesos pueden sellar las superficies, con lo que disminuye la tasa de infiltración del agua en el suelo. Si cae más lluvia de la que puede infiltrarse en el referido suelo, se producen escorrentías (Kirkby y Morgan, 1994).

**c. Cobertura vegetal,** El papel más relevante de la vegetación es la intercepción de las gotas de lluvia, evitando que la energía cinética de las mismas se disipe en el suelo. La eficacia de la cobertura de plantas para reducir la erosión depende de la altura y continuidad de la cubierta vegetal aérea, de la densidad de la cobertura en el suelo y de la densidad de las raíces. (Almorox, 1994).

Además de interceptar la lluvia, la cobertura de plantas disipa la energía del agua de escurrimiento y del viento, produce rugosidad para el flujo y, por lo mismo, reduce su velocidad.

La cobertura de plantas juega un papel determinante en la reducción de la erosión, siempre y cuando cubra una porción grande de la superficie del suelo. Los bosques son los más efectivos en el control de la erosión, aunque también un pastizal muy denso puede tener la misma efectividad. Para que haya una protección adecuada debe haber, por lo menos, un 70% de cobertura superficial, pero se puede tener una protección razonable con un 40% de cobertura (Morgan y Finney, 1984).

**d. Pendiente,** Según Morgan (1997), sobre una superficie plana las gotas de lluvia salpican las partículas del suelo aleatoriamente en todas las direcciones, mientras que, en un terreno de pendiente pronunciado, más partículas de suelo son salpicadas pendiente abajo, aumentando así la proporción en función de la inclinación de la pendiente. Y a medida que aumenta la pendiente y el largo de la pendiente, aumenta la velocidad y el volumen del agua de escorrentía, y su poder erosivo.

**e. Factores socioeconómicos,** FAO (2002), señala que la causa principal de degradación del suelo y de la erosión, se origina en la

interferencia indiscriminada de los humanos sobre el balance ecológico natural de los ecosistemas, consistente en abuso y mal manejo del suelo y de los recursos hídricos. Bajo condiciones naturales, los ecosistemas tienden a un equilibrio con la erosión en función de su geología, topografía, suelo y clima, de sus condiciones hidrológicas y de microclima, y de sus comunidades de plantas y animales. En su esfuerzo para alimentarse, el hombre explota los terrenos introduciendo cambios inestables en el ecosistema. Aunque los productores utilizan el recurso suelo para la producción de plantas, ésta depende de que se mantenga la cantidad y calidad del suelo como un medio para el crecimiento de las raíces.

#### **2.2.1.6. Formas de evaluar la erosión del suelo**

El estudio de la erosión del suelo se puede realizar como erosión actual o como erosión potencial, de acuerdo a los fines del estudio (Wischmeier y Smith, 1978).

a. **Erosión actual**, La erosión actual es la medida de la pérdida de suelos que existe en un lugar determinado, en el momento presente y acorde a las actividades y presiones a que se encuentra sometido el suelo. Esta hace referencia a la relación que existe entre los factores de erosividad de las lluvias, el factor de erodabilidad del suelo, el factor de topografía y el factor de cobertura y uso del suelo, y se estima considerando éstos factores (Wischmeier y Smith, 1965).

La erosión actual se estima haciendo uso la fórmula algebraica de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, multiplicando todos sus factores, y obteniendo como resultado la pérdida de suelo en toneladas por hectárea por año (Foster, 1991).

b. **Erosión potencial**, La erosión potencial es una estimación de la erosión bajo condiciones hipotéticas de uso y manejo de las tierras, ya que no interviene en su cálculo el factor de cobertura y uso del suelo. Éstos dos factores no se consideran en la Ecuación

Universal de Pérdida de Suelos, debido a que son factores reductores de la erosión (USDA, 1995).

La erosión hídrica potencial se estima de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS) al utilizar únicamente los factores R, K y LS (erosividad de la lluvia, erodabilidad del suelo, longitud y grado de pendiente). La razón es que los factores CP de la EUPS representan las actividades atenuantes del proceso erosivo y en la medida que se diseñen practicas agronómicas y mecánicas, la erosión potencial se podrá reducir a niveles tolerables (Wischmeier y Smith, 1978).

El riesgo de erosión o erosión potencial se interpreta como la medida de la máxima pérdida de suelos posible en ausencia de una cobertura vegetal y de prácticas de conservación del suelo, solamente se toman en consideración la interacción de factores físicos de la tierra como el suelo, el clima y la topografía, para su cálculo de la erosión potencial, sólo se multiplican el factor de erosividad de la lluvia, el factor de erodabilidad del suelo y el factor topográfico. Los de más factores se obvian por ser factores atenuantes de la erosión (Renard, 1994).

c. **Niveles de erosión potencial del suelo**, Los niveles de erosión potencial pueden ser expresado cualitativamente (alto, moderado, bajo, etc.), o cuantitativamente (toneladas por hectárea por año).

La FAO (1980), establece las clases de erosión de pérdida de suelo ( $Tn\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) en cuatro niveles tal y como se muestra en el Tabla 01.

**Tabla 01:** Clasificación de la erosión hídrica (FAO, 1980).

<b>Pérdida de suelo (<math>Tn\ ha^{-1}\ año^{-1}</math>)</b>	<b>Grado de erosión hídrica</b>
<10	Nula o ligera
10 - 50	Moderada
50 – 200	Alta
>200	Muy alta

### **2.2.1.7. Pérdida tolerable de suelo (T)**

La pérdida tolerable de suelo, se define como la tasa máxima de pérdida de suelo anual que económica e indefinidamente permite el mantenimiento de un alto nivel de productividad agrícola (Boellstorff y Benito, 2005). La consideración de la tasa de pérdida de suelo tolerable es necesaria en la planificación de las medidas de conservación del suelo, ya que la comparación de los valores de pérdida de suelo estimados con los valores de T indica si las tasas de erosión están dentro o por encima de los valores tolerables de pérdida de suelo para un tipo de suelo o región determinado, de tal modo que las medidas de control de la erosión se enfoquen a las zonas más degradadas. Definir el máximo grado de erosión aceptable que permita al mismo tiempo la sostenibilidad y una alta productividad en las cosechas es lo que en principio implica la tasa tolerable "T" que, combinada con la velocidad de formación del suelo en un año, indica el uso sostenible del suelo. Pero la tasa tolerable de erosión tiene debilidades, puesto que medir la velocidad de formación del suelo no es posible en la práctica, ya que son tan lentas que no pueden determinarse con facilidad (FAO, 1980). Según Zachar (1982), la velocidad promedio de formación del suelo se sitúa alrededor de 0.1mm/año.

Boellstorff y Benito (2005) consideran que, en la mayoría de las ocasiones los valores de T varían de 1 a 13 Tn ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, mientras que Schertz (1983) acota el intervalo de T entre 5 y 10 Tn ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para suelos con una profundidad mayor a un metro. Para Wischmeier y Smith (1978), la tasa de erosión tolerables para suelos de regiones tropicales se encuentra entre 4.5 – 11.5 Tn ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, esta pérdida permitiría una alta productividad en los cultivos para que sean económicamente e indefinidamente sostenible.

### **2.2.2. Ecuación universal de pérdida de suelo (USLE)**

El modelo empírico USLE fue concebido para predecir la pérdida de suelo a largo plazo producida por la escorrentía superficial, sobre laderas

cultivadas y praderas bajo sistemas de gestión específicos, así como para estimar la eficiencia de la gestión del suelo y de las cubiertas y de las medidas de conservación del suelo, tanto en zonas agrícolas como en zonas afectadas por otras actividades que modifican la disposición original del suelo (Wischmeier y Smith, 1978).

La ecuación básica del modelo para estimar la pérdida de suelos por erosión hídrica es la siguiente:

$$A=R * K* LS * C * P \quad \text{Donde:}$$

A : Pérdida de suelo promedio anual ( $Tn \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ),

R : Factor de erosividad de la lluvia y de la escorrentía ( $MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ),

K : Factor de erodabilidad del suelo ( $Tn \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ h}$ ),

LS : Factor topográfico de longitud y pendiente de la ladera (adimensional),

C : Factor de vegetación (adimensional), y

P : Factor de las prácticas de control y medidas de conservación del suelo (adimensional).

En cuanto a las limitaciones de la USLE Wischmeier y Smith (1965), señala lo siguiente:

- No estima con precisión la erosión para un evento específico.
- No estima el depósito de sedimentos.
- No estima la concentración de sedimentos en la escorrentía.

### **2.2.2.1. Factor de erosividad de la lluvia (R)**

Se entiende por erosividad a la capacidad potencial de la lluvia para generar erosión, capacidad que es variable en función a características de precipitaciones, en especial del volumen, intensidad, duración, energía cinética y diámetro de la gota de lluvia. Estrechamente relacionado con el concepto de erodabilidad o la susceptibilidad del suelo a erosión (Morgan, 1997).

**Estimación del factor R,** En 1958 Wischmeier y Smith observaron que las pérdidas del suelo resultaban directamente

proporcional a la energía cinética de la precipitación si se mantenían constantes el resto de parámetros (suelo, cubierta vegetal, etc). Tras realizar numerosas pruebas determinaron que la mejor forma de estimar la erosividad de las lluvias y las pérdidas de suelo asociadas era mediante el producto entre la energía cinética (E) de un evento y la intensidad en 30 minutos ( $I_{30}$ ) del mismo. El procedimiento de cálculo que plantearon es el índice  $EI_{30}$ , del que se deriva el factor R utilizado en los modelos USLE (Wischmeier y Smith 1978).

R es el factor de erosividad de la lluvia y de la escorrentía superficial, calculado a partir de la energía y la intensidad de las precipitaciones, y medido en  $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . R se expresa de la siguiente manera:

$$R = \sum_{i=1}^j (EI_{30})_i / N$$

Siendo E la energía cinética del evento de lluvia erosiva ( $\text{MJ ha}^{-1}$ );  $I_{30}$  es la intensidad de la lluvia en los 30 minutos de intensidad máxima ( $\text{mm h}^{-1}$ );  $EI_{30}$  es la erosividad de una tormenta  $i$ ;  $j$  es el número de tormentas en  $N$  años. El cálculo de este índice precisa de la existencia de una red de pluviógrafos que monitoricen de manera continua las precipitaciones (Wischmeier y Smith, 1978).

Existen otros métodos que permiten una aproximación al factor R como el Índice de agresividad de la lluvia de Fournier (IF) y el Índice modificado de Fournier (IMF).

#### **a. Índice de agresividad de la lluvia de Fournier (IF)**

El índice de agresividad de la lluvia de Fournier (IF), es una ecuación de aplicación sencilla que ofrece resultados equiparables a los del factor R de Wischmeier y Smith (Foster et al., 1981). Su formulación es:

$$IF = \frac{p^2}{P}, \text{ Donde:}$$

“p” es la precipitación del mes más lluvioso al cuadrado (mm) y “P” la precipitación total anual (mm).

## b. Índice modificado de Fournier (IMF)

El índice modificado de Fournier, es la corrección que Arnoldus (1980) hace del anterior. En él se aprecia que además de la precipitación del mes más húmedo, se tiene en cuenta la precipitación del resto de los meses, su fórmula es:

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} p_i^2 / P_t$$

Donde  $\sum$  es la sumatoria de la precipitación mensual al cuadrado ( $p_i^2$ ) entre la precipitación anual ( $P_t$ ).

Gabriels (1986), Bergsma (1980), analizaron la propuesta de Arnoldus mediante su aplicación a diferentes espacios europeos (Países Bajos, Bélgica, etc), concluyeron que los resultados guardaban gran correlación con el índice  $EI_{30}$  de la USLE, dando la validez de IMF como método de cálculo alternativo a  $EI_{30}$ .

CORINE (1992), clasifica los valores de erosividad de la lluvia en cinco categorías, tal como se puede apreciar en el Tabla 02. El programa CORINE (Coordination Information Environment) fue promovido por la Comunidad Europea en 1992 para la evaluación del riesgo de erosión y la calidad del suelo.

**Tabla 02:** Clasificación de los valores de erosividad

Clase	IMF MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Rango
1	< 60	Muy baja
2	60-90	Baja
3	90-120	Moderada
4	120-160	Alta
5	> 160	Muy alta

Fuente: CORINE, 1992

### 2.2.2.2. Factor de erodabilidad del suelo (K)

El factor K de la USLE o la erodabilidad del suelo, es una propiedad compleja que refleja la facilidad con la que éste es degradado debido al impacto de las gotas de lluvia, a la

escorrentía superficial o a ambos. El parámetro K hace referencia a la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica. Se expresa en  $Tn\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$  y está estrechamente relacionado con las propiedades físicas y químicas del suelo tales como el tipo de textura, estructura, porosidad, conductividad hidráulica, contenido de materia orgánica, etc. (Kirkby y Morgan, 1984).

Para estimar el valor de la susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica (K) es necesario contar con datos edáficos específicos. El valor de K en unidades del sistema norteamericano se calcula mediante la siguiente ecuación establecida por Wischmeier y Smith (1978).

$$K = \frac{2.1 * M^{1.14} * 10^{-4} * (12 - \%MO) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3)}{100} * 0.1317$$

En la formula OM, es el contenido de la materia orgánica del suelo, M es el producto de (% de limo + % de arena fina) y (100 - % de arcilla), b hace referencia a la estructura, es decir, a la disposición de las partículas y agregados de un suelo, y c se refiere a la permeabilidad del suelo.

La materia orgánica ayuda a mantener la cohesión de las partículas del suelo, influye en la capacidad de retención del agua de lluvia, la infiltración y la escorrentía. Los suelos ricos en materia orgánica son más resistentes a la erosión y ayudan a mantener la reserva hídrica (Cerdá, 1998).

Wischmeier y Smith (1978), identifican cuatro clases de estructura del suelo, con valores de 1 a 4, en función al tamaño medio de sus agregados individuales, tal como se puede apreciar en el Tabla 03. Y 6 clases de permeabilidad, con valores de 1 a 6, en función de la velocidad de infiltración de la escorrentía: 1. Muy rápida (>15 cm/h); 2. Rápida (15 – 4 cm/h); 3. Moderada (4 – 2 cm/h); 4. Moderadamente lenta (2 – 0.5 cm/h); 5. Lenta (0.5 – 0.15 cm/h); 6. Muy lenta (< 0.15 cm/h).

**Tabla 03:** Características de la estructura del suelo

<i>Estructura (b)</i>	<i>Tamaño de la partícula</i>	<i>Valor</i>	<i>Texturas</i>
<i>Muy fina</i>	<i>&lt;1mm</i>	<i>1</i>	<i>Arcillosa, arcillo arenosa y arcillo limosa</i>
<i>Fina</i>	<i>1 - 2mm</i>	<i>2</i>	<i>Franco arcillosa, franco arcillo arenosa y franco arcillo limosa</i>
<i>Media - gruesa</i>	<i>2 – 5mm</i>	<i>3</i>	<i>Franca, franco arenosa, franco limosa y limosa</i>
<i>Muy gruesa</i>	<i>&gt;5mm</i>	<i>4</i>	<i>Arenosa y arenosa franca</i>

Fuente: Wischmeier y Smith, 1978

USDA (1983), en el manual de suelos No. 430 del Departamento de Agricultura de EE.UU. define las clases de permeabilidad en función de la velocidad de infiltración por tipo de textura del suelo, tal como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 01:** Clases de permeabilidad del suelo (USDA, 1983).

<b>Clases de permeabilidad</b>	<b>Textura – USDA (1983)</b>	<b>Velocidad de infiltración. (cm/hora)</b>
1 (rápida y muy rápida)	Arenosa	Mayor a 12.5
2 (moderada a rápida)	Arenosa franca, franco arenosa	De 6.25 a 12.5
3 (moderada)	Franca, franco limosa, limosa	De 2 a 6.25
4 (lenta a moderada)	Franco arcillo arenosa, franco arcillosa	De 0.5 a 2
5 (lenta)	Franco arcillo limosa, arcillo arenosa	De 0.125 a 0.5
6 (muy lenta)	Arcillosa, arcillo limosa	Inferior a 0.125

Renard et al. (1997) establecen rangos para la erodabilidad del suelo (factor K), donde valores mayores a  $0.4 \text{ Tn ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  (tonelada por hectárea por hora, dividido entre hectárea por mega joule por milímetro) para el factor K representan suelos altamente susceptibles a la erosión, tal como se puede apreciar en la siguiente Tabla:

**Tabla 02:** Rangos de erodabilidad (Renard et al., 1997).

<b>K (<math>\text{Tn ha h ha}^{-1} \text{ JM}^{-1} \text{ mm}^{-1}</math>)</b>	<b>Valor</b>
0.05 – 0.2	Bajo
0.25 – 0.4	Moderado
>0.4	Alto

### 2.2.2.3. Factor topográfico (LS)

La topografía del terreno es determinante en los mecanismos de erosión de suelos por su incidencia en la escorrentía. La pendiente, la longitud y el perfil de la ladera son los factores que ejercen una mayor influencia en la erosión de las vertientes. El ángulo de inclinación de la pendiente determina la energía cinética que puede alcanzar la lámina de agua que circula en superficie y, en consecuencia, su poder erosivo. A mayor ángulo de la pendiente la escorrentía se genera más rápidamente, mayor es la velocidad de circulación del agua y más efectiva su poder de transporte de sedimentos. Por el contrario, en pendientes de menor gradiente el agua discurre a menor velocidad, con lo cual tiene más posibilidades de infiltrarse en el subsuelo. La longitud de la ladera es igualmente determinante, la mayor longitud de la pendiente favorece la concentración, el volumen, y la velocidad del flujo superficial, intensificando la capacidad de desagregación y transporte de la escorrentía (Moore y Wilson, 1992).

El factor combinado LS de a USLE pretende reflejar la incidencia de la topografía sobre la pérdida de suelos en una ladera de longitud y pendiente determinada frente a la erosión que se obtendría en una parcela estándar de 22.13 m (72.6 pies) de longitud y 9% de pendiente, manteniendo estables el resto de los factores climáticos, edáficos, usos y conservación del suelo. L es la longitud de la ladera que se define como la distancia horizontal desde el origen de la escorrentía hasta el punto en el que la pendiente de la ladera disminuye lo suficiente como para permitir la sedimentación, o hasta el punto donde la escorrentía se canaliza en un curso fluvial, y S es la inclinación de la ladera que refleja la incidencia del ángulo de la pendiente en la erosión (Renard et al., 1997).

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m; \quad m = \frac{F}{1+F}; \quad F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3(\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$

Dónde:  $\lambda$  es la proyección horizontal de la pendiente en metros,  $\beta$  es el ángulo de la pendiente en radianes, para lo cual se deberá tener en cuenta que un grado sexagesimal equivale a 0.01745 radianes.

McCool et al. (1989), para determinar el subfactor S proponen el uso de las siguientes ecuaciones:

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0.03 & \tan \beta_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0.5 & \tan \beta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{cases}$$

Donde, el ángulo  $\beta$  se toma como el ángulo medio a todos los subgrids en la dirección de la pendiente. Éste mismo autor aclara que, cuando el perfil de la vertiente es irregular, es decir, cuando no hay una única longitud y pendiente representativas (laderas cóncavas o convexas), la forma más exacta para determinar el factor topográfico es dividir la parcela en varios segmentos de pendiente homogénea y similar longitud.

Para el cálculo automatizado del subfactor L de la USLE en laderas de topografía compleja e integración con SIG, Desmet y Govers (1996) proponen la siguiente ecuación:

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{X^m * D^{m+2} * (22.13)^m}$$

Donde  $A_{(i,j)}$  es el área aportadora unitaria a la entrada de un pixel (celda) o la acumulación del flujo a nivel de pixel, D es el tamaño del pixel y X es el factor de corrección de forma.

#### 2.2.2.4. Factor de la cobertura vegetal (C)

La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Los componentes aéreos, como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento, de modo que su efecto es menor que si actuaran directamente sobre el suelo, mientras que los componentes subterráneos como la raíz, contribuyen a la resistencia mecánica del suelo (Morgan, 1997).

De acuerdo a Kirkby y Morgan (1984), la vegetación es el factor más importante para comprender la intensidad de la erosión del suelo, la vegetación más superficial funciona como barrera de la escorrentía, reduciendo la velocidad de la misma, modificando el curso del flujo y facilitando la infiltración del agua en subsuelo.

Según Renard y Freimund (1994), factor C del modelo USLE valora precisamente el efecto protector de las cubiertas vegetales y los diferentes sistemas de laboreo y gestión sobre la pérdida anual de suelos. El factor C es considerado factor atenuante de la erosión del suelo, y expresa la relación entre la pérdida de suelo en una parcela que presenta cierto porcentaje de cobertura vegetal y la pérdida que tendría lugar en una parcela en barbecho, siendo similares el resto de los factores. Y el valor promedio anual de este factor oscila entre 0 y 1, correspondiendo el valor de la unidad al suelo que está desnudo, sin cobertura vegetal y en barbecho y, cero a una efectividad total de control de la erosión. El valor de C tiende a disminuir a medida que la cobertura vegetal aumenta en densidad y frecuencia, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$SLR=PLU*CC*SM*SR*SC \quad \text{Donde;}$$

SLR (Soil Loss Ratio) es la relación de pérdida de suelo mensual, PLU (Prior Land Use) es el subfactor de uso previo del suelo, que expresa la influencia de los residuos existentes antes del cultivo y los efectos de prácticas de cultivo previas a la consolidación del suelo, CC (Canopy Cover) es el subfactor que refleja el efecto de la cobertura vegetal del área, MS (Soil Moisture) es el factor de la humedad del suelo, SR (Surface Roughness) es el subfactor de rugosidad de la superficie tras las prácticas agrícolas y, SC (Surface Cover) es el subfactor de cobertura superficial, que influye en la capacidad de transporte de escorrentía.

El cálculo final de C a partir de los valores de pérdida de suelo mensual (SLR) se estima de la siguiente forma:

$$C = (SLR_1 * EI_1 + SLR_2 * EI_2 + \dots + SLR_n * EI_n) / EI_t$$

Donde SLR es la ratio de pérdida de suelos mensual; EI es el factor erosividad de la lluvia R mensual, y  $EI_t$  es la erosividad anual.

Para el cálculo del factor C se debe tener en consideración las diferentes etapas de desarrollo de las especies cultivadas, los residuos dejados por los cultivos precedentes, la desigual distribución anual de las precipitaciones y la efectividad de las prácticas de conservación (Wischmeier y Smith, 1965).

#### **2.2.2.5. Factor de prácticas de conservación de suelos (P)**

Las prácticas de conservación de suelos es el conjunto de técnicas y trabajos culturales que buscan un uso racional y eficiente de los suelos agrícolas con el objeto de controlar la erosión hídrica y mantener o mejorar su capacidad productiva (Machin y Navas, 1995).

El factor P se basa en la relación de pérdida de suelos en una parcela con una práctica de conservación específica frente a una parcela estándar en la que el sistema de laboreo se realiza en paralelo a la pendiente, es decir, donde no se aplica ninguna técnica de conservación de suelo, en la que P es igual a 1 (Wischmeier y Smith, 1978).

#### **2.2.3. Modelamiento de la erosión del suelo**

La modelización de la erosión y transporte del suelo tal y como hoy la entendemos comienza en EE. UU. De la mano de Wischmeier y Smith (1958), a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Universal Soil Loss Equation, USLE).

La integración de los modelos predictivos en las aplicaciones de tipo SIG y la utilización de los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) supone un cambio cualitativo en el estudio del riesgo de erosión y en la escala espacial y temporal de aplicación de los modelos (Machín y Navas, 1995).

De Antonio (1994) indica, que el empleo de los modelos de erosión con los sistemas de Información Geográfica permite estudiar las variaciones temporales de los modelos erosivos, analizar y mantener actualizada la gran cantidad de información requerida, normalizar y comparar las metodologías, obtener representaciones gráficas y servir de punto de partida para la realización de estudios hidrológicos y de planificación, logrando lo siguiente:

- ✓ La creación de bases de datos con la información precisa para la aplicación de los modelos de erosión.
- ✓ La obtención de los parámetros que intervienen en cada modelo.
- ✓ La determinación de la erosión hídrica y la cuantificación de los resultados de ésta.
- ✓ El cálculo de las superficies afectadas, según grado de erosión.

#### **2.2.3.1. Modelamiento espacial o modelamiento cartográfico**

El análisis espacial es la conjugación de técnicas que buscan separar, procesar, clasificar y presentar los criterios cartográficos en estudio cuantitativo y cualitativo de aquellos fenómenos que se manifiestan en el espacio. El análisis espacial en los SIG comprende los procedimientos utilizados para abordar el estudio de la estructura y de las relaciones territoriales a partir de los conocimientos de la posición y de las características de las entidades geográficas de las variables involucradas (Chen, 2001).

Según Almorox (1994), el modelamiento cartográfico es un conjunto de operaciones de análisis y comandos interactivos utilizando mapas que actúan como una pila u overlay cuyo fin es procesar decisiones de tipo espacial. La realidad está representada en mapas. Este modelamiento está orientado a procesos y no a productos. "Se refiere a la utilización de las funciones de análisis de un sistema de información geográfica bajo una secuencia lógica de tal manera que se puedan resolver problemas espaciales complejos". Es la expresión detallada de la manipulación de los datos utilizando las funciones del software

SIG, para la producción de nueva información que será almacenada en el computador, de manera permanente como nuevas entidades, o de manera virtual para análisis determinados.

Son características de los modelos cartográficos:

- ✓ Presentación de una secuencia lógica de operaciones analíticas expresadas en diagramas de flujo (Flowcharts).
- ✓ Usualmente están codificadas en macros (lenguajes de comando).
- ✓ Apoyan el uso de un SIG en planteamiento, realización de consensos (consensus building) y resolución de conflictos.

Los esquemas de flujo son la implementación SIG de los modelos conceptuales del problema y/o su solución. Todos los procedimientos de modelado cartográfico se basan en los datos tomados de dos o más capas de información iniciales, para generar, una nueva capa o mapa. Los modelos cartográficos se pueden agrupar en: descriptivos, simulación y predictivos (Schowengerdt, 2007).

Existen varios modelos de datos respecto de los objetos geográficos; en mapas o planos formados por puntos, líneas y polígonos se utilizan, fundamentalmente, dos aproximaciones: el modelo "vectorial" y el modelo "reticulado", también denominado "raster". Los mapas tridimensionales o de volúmenes tienen sus propios modelos de datos, clasificados según utilicen como elementos básicos: puntos, líneas o funciones matemáticas. Un modelo vectorial representa los objetos espaciales codificando sus fronteras. Las líneas que actúan como límites están constituidas por segmentos rectos y se establecen mediante las coordenadas de los puntos o vértices de los mismos. En un modelo de datos raster no se codifican las fronteras de los objetos, sino que se registra su interior, quedando sus límites implícitamente representados (De Antonio, 1994).

### 2.3. Definición de términos básicos

- **Riesgo:** Representa la probabilidad de daños y pérdidas debido a la ocurrencia de un evento sobre un elemento vulnerable. Además, se puede expresar el riesgo como la amenaza por la vulnerabilidad (Keller y Blodgett, 2004).
- **Cuenca hidrológica:** Área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien, para cada punto de su recorrido. Así mismo se define como cuenca pequeña a aquella cuya área varía desde unas pocas hectáreas hasta un límite, que para propósitos prácticos se considera 250 Km<sup>2</sup>. Y cuenca grande a aquella cuenca cuya área es mayor de 250 Km<sup>2</sup> (Villón, 2011).
- **Modelo:** Es la representación de los fenómenos que ocurren en un sistema ambiental (Wengerdt, 2007).
- **SIG:** Es un sistema de información que está diseñado para trabajar con datos espaciales o geográficas, es decir, un SIG es la vez un sistema de base de datos con capacidades específicas para datos referenciados espacialmente y un conjunto de operaciones para análisis con los datos (Chen, 2001).
- **Algebra de Mapas:** Es un lenguaje diseñado específicamente para sistemas geográficos basados en celdas. El lenguaje permite al usuario ordenar sus pensamientos y ofrece las reglas y sintaxis necesaria para que el usuario se pueda comunicar con el computador.
- **Algebra de mapas:** Es un lenguaje computacional de alto nivel para describir modelamiento cartográfico. Este lenguaje establece un grupo de convenciones para el control del procesamiento de datos. Las convenciones describen como se especifican las operaciones, los datos sobre las cuales operan y el orden en que las operaciones deben ser procesadas (Canty, 2014).

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1. Ubicación del área de estudio

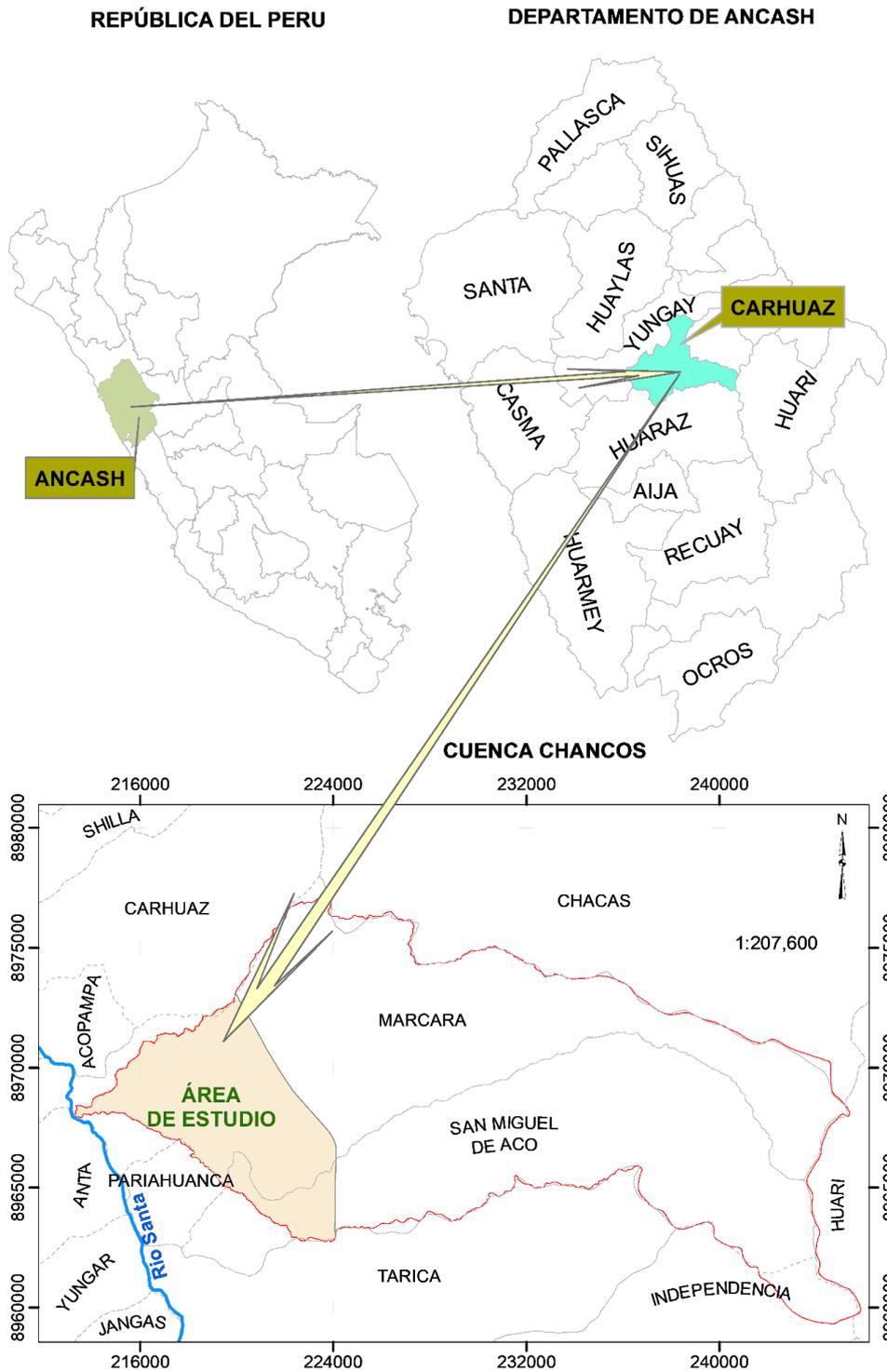
El área de estudio se encuentra ubicado en la zona agrícola de la cuenca Chancos en la cordillera blanca en el Callejón de Huaylas, y forma parte de la gran cuenca del río Santa en la vertiente del Pacífico. Tiene una superficie aproximada de 5021.72 hectáreas, extendiéndose geográficamente entre las coordenadas UTM 213035 Este 8962639 Norte, y 224172 Este 8973144 Norte, tal como se puede apreciar en la Tabla 06. Las altitudes sobre el nivel del mar varían entre 2680 metros hacia el Oeste para el área circunvecina a la localidad de Huascaruri del Distrito de Marcará y 3715 metros hacia el Este que corresponde a las áreas aledañas a la localidad de Atocpampa del Distrito de San Miguel de Aco.

En la Figura 02 (pág. 29), se puede apreciar la ubicación precisa del área de estudio.

Políticamente, la zona de estudio está ubicada en los Distritos de Marcará y San Miguel de Aco, Provincia de Carhuaz del Departamento de Ancash. La zona de estudio colinda por el Oeste con la cordillera negra (río Santa), por el Este con el resto de la cuenca Chancos, por el Norte con el Distrito de Acopampa y con el Distrito de Carhuaz, y por el Sur con el Distrito de Pariahuanca y con el Distrito de Taricá, ocupando parte del territorio del Distrito de San Miguel de Aco.

**Tabla 06:** Coordenadas UTM del área de estudio.

Coordenadas	
Este	Este
213035	213035
224172	224172



**Figura 02:** Ubicación geográfica del área de estudio.

### 3.2. Descripción del área de estudio

#### 3.2.1. Clima

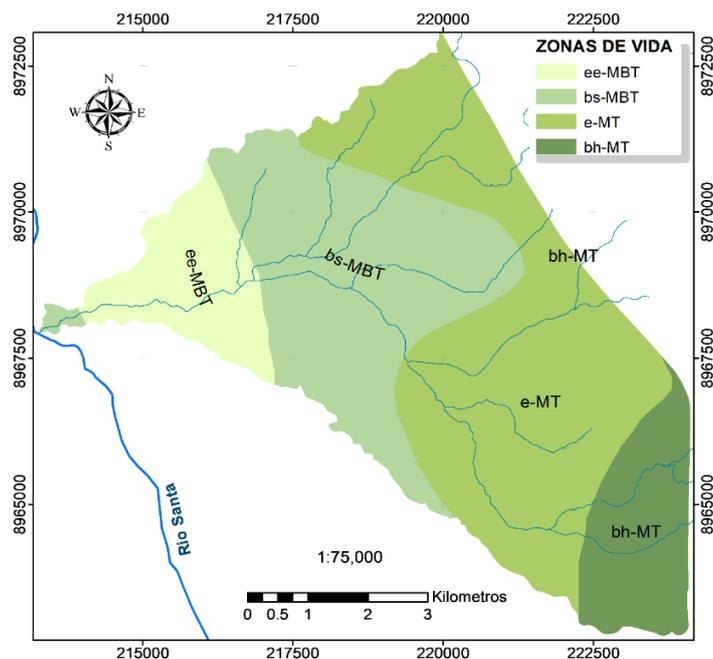
La precipitación pluvial es variable dentro del área de estudio y está vinculada estrechamente a la altitud. La precipitación media anual

registrada en la estación pluviométrica de Chancos es de 549.9 mm., mientras que en la estación ubicada en Anta es de 609.2 mm.

Las lluvias son de carácter estacional, es decir, se distribuyen muy irregularmente a lo largo del año, produciéndose generalmente de diciembre a marzo (Figura 03). En el área altitudinal comprendida entre los 2900 y 3715 m.s.n.m., las lluvias son mucho más intensas y se producen con más frecuencia, propiciando un período húmedo en el verano y otro seco en el invierno mientras que, en el piso inmediato inferior, comprendido entre los 2200 y 2900 m.s.n.m., las lluvias son menos intensas y más escasas, éste sector requiere forzosamente, para el cumplimiento del ciclo vegetativo de los cultivos, de riego suplementario y, en muchos casos de riego permanente.

La temperatura varía de acuerdo al área altitudinal de que se trate. En el estrato correspondiente a los 2680 y 3000 m.s.n.m., se tiene temperaturas promedio anuales de 16°C para los pisos inferiores y de 12°C para los niveles más altos. En el estrato superior, entre 3000 y 3715 m.s.n.m., la temperatura promedio anual es de 11°C.

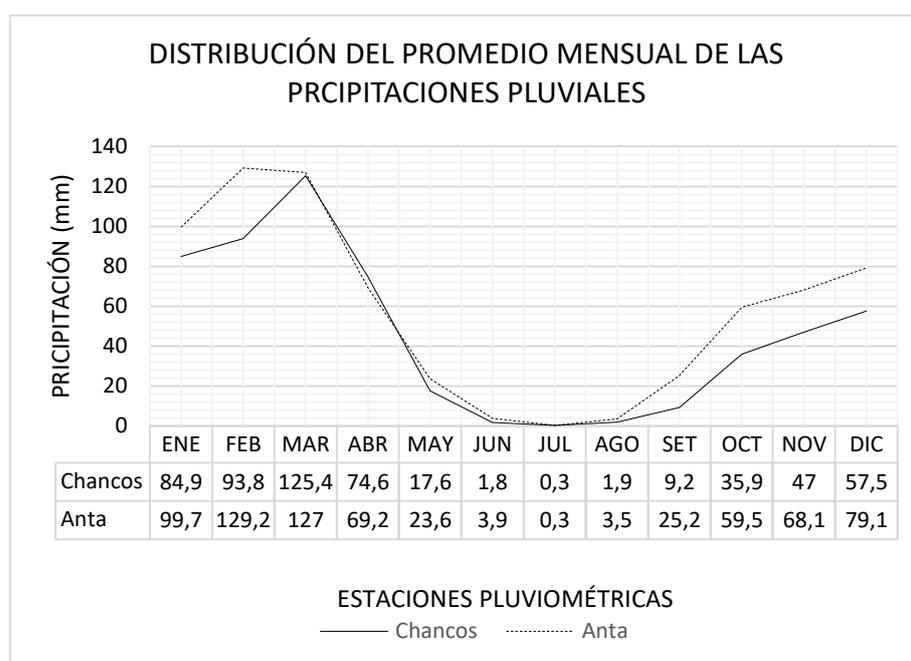
El área de estudio está comprendida entre las altitudes sobre el nivel del mar de 2680 metros y 3715 metros, y se pueden diferenciar cuatro zonas de vida, como se puede apreciar en la siguiente Figura:



**Figura 03:** Zonas de vida del área de estudio, en base al mapa ecológico del Perú (ONERN, 1976).

### **Bosque Seco-Montano Bajo Tropical (bs-MBT)**

Esta zona de vida se extiende entre las cotas de 2,680 y 3,545 m.s.n.m., ocupa una superficie de 1,598.36 ha., que representa el 31.83% del área total de la zona agrícola de la cuenca Chancos, se caracteriza por presentar un clima subhúmedo, templado y templado. Las lluvias no son suficientes para satisfacer las demandas de agua de los cultivos, desarrollándose predominantemente una agricultura bajo riego. Las condiciones térmicas son mayormente favorables para la fijación de un amplio espectro de cultivos tanto intensivos como de carácter permanente. Los cultivos más comunes son el papa, maíz, arveja, haba, y algunos frutales como palta, el melocotón. Entre las vegetaciones, se pueden diferenciar a las más comunes como el eucalipto, el capulí (*Prunus capullin*) y la retama (*Spartium junceum*).



**Figura 04:** Régimen de la distribución mensual de las precipitaciones en el área de estudio.

### **Estepa Espinoso-Montano Bajo Tropical (ee-MBT)**

Esta zona de vida ocupa un área más reducida, en la parte urbana del distrito de Marcará. Ubicada entre 2732 y 3383 m.s.n.m., y se extiende en una superficie de 559.43 ha., que representa el 11.14% de toda el área de estudio. El clima permite el desarrollo de agricultura en secano con riego suplementario, debido a la escasa precipitación en los meses de mayo

hasta agosto, tal como se puede apreciar en la Figura 03, se caracteriza por presentar un clima templado.

### **Estepa-Montano Tropical (e-MT)**

Esta zona de vida en el área de estudio es la de mayor área, ocupa una superficie de 2,262.60 ha., que representa el 45% de la zona agrícola de la cuenca Chancos, y se extiende entre las cotas de 3,002 y 3,663 m.s.n.m., se caracteriza por presentar un clima frío. Se practica la agricultura mixta de secano y riego, cultivando mayormente tubérculos como la papa, oca, olluco. La vegetación está representada en su mayoría por comunidades arbustivas que crecen sobre un estrato herbáceo de tipo graminal.

### **Bosque Húmedo-Montano Tropical (bh-MT)**

Esta zona de vida se extiende entre las cotas de 3,308 y 3,715 m.s.n.m., y ocupa una superficie de 11.97 ha. Se caracteriza por presentar un clima húmedo frío, con precipitaciones mucho más intensas y frecuentes que la formación precedente y con un promedio anual del orden de 700 mm. Las lluvias son estacionales, concentrándose la mayor cantidad entre los meses de diciembre a marzo, lo que permite practicar una agricultura mixta de secano y riego, las fuertes oscilaciones térmicas entre el día y la noche sí pueden ser perjudiciales.

## **3.2.2. Hidrografía**

El área en estudio se ubica en la zona agrícola de la cuenca Chancos, exactamente en el margen izquierdo, tal como se puede apreciar en la Figura 02, con un área superficial de 5021.72 hectáreas. Presentando un relieve bastante accidentado, de fuertes pendientes, típico de la topografía de la sierra de los andes.

La zona agrícola de la cuenca Chancos comprende diversos cuerpos de agua provenientes de las lagunas de origen glaciar ubicadas en las cabeceras de la cuenca Chancos, las mismas que descargan sus aguas al río Santa. El río Vicos es el principal río de la cuenca, siendo uno de los afluentes a la gran cuenca del río Santa.

El río Vicos nace de la unión de los ríos Lecjiamayo con el río Quebrada Honda, esta última nace de la laguna Minoyo que tiene un área superficial de 153273.5 metros cuadrados y ubicada a una altura de 4700 m.s.n.m.

Éste río recibe la afluencia de los ríos Socollacu, Huamanyacu, estos dos ríos que nacen de las filtraciones del deshielo de los glaciares, y de los ríos Ruripaccha con origen en la laguna Rocotuyo con una superficie de 370418.5 metros cuadrados ubicada a una altura de 4480 m.s.n.m., y el río Yuracyacu con origen de la laguna Aquilpo.

### **3.2.3. Geología**

De acuerdo al mapa geológico correspondiente publicada por INGEMMET (1995), en la zona agrícola de la cuenca Chancos (área de estudio) se identificaron seis formaciones geológicas, que se describen a continuación

- ✓ Grupo Goyllarisquizga (formación Carhuaz), del Cretáceo inferior de la era Mesozoica. Constituidas por areniscas grises verdosas intercaladas con lutitas y limolitas marrones.
- ✓ Grupo Goyllarisquizga (formación Santa), del Cretáceo inferior de la era Mesozoica. Constituida por calizas grises oscuros con venillas de calcita con lentes de lutitas grises.
- ✓ Grupo Goyllarisquizga (formación Chimú), del Cretáceo inferior de la era Mesozoica. Constituida principalmente por cuarcitas de matices pardos y blanquecinos, intercalados por material sedimentario calcareo.
- ✓ Depósitos fluvio-glaciares, del cuaternario Holoceno de la era Cenozoica. Constituidas por gravas, arenas en matriz limoarenosas, arcillas, limos, y materiales residuales no consolidados.
- ✓ Formación Yungay, del Neogeno plioceno de la era Cenozoica. Constituido por material tufáceo de coloración blanca o gris claro, de origen volcánico, contiene abundantes cristales de cuarzo y biotita dentro de una matriz feldespática.

- ✓ Depósitos aluviales, del Neogeno pliocena de la era Cenozoica. Constituido por sedimentos de arenas, limos, arcillas, gravas, piedras de granitos, cuarcitas, andesitas y calizas.

### **3.2.4. Suelos**

En base al estudio semidetallado de suelos del Callejón de Huaylas realizado por la ONERN (1973), en el área de estudio se identificaron 11 tipos de suelos y 3 áreas misceláneas que se describen a continuación.

#### **a) Suelo Aluvión (Símbolo AI)**

Este suelo está compuesta por suelos constituidos a base de materiales recientes, formados a partir de sedimentos moderadamente gruesos entremezclados con gravilla dejados por los aluviones. Se distribuye geográficamente, en terrazas medias y bajas, presentando un relieve topográfico inclinado, con declives dominantes entre 7 y 15%. Morfológicamente, son suelos sin mayores características diferenciales a lo largo del perfil, conformados por una masa homogénea de color pardo grisáceo oscuro y de textura arena franca variando a franco arenoso con inclusiones de gravilla en una proporción de 40%. La superficie se caracteriza por la prevalencia de elementos gruesos en forma de grava, guijarros y piedras que normalmente adquieren proporciones notables. El predominio de los elementos gruesos dentro de la masa de suelo confiere a éste un drenaje algo excesivo y una permeabilidad moderadamente rápida a rápida. Son suelos de bajo contenido de materia orgánica.

#### **b) Suelo Huaraz (Símbolo Hr)**

Los tipos de suelos Huaraz se distribuyen entre los 2300 y los 3200 m.s.n.m., estos suelos se han formado, esencialmente, sobre materiales de origen fluvio glacial, aunque existen también aportes netamente aluviónicos. El material originario está formado predominantemente a base de la desintegración de rocas graníticas. Fisiográficamente, estos suelos se encuentran en colinas bajas y arenas de pie de monte, así como también ocupando cierta proporción de abanicos aluviales, presenta una topografía inclinada entre 7 y 15%. El drenaje de estos suelos puede clasificarse como un tanto excesivo,

debido principalmente a la presencia de elementos gruesos en la masa del suelo. La grava o materiales gruesos en la superficie alcanzan proporciones un poco mayores a 30%.

Presentan perfiles de morfología estratificada, caracterizados por presentar un perfil AC, en el cual el horizonte superficial modificado o Ap, de 20 cm. de espesor promedio, presenta una textura franca arena gravosa, muy friable y de estructura granular que descansa sobre un horizonte C sin estructura, caracterizado por su elevada proporción de gravas y piedras, principalmente a partir de los 70 cm. de profundidad. Son suelos de bajo contenido de materia orgánica.

### **c) Suelo Vicos (Símbolo Vi)**

Los tipos de suelos Vicos se localizan entre los 3000 y los 3400 m.s.n.m., estos suelos se han desarrollado a partir de materiales de origen fluvio glacial constituidos por elementos gruesos de naturaleza granítica, principalmente. Ocupan las laderas y colinas fuertemente disectadas. El relieve topográfico es muy accidentado, con declives dominantes entre 25 y 50%, presentando en menor proporción pendientes de 15 y 20%. El drenaje de estos suelos es moderado variando a imperfecto, lo que es debido a la infiltración de agua proveniente de los deshielos de la Cordillera Blanca, que mantienen en cierta forma humedecida el suelo. Morfológicamente, presenta un perfil poco desarrollado AC. El horizonte superficial Ap presenta matices pardos a pardos oscuros, de textura franco arenosa, de estructura granular, friable y que descansa sobre un horizonte AC pardo oscuro, franco grisáceo oscuro y con abundante grava y piedras en una proporción más de 50%. Es característico de los suelos de este tipo presentar piedras semi-enterrados o enterrados de diámetros mayores a 50 cm. Así mismo, la pedregosidad superficial aumenta notablemente a medida que la pendiente se hace mucho más pronunciada. Estos suelos de bajo contenido de materia orgánica. Dentro de este suelo se distingue tres fases de pendiente: moderadamente empinado (15 – 25%), empinado (25 - 50), y muy empinado (+ 50%).

### **d) Suelo Santa Rosa (Símbolo SR)**

Los suelos tipos de suelo Santa Rosa se sitúan entre los 2900 y

3200 m.s.n.m., estos suelos son de origen coluvial, desarrollados sobre materiales de litología mixta (lutitas, limolitas y cuarcitas) que han sido fuertemente mezclados por los arrastres sucesivos y por la acción de la gravedad. Fisiográficamente, se ubican sobre el flanco occidental de la Cordillera Blanca, sobre el margen izquierdo de la quebrada Vicos. Presentan una topografía muy accidentada, con declives de 15 a más de 50%, ocupando las laderas de montaña fuertemente disectada. Drenaje natural puede ser calificado como algo excesivo de acuerdo tanto a las características físicas del perfil como topográficas.

Morfológicamente son suelos moderadamente profundos con un horizonte Ap pardo gris oscuro y franco, que descansa sobre un horizonte transicional AC franco gravoso y estructurado en bloques subangulares y de matices pardo oscuros. Debajo de este horizonte transicional, aparecen las capas estratificadas del material C de naturaleza franco arcillosa gravosa, masivo con un elevado contenido de elemento grueso, que sobrepasa el 50%. Son suelos un contenido medio de materia orgánica. Dentro del suelo Santa Rosa se determinó tres fases de pendiente: moderadamente empinado (15 – 25%), empinado (25 - 50), y muy empinado (+ 50%).

#### **e) Suelo Huanchac (Símbolo Hc)**

Los tipos de suelos Huanchac están localizados entre los 2900 y los 3300 m.s.n.m., estos suelos se han desarrollado a partir de materiales fluvio glaciares relativamente antiguos constituidos por fragmentos subangulosos de naturaleza cuarcítica. Estos suelos se encuentran ocupando las terrazas altas y fuertemente disectadas, bajo un relieve topográfico muy accidentado. Los declives varían entre 15% y más de 50%, siendo estas últimas las predominantes. El drenaje natural es algo excesivo.

Morfológicamente, son suelos superficiales con un horizonte Ap pardo a pardo oscuro, franco arenoso, seguido de un horizonte transicional de matiz pardo rojizo, franco arcillo arenoso, gravoso sin mayor estructuración, friable y fuertemente ácido. Por debajo de este horizonte transicional, aparecen las capas parentales dentro de una morfología estratificada de matices rojos a rojo oscuros, franco arcillo

gravoso en una proporción mayor a 50%. El contenido de elemento grueso aumenta con la profundidad, presentando una morfología netamente esquelética. Estos suelos tienen un contenido de materia orgánica catalogado como media. Dentro del suelo Huanchac se determinó tres fases de pendiente: moderadamente empinado (15 – 25%), empinado (25 - 50), y muy empinado (+ 50%).

#### **f) Suelo Tingua (Símbolo Ti)**

Los tipos de suelos Tingua están localizados entre los 2400 y los 3000 m.s.n.m., se han formado a partir de materiales coluviales, constituidos predominantemente a base de cuarcitas y con intercalaciones de materiales sedimentarios de naturaleza calcárea. Fisiográficamente, estos suelos se encuentran ocupando las laderas disectadas. El relieve topográfico es muy accidentado con gradientes que varían entre 25 y 50%. El drenaje natural de estos suelos es algo excesivo. Morfológicamente, los suelos de este tipo presentan un horizonte Ap pardo amarillento oscuro, de textura franco de naturaleza calcárea y con concentraciones de elemento grueso que sobrepasan el 40%. Le siguen un horizonte transicional AC de matiz rojo, arcillo gravoso, masivo y de naturaleza calcárea con mayor contenido de material grueso, le sigue un horizonte C de tonos rojos variando a rojo amarillento. Estos suelos tienen concentraciones de materia orgánica entre medio y alto. Dentro del suelo Tingua se determinó dos fases de pendiente: empinado (25 - 50), y muy empinado (+ 50%).

#### **g) Suelo Huaylas (Símbolo Ha)**

Los tipos de suelos Huaylas están localizados entre los 2900 y los 3200 m.s.n.m. Estos suelos se han formado a partir de materiales de origen coluviónico, constituidos principalmente por cuarcitas. La mayor parte de estos suelos se encuentran ocupando las laderas disectadas de la localidad de Huaylas y, en menor proporción, y en forma dispersa, aparecen distribuidos a lo largo de la Cordillera Blanca. El relieve topográfico es muy accidentado, con gradientes dominantes que varían entre 25 y 50%. El drenaje natural es algo excesivo debido tanto a las características topográficas como texturales del perfil. Morfológicamente, son suelos moderadamente profundos que

presentan un horizonte Ap de tonos pardo rojizos, franco, que descansan sobre un B u horizonte transicional arcillo gravoso, estructurado en bloques subangulares y de naturaleza fuertemente ácida. El horizonte C se subdivide en varios estratos de matices rojizos y con alto contenido de material gravo-pedregoso, llegando a sobrepasar la cantidad de 70%. Estos suelos tienen dotaciones de materia orgánica entre media y alta. Dentro del suelo Huaylas se estableció dos fases de pendiente: moderadamente empinado (15 – 25%), y empinado (25 - 50).

#### **h) Suelo Acuca (Símbolo Cu)**

Los tipos de suelos Acuca se sitúan entre los 3200 y los 3600 m.s.n.m., se han formado sobre materiales moderadamente fino de origen aluvio-coluvio local, situado fisiográficamente en terrazas medias y altas. Se caracterizan por presentar una topografía ligeramente inclinada a inclinada, con gradientes de 7 a 15%. Son suelos imperfectamente drenados a pobremente drenados debido a su distribución en áreas de puquiales y con napa freática situada a pocos centímetros de la superficie. Morfológicamente, se caracteriza por presentar un horizonte A pardo gris oscuro, de textura franca, con moteamientos, de naturaleza extremadamente ácida y con un alto contenido de materia orgánica. Le sigue un horizonte B gleizado, pardo grisáceo oscuro, franco arcilloso con moteamiento. A partir de los 100 cm. de profundidad, aparecen los estratos gravo pedrosos que tienen grava en una proporción de 70%. Son suelos de contenido de materia orgánica muy alto.

#### **i) Suelo Shimpi (Símbolo Sh)**

Los suelos Shimpi se localizan entre los 2700 y 3100 m.s.n.m., estos suelos se han derivado de materiales moderadamente finos de origen aluvio-coluvio local y están ubicados en terrazas medias y, en menor proporción, sobre terrazas altas interasociados con los suelos florida, a lo largo del margen izquierdo del río Santa y algunos tributarios que descienden del flanco occidental de la Cordillera Blanca. El relieve topográfico es ligeramente inclinado variando a inclinado, con declives entre 2 y 15%. El sistema de drenaje es moderado a bueno.

Morfológicamente, son suelos profundos, presentando una capa superficial o Ap de color pardo a pardo oscuro, de textura franco granular y friable, que descansa sobre un B pardo a pardo oscuro, franco arcilloso, estructurado en bloques subangulares y con evidencia de película de arcilla. Por debajo de este B argílico, aparecen los horizontes parentales o C de tonos mucho más claros tendientes al pardo amarillento oscuro, texturalmente franco arcilloso y sin mayor estructura definida (masivo). Son suelos de contenido de materia orgánica catalogado como media. Dentro del suelo Shimpi se establecieron dos fases de pendiente: ligeramente inclinado (2 – 7%), e inclinado (7 – 15%).

#### **j) Suelo Pacuyán (Símbolo Pa)**

Los suelos Pacuyán se localizan entre los 2600 y los 3000 m.s.n.m., estos suelos se han derivados de materiales moderadamente finos de origen aluvio-coluvio local y de naturaleza calcárea. Fisiográficamente ocupan terrazas medias y altas, así como colinas bajas moderadamente disectadas. Presentan un relieve topográfico ligeramente inclinado, con declives entre 7 y 15%. Debido a sus características topográficas del terreno, es bueno a algo excesivo.

Morfológicamente, son suelos profundos, y de naturaleza calcárea, que presentan un horizonte superficial pardo a pardo oscuro, franco arcilloso, estructurado en forma granular que yace sobre horizontes medios representados por un B arcilloso, franco arcilloso y de matices rojo amarillento y estructurados en bloques subangulares y con presencia evidente de películas de arcilla. Este descansa sobre un C profundo pardo rojizo, franco arcilloso, masivo y con concreciones de carbonato de calcio. Estos suelos se caracterizan por tener un bajo contenido de materia orgánica.

#### **k) Suelo Marián (Símbolo Mr)**

Los tipos de suelos Marián se localizan entre los 2800 y 3200 m.s.n.m., y se han formado de materiales moderadamente finos de origen fluvio glacial, ocupando terrazas altas y colinas bajas. El relieve topográfico varía entre ligeramente inclinado y moderadamente empinado, con declives entre 2 y 25%. Debido tanto a sus buenas

características topográficas como del perfil edáfico, el drenaje natural de estos suelos es bueno.

Morfológicamente, son suelos profundos con perfiles ABC definidos. El horizonte A, de matices pardos a pardos oscuros, franco arcilloso y estructurado en bloque subangulares finos, es de naturaleza ácida. Descansa sobre un horizonte B arcilloso, pardo rojizo, franco arcilloso y estructurado en bloques subangulares y de naturaleza ácida. Los horizontes inferiores están representados por un material rojo amarillento, franco, masivo y con cierto contenido de material o elemento grueso. Se caracterizan por ser suelos de dotaciones de materia orgánica entre baja y media.

Dentro del suelo Marian se estableció tres fases de pendiente: ligeramente inclinado (2 – 7%), inclinado (7 – 15%), y moderadamente empinado (15 – 25%).

### **Tierras Misceláneas**

Son unidades cartográficas que agrupan formas de tierra que tienen poco o nada de suelo o que, por ser inaccesibles, no es posible clasificarlas. Normalmente son áreas sin potencial para propósitos agrícolas (ONERN, 1973). Las tres clases de tierras misceláneas identificadas son:

- Tierras de Pendiente con Cárcavas (TCv).
- Tierra Montañosa, Escabrosa y Afloramiento de Roca (TMr).
- Acantilado de Terrazas (At).

### **3.2.5. Vegetación**

Desde varios milenios, las tierras han sido sometidas a un uso intensivo tanto agrícola como ganadero. Los procedimientos primitivos y, en especial, el progresivo crecimiento poblacional del área han sido las causas fundamentales de la destrucción del material vegetal original. Hoy en día, de la vegetación original prácticamente sólo quedan algunos vestigios, primando principalmente una vegetación secundaria, mucha de ella exótica (ONERN, 1973).

La vegetación de naturaleza arbustiva y subarbustiva está representado por varias especies, destacándose entre ellas: eucalipto (*Eucalyptus*), retama (*Spartium junceum*), maguey (*Agave americana* L.), molle (*Schinus molle*), capulí (*Prunus capuli*), huarango (*Acacia tortuosa*), aliso (*Alnus jorullensis*), carrizo (*Arundo donax*), tara (*Caesalpinia tinctoria*), sauce (*Salix humboltiana*), y otras especies de la familia cactácea. Entre la cobertura herbácea se identificaron los más comunes como el kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), cardo (*Cercium arvense*), ortiga menor (*Urtica urens*), manzanilla hedionda (*Matricaria chamomilla*), rabaniza (*Raphanus raphanistrum*), mostacilla (*Cinapis arvensis*), tomatillo (*Lycopersicon pimpinellifolium*).

### **3.2.6. Uso de la tierra**

Dentro del área de estudio, los sistemas generales de uso de la tierra corresponden al uno agrícola, donde se desarrolla una agricultura mixta de riego y secano; en el primer caso, las tierras son regadas en forma continua durante todo el año, no así las de secano que se cultivan exclusivamente durante la estación de lluvias, entre los meses de octubre a abril. El sistema secano implica necesariamente una discontinuidad en el uso de la tierra y en consecuencia un período de paralización de las actividades agrícolas. Mediante la forma de riego permanente, es posible obtener dos cosechas al año, dependiendo de los recursos hídricos en la zona (ONERN, 1973).

La distribución de los cultivos en la zona estudiada obedece a los siguientes patrones. Para las tierras situadas por debajo de los 2,900 m.s.n.m., los cultivos más comunes son el maíz, zapallo, lechuga, col y alfalfa, aunque también se conducen cultivos de trigo, cebada, tubérculos, y frutales como el melocotón, palta, lucha, limón. Los cultivos de papa, seguidos de tubérculos menores como la oca, olluco y leguminosas comestibles como la arveja y centeno, se cultivan con frecuencia entre los 2,900 y 3,600 m.s.n.m. aproximadamente. Es a partir de los 3,600 metros de altura, empieza la prevalencia de los pastos naturales sobre los cuales se desarrolla una ganadería extensiva, principalmente de tipo lanar (ovinos).

### **3.3. Métodos y diseño de la investigación**

El objetivo en esta tesis fue determinar los niveles de erosión potencial del suelo en la zona agrícola de la cuenca Chancos, para lo cual se hizo uso la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE), esta ecuación se ha implementado en un SIG, que ha facilitado los cálculos y, lo que es más importante, el análisis espacial de los resultados.

La USLE es un modelo empírico de predicción de la pérdida de suelo anual como consecuencia de la erosión hídrica en las laderas. El modelo se basa en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos desarrollada por Wischmeier y Smith (1978) para predecir las pérdidas edáficas por erosión hídrica a escala regional o de cuenca.

La investigación se realizó con el uso de la metodología USLE (Universal Soil Loss Equation) modificada y desarrollada por Wischmeier y Smith (1978). En el cual se combina las características del suelo con la pendiente y la precipitación para estimar la erosión potencial.

Según Wischmeier y Smith (1978), Renard y Freimund (1994) y CORTOLIMA (2007); la erosión hídrica potencial se estima de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos al utilizar únicamente los factores R, K y LS. la razón es que los factores C y P de la USLE representan las actividades atenuantes del proceso erosivo.

Para el modelamiento cartográfico de los niveles de erosión potencial del suelo se multiplicaron únicamente los factores R, K y LS de la ecuación USLE descrita en el acápite 2.2.2., el análisis y la determinación de cada una de las variables que incluye la metodología se hicieron con el apoyo de las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

#### **3.3.1. Tipo de tesis**

- ✓ Según naturaleza, profundidad y/o alcance: Exploratoria, descriptivo.
- ✓ Según propósito o aplicación: Aplicada tecnológica.

### **3.3.2. Diseño de la investigación**

El diseño consiste en definir las características básicas de cada elemento planteadas para el propósito. Las variables ambientales que intervienen en la erosión potencial del suelo se describe en la Tabla 07., y el esquema metodológico se muestra en la Figura 05.

### **3.3.3. Diseño y caracterización de la muestra**

En cuanto a la información meteorológica, se trabajó con los promedios mensuales y anuales dentro del período de una década; donde las precipitaciones anuales en ésta década sean las máximas en comparación con las de más décadas.

En cuanto al muestreo de suelos, se eligió de acuerdo al número de suelos existentes en el ámbito de estudio realizado por la ONERN (1973), y de ellos las que tengan rango de pendientes representativos.

### **3.3.4. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

- Análisis estadístico de los datos de precipitación (media mensual y anual, regresión lineal, y diagrama de dispersión), para los datos del suelo sólo se hizo un diagrama de dispersión, para ver la influencia de la materia orgánica en la erobabilidad.
- Análisis digital utilizando un modelo DEM para delimitar pendientes.
- Geoprocesamiento con ArcGIS 10 para la obtención de mapas temáticos y generar una base de datos en una tabla de atributos.

### **3.3.5. Operacionalización de variables**

La operacionalización de las variables, corresponden a las de erosión potencial, la misma que se presenta en página siguiente (Tabla 07)

**Tabla 07:** Operacionalización de las variables de la erosión potencial

Variables dependientes	Indicadores	Variables independientes	Instrumento o método de investigación	Unidad de medida
Erosion potencial (A)	Pérdida de suelo por erosión.	R, K y (LS).	Aplicación del modelo USLE, mediante el producto de los factores R, K y (LS).	Tn ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
Factor R	Capacidad potencial de la lluvia para generar erosión.	Precipitación (energía cinética y la intensidad de la lluvia).	Fórmula de Fournier (IMF), spline (herramienta de análisis geo-espacial en Arcgis).	MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
Factor K	Susceptibilidad del suelo a ser erosionado.	Textura (arena, limo y arcilla)	Muestreo y análisis de suelos.	Tn ha h ha <sup>-1</sup> JM <sup>-1</sup>
		Materia orgánica	Muestreo y análisis de suelos.	mm <sup>-1</sup>
Factor K	Susceptibilidad del suelo a ser erosionado.	Estructura	Estructura	Valor
			Permeabilidad	Clases de permeabilidad
Factor (LS)	Incidencia de la topografía sobre la pérdida del suelo.	Lonitud del terreno (L)	DEM (Modelo digital de elevación), fórmula propuesta por Desmet y Govers (1996), raster calculator de Arcgis.	En el modelo USLE no se considera las unidades.
		Grado de la pendiente (S)	DEM (Modelo digital de elevación), fórmula propuesta por McCool et al. (1989), raster calculator de Arcgis	

Los requerimientos del modelo USLE para caracterizar cada uno de los factores que la componen, se describe a continuación (Figura 05).



**Figura 05:** Esquema metodológico para obtener el modelo cartográfico de la erosión potencial.

### 3.3.6. Cálculo de los factores de la erosión potencial según el modelo USLE

Previo a la determinación de los factores ambientales que conforman el modelo USLE, se delimito el área de estudio, que corresponde a la zona agrícola de la cuenca Chancos. Para tal propósito, primero se corrigió el Modelo de Elevación Digital con el uso de la función Fill Sinks de la herramienta ArcHydro de ArcGis, y luego se procedió a delimitar el área de estudio con la misma herramienta con la se corrigió el DEM, teniendo en cuenta la dirección y la acumulación del flujo.

#### 3.3.6.1. Estimación de la erosividad de la lluvia (Factor R)

Para el cálculo del factor R se utilizó la ecuación del índice modificado de Fournier, descrito en el acápite 2.2.2.1. Para tal propósito se identificaron las estaciones pluviométricas dentro y cercanas al área de estudio que corresponde a la zona agrícola de la cuenca Chancos, tal como se aprecia en la Tabla 08.

**Tabla 08:** Descripción de las estaciones pluviométricas seleccionadas.

ESTACIONES		ALTITUD (m.s.n.m.)	COORDENADAS UTM	
SENAMHI	NOMBRE		ESTE	NORTE
P1701	YUNGAY	2557	193730.93	8987140.83
P1707	ANTA	2748	214410.14	8965399.15
P1724	CHANCOS	2895	217133.3	8968800.78
P1710	HUARAZ	3050	224018.74	8949668.07
P1726	LLANGANUCO	3918	208538.94	8995392.13

Los datos de las precipitaciones mensuales de un período de 10 años se muestran en las Tablas 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8.

**Tabla 09:** Precipitaciones mensuales de la estación Yungay.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1959	3.0	0.0	37.4	101.0	14.8	0.0	0.0	0.0	0.0	23.8	53.9	73.1
1960	51.1	132.7	89.1	82.7	10.7	0.0	0.0	0.0	1.2	7.7	15.4	13.1
1961	71.9	5.9	121.2	82.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	34.0	8.9
1962	23.8	0.0	98.3	16.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	24.4	1.2
1963	21.4	45.1	180.0	71.9	29.1	0.0	0.0	0.0	0.0	12.5	19.0	59.4
1964	8.9	36.2	54.6	108.7	0.0	0.0	0.0	7.7	0.0	10.1	3.6	9.5
1965	17.2	20.2	115.2	19.6	4.8	0.0	0.0	0.0	10.7	0.0	6.5	35.4
1966	60.6	17.2	20.2	11.9	0.0	0.0	0.0	0.0	4.8	28.5	1.8	24.4
1967	38.0	108.7	154.4	1.2	5.4	0.0	7.7	0.0	0.0	58.8	1.8	1.2
1968	21.4	10.1	25.5	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4	5.4	13.1	36.1	16.0

Fuente: SENAMHI (2011)

**Tabla 10:** Precipitaciones mensuales de la estación LLanganuco.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1959	38.0	150.0	211.1	226.6	30.0	0.0	0.0	1.8	1.8	79.3	45.3	164.4
1960	61.1	130.4	50.0	66.2	3.6	0.0	0.0	44.0	16.8	37.4	63.8	60.8
1961	190.6	73.7	172.2	85.3	14.3	9.5	1.9	4.8	32.6	31.1	134.8	114.4
1962	162.0	177.6	231.4	36.4	9.6	0.6	0.0	0.0	37.4	30.0	34.0	69.5
1963	118.5	101.4	236.1	80.6	10.8	0.0	0.0	1.2	20.8	44.0	128.1	119.1
1964	30.6	57.7	126.3	112.6	39.8	0.6	19.0	0.0	0.0	12.5	8.3	42.0
1965	79.3	71.0	46.2	94.2	41.5	0.0	0.0	0.0	69.9	183.4	73.7	71.1
1966	94.2	220.3	73.6	86.1	13.1	0.0	8.1	4.7	39.6	56.8	12.4	24.3
1967	94.2	220.3	73.6	86.1	13.1	0.0	8.1	4.7	39.6	56.8	12.4	24.3
1968	106.6	72.9	90.6	24.9	7.3	0.0	0.0	14.2	12.4	86.5	36.1	85.3

Fuente: SENAMHI (2011)

**Tabla 11:** Precipitaciones mensuales de la estación Huaraz.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1959	10.7	166.2	142.5	38.0	75.4	0.0	0.0	0.0	0.0	90.2	11.9	133.0
1960	64.0	95.0	71.3	129.5	8.9	0.0	0.0	5.9	8.9	14.8	62.4	50.5
1961	128.8	60.6	63.5	116.3	19.6	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0	96.8	107.5
1962	121.2	82.6	191.9	47.5	3.0	0.0	0.0	0.0	39.2	32.1	50.5	34.4
1963	84.2	103.4	169.4	126.6	2.4	0.0	0.0	0.0	23.7	38.8	104.6	140.1
1964	42.1	52.8	135.4	52.3	38.6	0.0	1.2	3.6	5.4	23.2	34.5	10.1
1965	54.1	51.0	26.2	11.9	17.9	0.0	0.0	0.0	22.6	53.6	19.0	54.6
1966	154.4	32.2	57.7	25.0	7.8	0.0	0.0	0.0	9.6	87.7	52.4	41.6
1967	90.3	139.7	174.6	29.7	0.0	0.0	10.6	3.6	21.1	121.8	25.0	31.6
1968	73.1	29.7	65.5	5.9	5.4	0.0	0.0	11.9	3.6	58.8	23.8	30.3

Fuente: SENAMHI (2011)

**Tabla 12:** Precipitaciones mensuales de la estación Chancos.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1959	43.7	107.0	46.2	161.0	76.5	3.6	0.0	0.0	0.0	40.1	74.0	85.0
1960	79.0	164.0	115.4	94.2	24.3	0.0	0.0	0.0	4.9	14.6	19.4	21.3
1961	17.6	19.4	158.0	151.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.1	121.5
1962	94.2	189.6	60.3	22.5	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	8.5	46.2	10.3
1963	105.1	91.7	175.3	107.5	22.5	0.0	0.0	0.0	0.0	27.9	77.7	106.3
1964	47.4	97.2	72.9	96.0	34.1	0.0	0.0	9.1	0.0	17.0	6.7	3.0
1965	40.7	40.1	120.3	57.7	37.1	0.0	0.0	0.0	49.2	26.1	49.3	49.2
1966	91.7	35.0	93.0	18.2	0.0	0.0	0.0	0.0	7.9	63.8	40.7	66.8
1967	41.3	151.9	208.9	17.0	12.8	0.0	5.5	0.0	0.0	99.0	1.8	3.0
1968	69.3	11.6	83.2	3.0	0.0	0.0	0.0	9.7	7.9	60.7	7.9	41.3

Fuente: SENAMHI (2011)

**Tabla 13:** Precipitaciones mensuales de la estación Anta.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1972	136.0	195.0	250.0	78.0	0.0	0.0	0.0	4.0	16.0	17.0	38.0	74.0
1973	112.0	73.0	133.7	90.0	18.0	1.0	4.0	2.0	64.0	54.0	87.0	177.0
1974	155.2	209.0	141.0	11.0	1.0	37.0	0.0	0.0	26.0	54.2	39.9	44.0
1975	123.0	165.0	225.0	63.0	142.2	3.0	0.0	19.0	49.6	96.0	143.0	37.0
1976	149.0	91.0	93.0	75.0	12.0	12.0	0.0	5.0	8.0	20.2	13.9	48.2
1977	85.3	168.5	93.4	25.6	25.5	0.0	0.0	0.0	48.0	30.6	121.0	59.0
1972	136.0	195.0	250.0	78.0	0.0	0.0	0.0	4.0	16.0	17.0	38.0	74.0
1978	58.2	184.6	46.8	29.6	37.3	0.0	2.0	0.0	49.0	41.0	44.0	48.0
1979	67.0	130.0	179.0	57.0	11.0	0.0	0.0	15.0	43.0	0.0	36.0	33.0
1980	64.0	55.0	64.0	32.0	7.0	3.0	0.0	0.0	0.0	140.0	113.0	100.0

Fuente: SENAMHI (2011)

Con los valores mensuales de precipitación se calcularon los promedios mensuales y anuales, tal como se puede apreciar en la Tabla 14.

**Tabla 14:** Precipitaciones medias mensuales y anuales.

ESTACIONES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Yungay	31.7	47	89.6	55	6.9	0	0.77	1.31	2.21	15.8	19.7	24.2	<b>279.3</b>
Llanganuco	110	116	133	79.6	23.8	2.91	1.14	4.27	16.9	44.5	56.5	74.3	<b>663.8</b>
Chancos	84.9	93.8	125	74.6	17.6	1.77	0.29	1.93	9.21	35.9	47	57.5	<b>549.9</b>
Anta	99.7	129	127	69.2	23.6	3.89	0.25	3.5	25.2	59.5	68.1	79.1	<b>609.2</b>
Huaraz	16.8	20.3	20.7	7.95	0.7	0.02	0	0.03	0.82	5.19	4.54	10	<b>657.1</b>

Con los valores de precipitación media mensual y anual de la Tabla 14, y aplicando la ecuación del índice modificado de Fournier, se calculó el factor R mensual y anual. Tal como se puede apreciar en la Tabla 15.

**Tabla 1:** Valores mensuales y anuales de la erosividad (Factor R).

ESTACIONES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Yungay	3.6	7.91	28.7	10.8	0.17	0	0	0.01	0.02	0.89	1.38	2.1	<b>56</b>
Llanganuco	18.4	20.3	26.8	9.55	0.85	0.01	0	0.03	0.43	2.98	4.8	8.31	<b>93</b>
Chancos	13.1	16	28.6	10.1	0.56	0.01	0	0.01	0.15	2.34	4.02	6.02	<b>81</b>
Anta	16.3	27.4	26.5	7.86	0.92	0.02	0	0.02	1.05	5.81	7.62	10.3	<b>104</b>
Huaraz	16.8	20.3	20.7	7.95	0.7	0.02	0	0.03	0.82	5.19	4.54	10	<b>87</b>

Se genera una estación pluviométrica virtual con coordenadas UTM asignadas de tal manera que cuando se realice la interpolación cubra toda el área de estudio. Para tal propósito se hizo una correlación lineal con los valores de la erosividad y sus respectivas alturas de las estaciones Yungay, Chancos, y Huaraz.

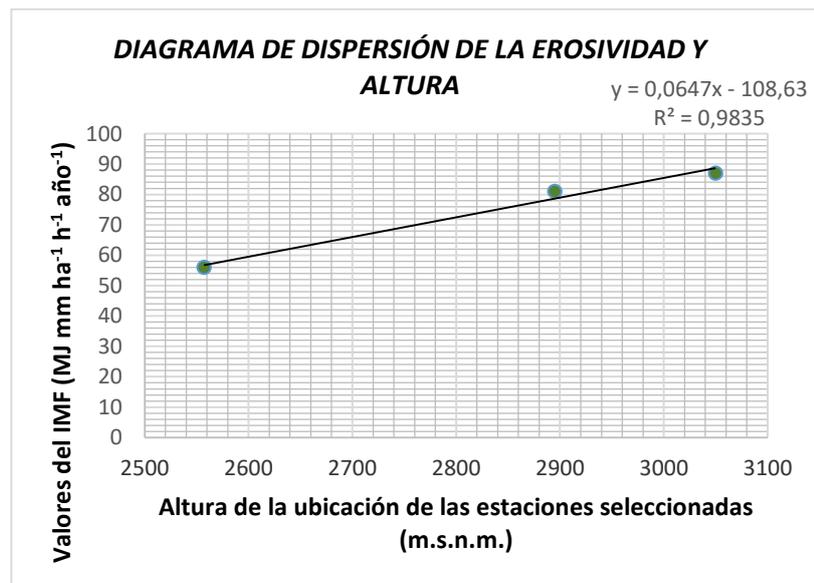
Los valores de altitud y los valores de erosividad utilizados para hacer la correlación lineal, se aprecia en la Tabla 16, y el diagrama de dispersión se puede ver en la Figura 06.

**Tabla 2:** Valores de las estaciones seleccionadas para la correlación lineal.

ESTACIONES	ALTIDUD (m.s.n.m.)	EROSIVIDAD (R) (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
Yungay	2557	56
Chancos	2895	81
Huaraz	3050	87

Una vez y determinada la ecuación de la recta de regresión, y con la ayuda de Microsoft Excel se calculó la erosividad para la estación virtual teniendo como variable independiente la altura que es para el caso 3972 m.s.n.m., y como variable dependiente la erosividad. La ecuación de la recta de regresión es la siguiente:

$$y = 0.0647x - 108.63$$



**Figura 06:** Diagrama de dispersión de los valores de la erosividad y la altura.

Para una altura de 3972 m.s.n.m., la erosividad es 148 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, como se puede apreciar en la Tabla 17.

Por último, con los valores de erosividad de la Tabla 17, y con la ayuda de un SIG (ArcGis), se georreferenció el emplazamiento de las estaciones y se interpoló los valores anuales de la erosividad para conocer su distribución global en toda la zona de estudio. Mediante este proceso se pudo obtener

el mapa de la erosividad de la lluvia (factor R), tal como se puede apreciar en el Anexo 2 (Mapa N° 01).

**Tabla 17:** Valores anuales de erosividad (factor R) para su para su respectiva interpolación.

ID	ESTACIONES	ALTITUD (m.s.n.m.)	COORDENADAS UTM		EROSIVIDAD (R) (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
			ESTE	NORTE	
1	YUNGAY	2557	193730.93	8987140.83	56
2	LLANGANUCO	3918	208538.94	8995392.13	93
3	CHANCOS	2895	217133.3	8968800.78	81
4	ANTA	2748	214410.14	8965399.15	104
5	HUARAZ	3050	224018.74	8949668.07	87
6	VIRTUAL	3972	224782.98	8966957.67	148

### 3.3.6.2. Estimación de la erodabilidad del suelo (Factor K)

Para el cálculo del factor K se ha utilizado la fórmula algebraica de Wischmeier y Smith (1978), descrita en el acápite 2.2.2.2.

Los datos de la textura y materia orgánica del suelo, se obtuvieron mediante análisis de laboratorio a partir de 22 muestras de suelo, las muestras se enviaron al laboratorio de suelo de la UNASAM para su respectivo análisis; los valores del grado de estructura y la permeabilidad del suelo se determinaron con la ayuda de las Tablas 2.3 y 2.4 (descritas en el capítulo 2) en base a la textura de los suelos.

Para estimar el factor K, en primer lugar, se identificaron los tipos de suelos presente en área de estudio, para lo cual se georreferenció y digitalizo con la ayuda de un SIG (ArcGis) el mapa de suelos realizado por la ONERN (1973), luego se realizó la superposición del mapa de suelos digitalizado con el área de estudio delimitado, quedando identificado de esta manera los tipos de suelos identificados dentro del área de estudio, tal como se puede observar en el Anexo 2 (Mapa N° 02).

Una vez identificado los tipos de suelos dentro del área de estudio, se procedió a la toma de 22 muestras de suelo distribuidas dentro del área de estudio.

Para la selección del sitio de muestreo se tuvieron en cuenta el tipo del suelo, ubicación de la unidad cartográfica del suelo en un área representativa, y la pendiente representativa del suelo (fases del suelo). En cada sitio identificado se tomó una muestra de 2.5 Kg de los primeros 25 cm de profundidad del suelo.

Las muestras de suelo traídas de la zona de estudio se enviaron al laboratorio de la Facultad de Ciencias Agraria de la UNASAM para su respectivo análisis, cada muestra etiquetadas como C1, C2, hasta C22, que indican la muestra correspondiente al número de la calicata, con sus respectivas coordenadas UTM e indicando localidad que las que fueron tomadas.

La distribución de las calicatas para el muestreo de suelos dentro de la zona de estudio con sus respectivas coordenadas UTM, se puede apreciar en la Tabla 18.

**Tabla 3:** Distribución de calicatas para muestreo de suelos, por tipos, y fases de pendientes.

Coordenadas UTM		Calicata	Suelo		
Este	Norte		Nombre del suelo	Fases del suelo por pendiente	Símbolo
213536.174	8968094.208	C1	Aluvión	Inclinado (7 a 15%)	Al-2
218832.085	8972050.266	C2	Acuca	Inclinado (7a 15%)	Cu-2
217530.332	8971123.164	C3	Huaylas	Moderadamente empinado (15 a 25%)	Ha-3
217600.182	8970380.212	C4	Huaylas	Empinado (25 a 50%)	Ha-4
221968.991	8963547.599	C5	Huanchac	Moderadamente empinado (15 a 25%)	Hc-3
219016.235	8965986.004	C6	Huanchac	Empinado (25 a 50%)	Hc-4
221060.939	8964042.900	C7	Huanchac	Muy empinado (más de 50%)	Hc-5
218622.534	8969376.910	C8	Huaraz	Inclinado (7 a 15%)	Hr-2
218427.853	8971642.912	C9	Marian	ligeramente inclinado (2 a 7%)	Mr-1
217961.127	8971376.212	C10	Marian	Inclinado (7a 15%)	Mr-2
217138.801	8970591.985	C11	Marian	Moderadamente empinado (15 a 25%)	Mr-3
214544.821	8968280.581	C12	Pacuyán	Inclinado (7a 15%)	Pa-2
214701.454	8968576.915	C13	Shimpi	ligeramente inclinado (2 a 7%)	Sh-1
213465.318	8968348.314	C14	Shimpi	Inclinado (7a 15%)	Sh-2
218896.696	8968148.924	C15	Santa Rosa	Moderadamente empinado (15 a 25%)	SR-3
218253.228	8968060.024	C16	Santa Rosa	Empinado (25 a 50%)	SR-4
219091.430	8967454.656	C17	Santa Rosa	Muy empinado (más de 50%)	SR-5
217254.159	8969571.327	C18	Tingua	Empinado (25 a 50%)	Ti-4
216310.124	8968716.192	C19	Tingua	Muy empinado (más de 50%)	Ti-5
220247.132	8968208.191	C20	Vicos	Moderadamente empinado (15 a 25%)	Vi-3
218922.096	8968932.092	C21	Vicos	Empinado (25 a 50%)	Vi-4
220323.332	8964779.184	C22	Vicos	Muy empinado (más de 50%)	Vi-5

Con los resultados del análisis físico de suelos (Anexo 1), y los valores de estructura y permeabilidad derivados de la clase textural del suelo, se calculó el factor K para cada tipo de suelo.

En la Tabla 19 se puede apreciar las variables requeridos para el cálculo del factor K ( $Tn \text{ ha h ha}^{-1} \text{ JM}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ) y su respectivo valor del mismo, para cada tipo de suelos. Los valores de la estructura y de la permeabilidad, se obtuvieron con la ayuda de la Tabla 20

**Tabla 19:** Factor de erodabilidad del suelo por cada tipo y fases del suelo correspondiente al área de estudio.

Suelo	Símbolo	% Arena	% Limo	% Arcilla	% Materia Orgánica	Textura	b <sup>1</sup>	c <sup>2</sup>	Factor K
Aluvión	Al-2	66	24	10	0.96	Franco arenoso	3	2	<b>0.088</b>
Acuca	Cu-2	46	42	12	9.44	Franco	3	3	<b>0.023</b>
Huaylas	Ha-3	32	40	28	2.55	Franco	3	3	<b>0.049</b>
	Ha-4	38	38	24	4.55	Franco	3	3	<b>0.044</b>
Huanchac	Hc-3	48	40	12	4.2	Franco	3	3	<b>0.063</b>
	Hc-4	52	36	12	2.55	Franco	3	3	<b>0.075</b>
	Hc-5	58	28	14	2.83	Franco arenoso	3	2	<b>0.066</b>
Huaraz	Hr-2	70	26	4	2.41	Franco arenoso	3	2	<b>0.089</b>
Marian	Mr-1	40	33	27	1.79	Franco arcilloso	2	4	<b>0.053</b>
	Mr-2	44	26	30	1.45	Franco arcilloso	2	4	<b>0.05</b>
	Mr-3	44	40	16	2.14	Franco	3	3	<b>0.071</b>
Pacuyán	Pa-2	30	36	34	2.48	Franco arcilloso	2	4	<b>0.04</b>
Shimpi	Sh-1	42	40	18	2.83	Franco	3	3	<b>0.063</b>
	Sh-2	58	34	8	1.72	Franco arenoso	3	2	<b>0.086</b>
Santa Rosa	SR-3	52	36	12	3.1	Franco	3	3	<b>0.071</b>
	SR-4	30	34	36	2.34	Franco arcilloso	2	4	<b>0.038</b>
	SR-5	40	40	20	2.55	Franco	3	3	<b>0.061</b>
Tingua	Ti-4	34	32	34	3.17	Franco	3	3	<b>0.039</b>
	Ti-5	28	44	28	5.8	Franco arcilloso	2	4	<b>0.033</b>
Vicos	Vi-3	60	34	6	3.24	Franco arenoso	3	2	<b>0.077</b>
	Vi-4	70	26	4	1.65	Franco arenoso	3	2	<b>0.096</b>
	Vi-5	65	30	5	2.45	Franco arenoso	3	2	<b>0.086</b>

**Nota:** En la columna símbolo los números indican la fase de pendiente del suelo, así el símbolo Al-2 se interpreta como: Al = suelo Aluvión, 2 = fase del suelo inclinado con pendientes de 7 a 15%. 1 (ligeramente inclinado, 2-7%), 2 (inclinado, 7-15%), 3 (moderadamente empinado, 15-25%), 4 (Empinado, 25-50%), y 5 (muy empinado, +50%).

<sup>1</sup>estructura del suelo

<sup>2</sup>permeabilidad del suelo

**Tabla 20:** Características físicas de los suelos del área de estudio de acuerdo a Wischmeier y Smith (1978), y USDA (1983).

TEXTURA	ESTRUCTURA (b)	VALOR	PERMEABILIDAD (c)	VALOR
Franco arcilloso	Fina	2	Lenta a moderada	4
Franco	Media-gruesa	3	Moderada	3
Franco arenoso	Media-gruesa	3	Moderada a rápida	2

Los valores del factor K, con la ayuda de un SIG (ArcGis) se asignaron a cada parcela según el tipo de suelo, para luego convertirlo en un raster, y así conocer la susceptibilidad del suelo a la erosión en toda el área de estudio, que al final queda reflejado en un mapa de erodabilidad del suelo (Factor K), tal como se puede apreciar en el Anexo 2 (Mapa N° 3).

### 3.3.6.3. Estimación del factor topográfico (Factor LS)

El factor combinado LS de USLE es el efecto de la topografía en la erosión hídrica, y se refiere a la longitud (L) de la ladera y a la pendiente (S). Y se calculan por separado para cada uno y al final se multiplican ambos subfactores, la obtención del factor L y S, y su respectiva multiplicación se realizó con la ayuda de un SIG (ArcGis).

A partir del DEM (Digital Elevation Model) con una resolución de 12.5mx12.5m, se calculó la pendiente en grados, y también se generó un grid de dirección de flujo.

Para obtener el subfactor L, primero se calcularon los valores de F y m de las fórmulas propuesta por Renard *et al.* (1997).

$$m = \frac{F}{1 + F}$$

$$F = \frac{\sin \beta / 0.0896}{3(\sin \beta)^{0.8} + 0.56}$$

Calculado el valor de m en formato raster, se procedió al cálculo del subfactor L con la fórmula propuesta por Desmet y Govers (1996).

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{X^m * D^{m+2} * (22.13)^m}$$

Donde, el término  $(A_{(i,j)} + D^2)$ , representa el valor de la salida de la celda, es decir, al cual se le suma el área de la propia celda.  $A_{(i,j)}$  es el área de contribución aguas arriba en la entrada de una celda raster con coordenadas  $(i,j)$ . D es el tamaño de la celda en metros, y X es el factor de corrección de forma, que para sistemas pixelados, X es igual a uno.

Los cálculos del subfactor L, se hicieron con la herramienta “raster calculator” del ArcGis.

Para el cálculo del subfactor S, se utilizó la ecuación propuesta por McCool et al. (1989).

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8 \sin \beta_{(i,j)} + 0.03 & \tan \beta_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8 \sin \beta_{(i,j)} - 0.5 & \tan \beta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{cases}$$

Para el uso de ésta fórmula, se utilizó la condicionante “con” para su cálculo en ArcGis. Finalmente se calculó el factor topográfico LS multiplicando los subfactores L y S con la herramienta “raster calculator” del ArcGis. Mediante éste procedimiento se obtuvo el mapa del factor topográfico (LS), tal como se puede apreciar en el Anexo (Mapa N° 04).

#### 3.3.6.4. Estimación de los niveles de erosión potencial

Se estimó la erosión potencial del suelo utilizando la metodología USLE propuesta por Wischmeier y Smith (1978).

$$A=R*K*LS$$

Según la formulación de ésta ecuación, el producto de los tres factores descritas en la ecuación: erosividad de la lluvia (factor R), erodabilidad del suelo (factor K), y el factor topográfico

LS; ofrece como resultado la erosión potencial (A) ( $Tn h^{-1} año^{-1}$ ). El análisis multiplicativo se realizó con la ayuda de la herramienta "raster calculator" del ArcGis.

Con los tres factores (R, K, y RS) en el formato raster, se procedió a multiplicarlos usando la herramienta raster calculator, luego el resultado obtenido (A) se clasificó con la herramienta reclassify de la extensión Spatial Analysis de ArcGis.

La clasificación se realizó en rangos según FAO (1980), teniendo como resultado el mapa de erosión potencial del suelo, Tal como se puede apreciar en el Anexo 2 (Mapa N° 05).

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 4.1. Erosividad de la lluvia (Factor R)

Los resultados muestran el marcado carácter estacional de las precipitaciones y por ende de los valores de la erosividad (Factor R), tal como se puede apreciar en la Figura 07. Los datos de precipitación analizados de la estación Chancos, que se encuentra dentro de la zona de estudio, muestran que en el mes de marzo registran los valores máximos de erosividad, ya que es el mes más húmedo del intervalo estudiado, siendo el promedio de erosividad en este punto de  $28.6 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Por otra parte, los índices de erosividad más bajos corresponden a los meses entre mayo y septiembre.

Los valores de erosividad varían de manera significativa en toda el área de estudio (zona agrícola de la cuenca Chancos), tal como se puede apreciar en el Anexo 2 (Mapa N° 01). Los valores más altos corresponden a las partes altas, ubicados en la parte Este del área de estudio, y descienden hacia el Oeste, correspondiendo los valores más bajos a las zonas más bajas ubicados en el Distrito de Marcará.

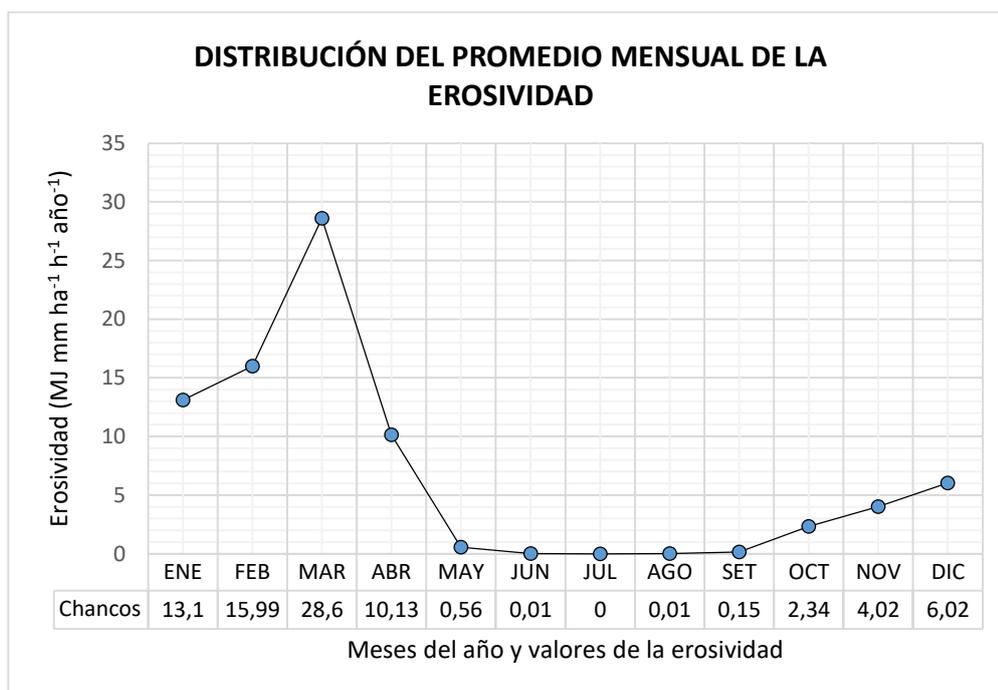
De acuerdo a la clasificación de rangos de erosividad establecida por CORINE (1992), se considera que la erosividad es muy baja cuando su valor es inferior a  $60 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . En este rango, en el área de estudio no se tiene valores de IMF. En el rango categorizado como bajo entre  $60$  y  $90 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , se tiene un 41.09% del área de estudio. Los valores moderados entre  $90$  y  $120 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$  representan el 38.98% del área de estudio, ubicado en la parte central de la zona agrícola de la cuenca Chancos. Los valores altos de

IMF entre 120 y 141 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> representan el 19.93% del área estudiada, tal como se puede apreciar en la Tabla 21.

En el área de estudio, no se tiene valores de IMF menores de 60 y tampoco mayores a 160 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, tal como se puede ver en la Tabla 21, esto quiere decir que en la zona no se presentan lluvias con muy baja y tampoco lluvias con muy alto poder erosivo.

**Tabla 21:** Clasificación de los valores de erosividad de área de estudio (factor R) de acuerdo a CORINE 1992.

Clase	Erosividad (MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Rango	Área (ha)	Área (%)
2	60 - 90	Baja	2,063.19	41.09
3	90 - 120	Moderada	1,957.31	38.98
4	120 - 141	Alta	1,001.22	19.93



**Figura 07:** Distribución mensual de la erosividad (factor R), basados en los datos pluviométricos de la estación Chanco ubicada dentro del área de estudio.

#### 4.2. Erodabilidad de los suelos (Factor K)

El factor K para todos los tipos de suelos dentro del área de estudio, aparecen reflejados en la Tabla 22, y la distribución espacial de estos valores se puede apreciar en el Anexo 2 (Mapa N° 03).

**Tabla 21:** Erodabilidad en los suelos de la zona agrícola de la cuenca Chancos.

Suelo	Fase del suelo	Símbolo	% MO	Textura	Factor K
Aluvión	Inclinado (7 a 15%)	Al-2	0.96	Franco arenoso	<b>0.088</b>
Acuca	Inclinado (7a 15%)	Cu-2	9.44	Franco	<b>0.023</b>
Huaylas	Moderadamente empinado (15 a 25%)	Ha-3	2.55	Franco	<b>0.049</b>
Huaylas	Empinado (25 a 50%)	Ha-4	4.55	Franco	<b>0.044</b>
Huanchac	Moderadamente empinado (15 a 25%)	Hc-3	4.2	Franco	<b>0.063</b>
Huanchac	Empinado (25 a 50%)	Hc-4	2.55	Franco	<b>0.075</b>
Huanchac	Muy empinado (más de 50%)	Hc-5	2.83	Franco arenoso	<b>0.066</b>
Huaraz	Inclinado (7 a 15%)	Hr-2	2.41	Franco arenoso	<b>0.089</b>
Marian	ligeramente inclinado (2 a 7%)	Mr-1	1.79	Franco arcilloso	<b>0.053</b>
Marian	Inclinado (7a 15%)	Mr-2	1.45	Franco arcilloso	<b>0.05</b>
Marian	Moderadamente empinado (15 a 25%)	Mr-3	2.14	Franco	<b>0.071</b>
Pacuyán	Inclinado (7a 15%)	Pa-2	2.48	Franco arcilloso	<b>0.04</b>
Shimpi	ligeramente inclinado (2 a 7%)	Sh-1	2.83	Franco	<b>0.063</b>
Shimpi	Inclinado (7a 15%)	Sh-2	1.72	Franco arenoso	<b>0.086</b>
Santa Rosa	Moderadamente empinado (15 a 25%)	SR-3	3.1	Franco	<b>0.071</b>
Santa Rosa	Empinado (25 a 50%)	SR-4	2.34	Franco arcilloso	<b>0.038</b>
Santa Rosa	Muy empinado (más de 50%)	SR-5	2.55	Franco	<b>0.061</b>
Tingua	Empinado (25 a 50%)	Ti-4	3.17	Franco	<b>0.039</b>
Tingua	Muy empinado (más de 50%)	Ti-5	5.8	Franco arcilloso	<b>0.033</b>
Vicos	Moderadamente empinado (15 a 25%)	Vi-3	3.24	Franco arenoso	<b>0.077</b>
Vicos	Empinado (25 a 50%)	Vi-4	1.65	Franco arenoso	<b>0.096</b>
Vicos	Muy empinado (más de 50%)	Vi-5	2.45	Franco arenoso	<b>0.086</b>

La tasa de erodabilidad más alta se ha obtenido en el tipo de suelo Vicos en su fase empinado con pendientes entre 25 y 50%, con un valor de  $0.096 \text{ Tn ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  ubicados en las partes altas del Centro Poblado de Vicos del Distrito de Marcará; también los tipos de suelos Huaraz, Aluvión y Shimpi, tienen valores de K elevados siendo 0.089, 0.088 y 0.086  $\text{Tn ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  sus valores respectivos. Y las tasas más bajas se obtuvieron en suelos Acuca y Tingua con valores de K de 0.023 y 0.033  $\text{Tn ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  respectivamente.

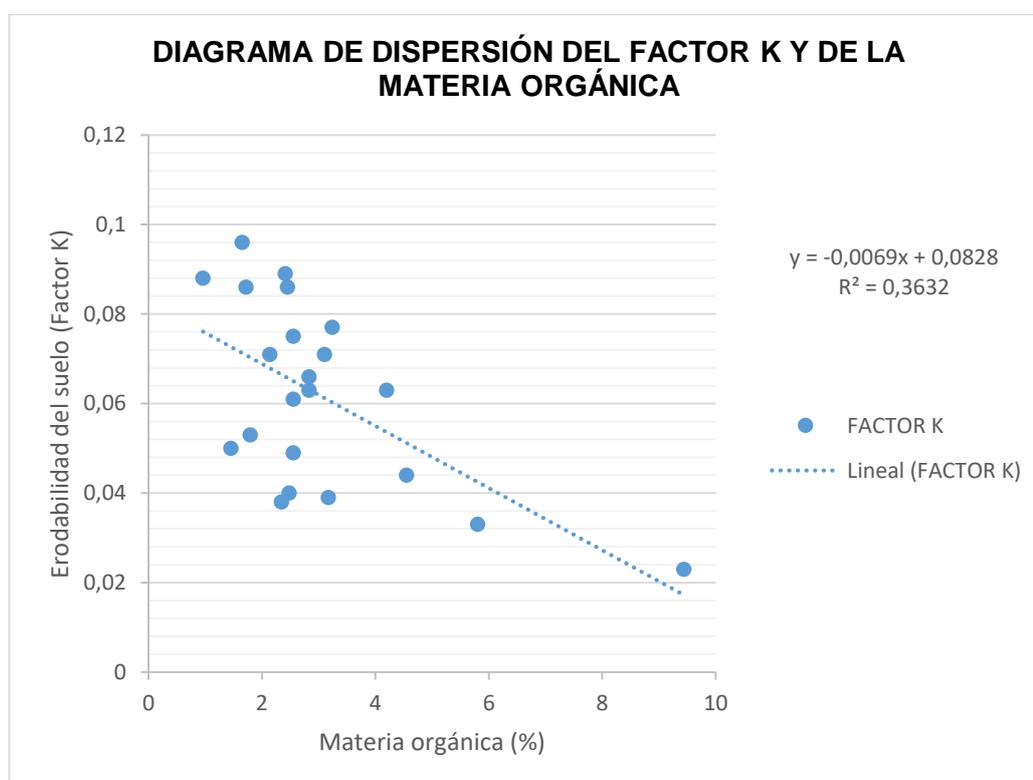
Los valores de erodabilidad obtenidos para los suelos dentro del área de estudio oscilan entre 0.023 y 0.096  $\text{Tn ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  calificándose, según Renard et al. (1997) como bajos en todos los suelos evaluados, lo cual indica que son suelos altamente resistentes a la erosión. Éstos autores consideran que un suelo es altamente susceptible a la erosión cuando el factor K es mayor a 0.4  $\text{Tn ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ , y moderada cuando el valor de K oscila entre 0.25 y 0.4  $\text{Tn ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ , y bajo cuando oscila entre 0.05 y 0.2  $\text{Tn ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ .

En toda la superficie de la zona agrícola de la cuenca Chancos, se identificaron tres tipos de clases texturales del suelo con sus erodabilidades promedias que se describen en la tabla 23.

**Tabla 22:** Erodabilidad (K) de las tres clases texturales del suelo.

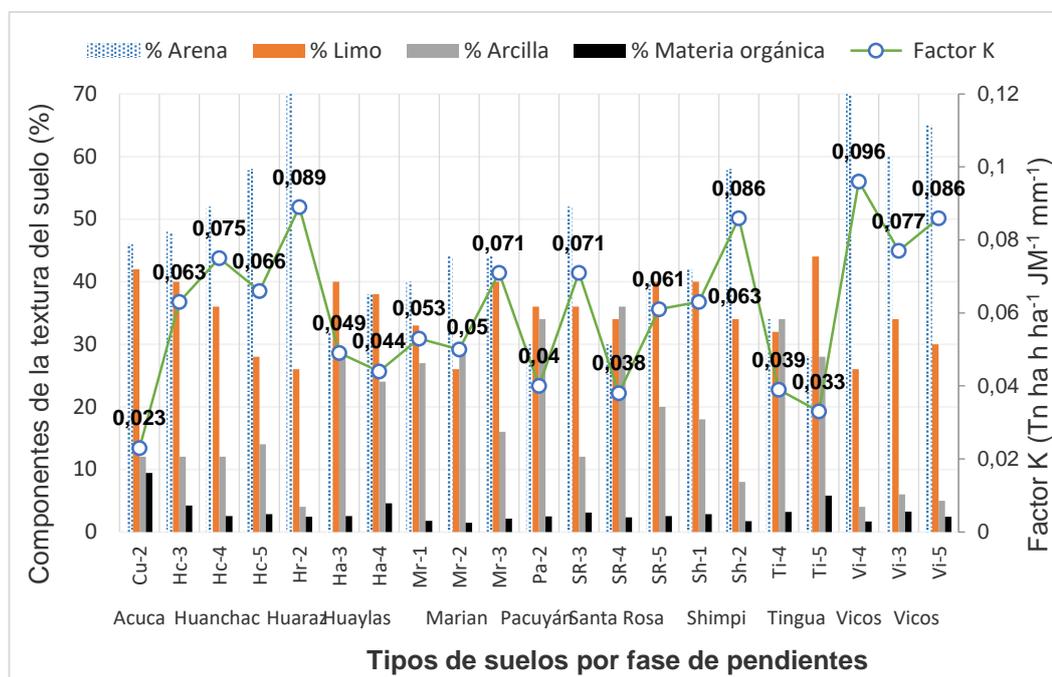
Tipo de suelos	Textura	MO (%)	K (Tn ha h ha <sup>-1</sup> JM <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> )
Marian, Pacuyán, Santa Rosa y Tingua	Franco arcilloso	2.8	0.043
Acuca, Huaylas, Huanchac, Shimpi.	Franco	3.71	0.056
Aluvion, Huaraz y Vicos	Franco arenoso	2.18	0.084

Los suelos con mayor contenido de materia orgánica presentan tasas de erodabilidad bajas, situándose en los valores más bajos del factor K en la zona de estudio, reflejando el efecto de la materia orgánica en la estabilidad de los agregados del suelo. El diagrama de dispersión (Figura 08), elaborado con los datos de la Tabla 22, muestra claramente la relación que existe la materia orgánica con el factor K.



**Figura 08:** Diagrama de dispersión que muestra el grado de relación entre la erodabilidad del suelo y la materia orgánica.

Los resultados muestran que los suelos con mayor contenido de arena y limo, y un bajo contenido de la materia orgánica, son suelos más erodables, tal como se puede apreciar en la Figura 09.



**Figura 09:** Relación entre los componentes de la textura del suelo, materia orgánica y el Factor K.

### 4.3. Factor topográfico (Factor LS)

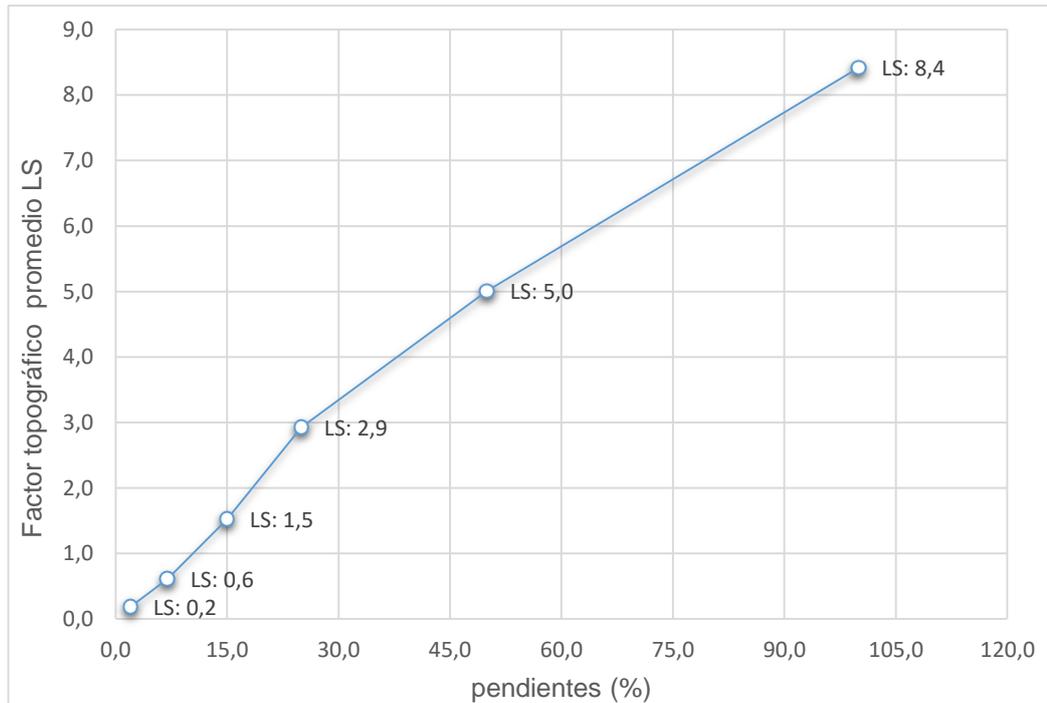
El significado físico del factor topográfico LS es la medida de la capacidad de transporte de sedimento por parte de la escorrentía superficial, la distribución espacial en toda la zona de estudio, se puede apreciar en el Anexo 2 (Mapa N° 04).

El factor topográfico LS presenta un valor mínimo de 0.03, un valor promedio de 4.06 y un máximo de 104.46, este factor es unidimensional. Los valores máximos aparecen asociados con áreas de fuerte pendiente, y los valores mínimos a zonas de menos pendientes.

En la Figura 10 se puede apreciar la relación existente entre los valores de la pendiente en porcentaje y los valores de LS. De los resultados obtenidos se puede ver la decisiva importancia de la pendiente en la definición de los valores del factor topográfico LS.

#### 4.4. Erosión potencial del suelo

La pérdida potencial del suelo se ha calculado a partir de los factores de erosividad de la lluvia (factor R), erodabilidad del suelo (factor K) y el factor topográfico (factor LS), mediante el proceso multiplicativo de estos tres factores en el ArcGis.



**Figura 10:** Relación de las pendientes con el factor topográfico LS.

Los resultados han sido representados en un modelo cartográfico de los niveles de erosión potencial del suelo, que aporta una visión espacial de las áreas con mayores problemas de pérdida de suelo, tal como se puede apreciar en el Anexo 2(Mapa N° 05).

Los valores medio y máximo de pérdida de suelo potencial en la zona agrícola de la cuenca Chancos es de  $38.11 \text{ Tn ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $198.72 \text{ Tn ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  respectivamente, y la pérdida total de suelo es de  $191,377.37 \text{ Tn año}^{-1}$ , esto representa la pérdida de suelo en toda el área de estudio.

El valor promedio de la erosión potencial obtenido en la zona de estudio se sitúa por encima de  $10 \text{ Tn ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , considerado por Schertz (1983) como el límite máximo de erosión a partir del cual la degradación del suelo es irreversible.

Los valores de pérdida de suelo calculados para la zona de estudio y clasificados de acuerdo a FAO (1980), muestran que el 10.90% de la superficie presenta una tasa de erosión clasificado como ligera, el 57.28% moderada (Figura 12), 31.58% alta, mientras que sólo el 0.24% de toda la superficie tiene una erosión nula, y corresponde a las tierras urbanas, tal como se puede apreciar en la Tabla 24.

Como se puede apreciar en la Figura 12, la erosión moderada es la que cubre la mayor superficie de la zona agrícola de la cuenca Chancos con una extensión de 2,876.60 ha que representa el 57.28% de toda la zona de estudio.

Un análisis de la erosión potencial asociado a los tipos de suelos dentro del área de estudio muestra que la superficie de suelo Marian (Mr-1) presenta la tasa más baja de pérdida de suelos con un valor promedio de  $5.21 \text{ Tn ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , y las tasas más altas corresponden a las tierras de cárcavas (TCv), tierra montañosa escabrosa con afloramiento de rocas (TMr), ambos con pendientes predominantes superiores a 50% y con un valor promedio de  $51.92 \text{ Tn ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $53.74 \text{ Tn ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  respectivamente. Tal como se puede apreciar en la Figura 13.



**Figura 11:** Fotografía de suelo con erosión potencial moderada.

**Tabla 23:** Superficie del área de estudio asociada a diferentes niveles de erosión potencial

Pérdida de suelo ( $\text{Tn ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ )	Erosión potencial	Superficie (ha)	Superficie (%)
0	Nula	11.99	0.24
0-10	Ligera	547.26	10.90
10-50	Moderada	2,876.60	57.28
50-198.72	Alta	1,585.87	31.58
Total		<b>5,021.72</b>	<b>100</b>

**Fuente:** Elaborado por el autor de acuerdo a FAO 1980.

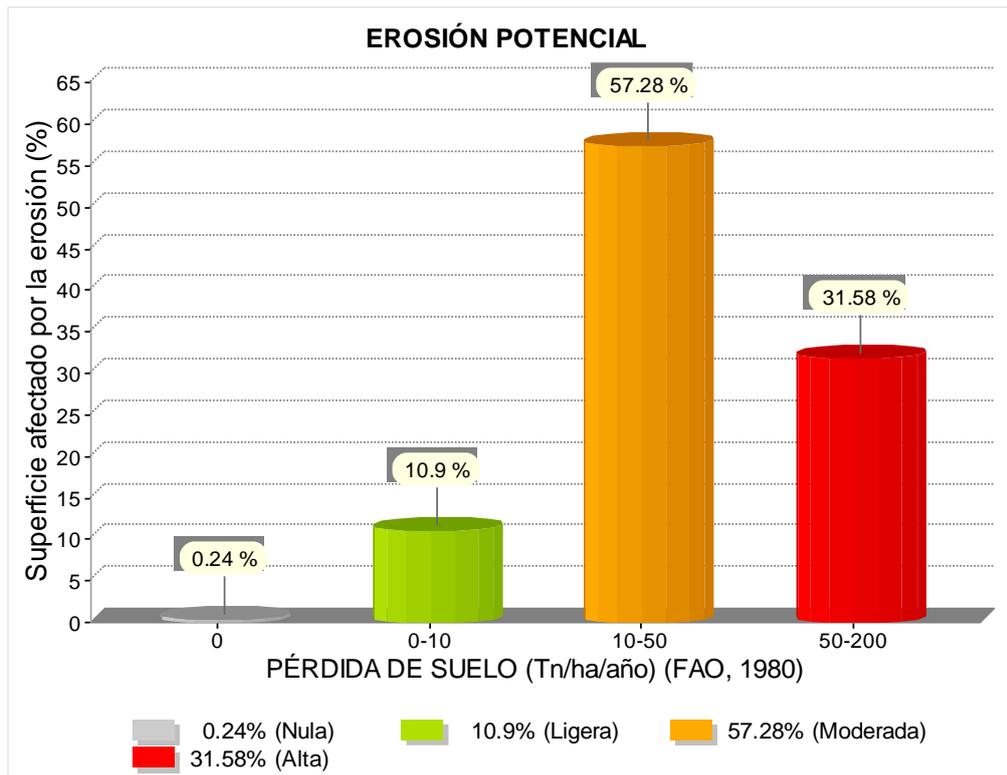


Figura 12: Pérdida de suelo debido a la erosión potencial hídrica.

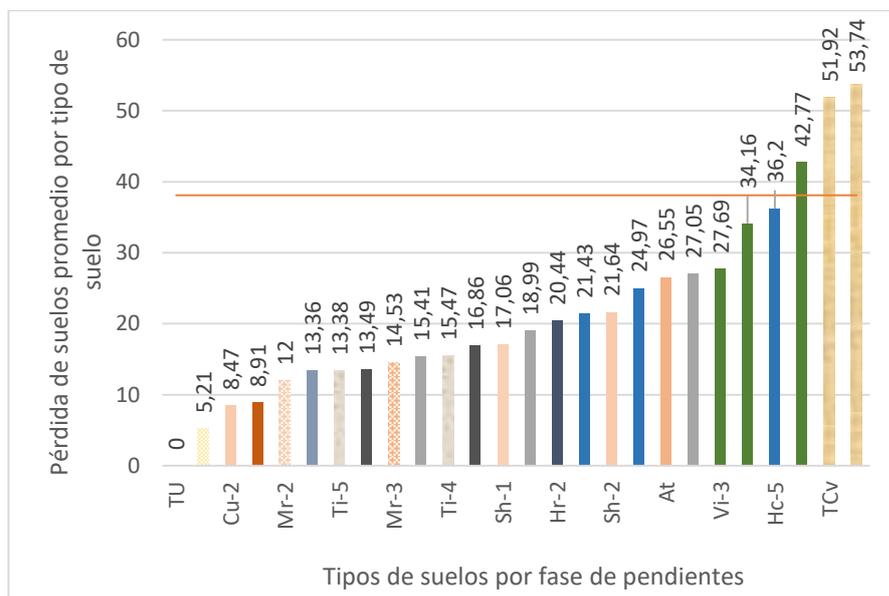


Figura 13: Pérdida de suelo promedio asociado a los tipos de suelo.

## 4.5. Discusión

### Erosividad de la lluvia (Factor R)

Para el cálculo de este factor se optó por el Índice Modificado de Fournier (IMF), porque en el área de estudio solo se disponen de datos de precipitación

mensual; este método permite conocer la erosividad anual pero también su distribución mensual (Figura 07). Los valores obtenidos de erosividad R están entre  $71 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $141 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , y un promedio de  $100.31 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ .

Los resultados obtenidos revelan 3 rangos de erosividad bien definidas (baja, moderada y alta), tal como se puede apreciar en la Tabla 21, donde la erosividad baja es la que predomina cubriendo el 40.6% de toda la zona de estudio, mientras que la erosividad de clase alta representa solo el 19.9%, extendiéndose a lo largo de las superficies con cotas más altas del área de estudio.

### **Erodabilidad de los suelos (Factor K)**

Los resultados obtenidos muestran que los suelos de textura franco arenoso son los más erodables en el área de estudio tales como los suelos Vicos con símbolo Vi-4, Huaraz con símbolo Hr-2, Aluvión con símbolo Al-2; con valores de K de 0.096, 0.089 y  $0.088 \text{ Tn ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  respectivamente (Figura 09).

Estos resultados se deben a que estos suelos tienen un bajo contenido de materia orgánica inferiores a 2.41%, alto contenido de arena superiores a 66%, un contenido medio de limo de 25%, y un bajo contenido de arcilla inferiores a 4%.

Suelos Acuca de textura franco con símbolo Cu-2 y Tingua de textura franco arcilloso con símbolo Ti-5, son los menos erodables con valores de K de  $0.023 \text{ Tn ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  y  $0.033 \text{ Tn ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  respectivamente, con los porcentajes más altos de contenido de materia orgánica de 9.44% y 5.8% de todos los suelos analizados en el área de estudio.

### **Factor topográfico (Factor LS)**

Los valores obtenidos para este factor están entre 0.03 y 104.46, y un promedio de 4.06, de estos resultados obtenidos y de su distribución espacial, se puede concluir que la pendiente juega un papel decisivo en la definición de los valores de LS. Las zonas con valores más altos corresponden a los sectores de elevada pendiente (Figura 10), y las zonas de menos pendiente presentan valores mucho más moderados.

## Erosión potencial del suelo

Los valores de pérdida de suelo calculados para el área de estudio muestran cuatro clases de erosión potencial (Tabla 24): nula, ligera, Moderada y alta; de los cuales la erosión potencial moderada es la que afecta a una mayor extensión de superficie de suelos que representa el 57.28% del área de estudio con valores de pérdida de suelo de 10 a 50 Tn ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, y sólo el 31.58% del área de estudio presenta una erosión potencial alta. Los ratios de pérdida de suelos se han estimado entre 0.00 Tn ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> hasta un máximo de 198.72 Tn ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> con una media de 38.11 Tn ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, y con una pérdida de suelo anual de 191,377.37 Tn año<sup>-1</sup>.

Los valores altos de la erosión potencial se deben principalmente a la influencia de la topografía del suelo, y se localizan en zonas con un pendiente superior a 50%, con valores del factor topográfico LS superiores a 5.4.

Los resultados revelan que, en la zona de estudio los suelos vicos con símbolos Vi-4; y Huanchac con símbolo Hc-5, presentan tasas de erosión potencial más elevadas de todos los suelos analizados con valores medios de 42.77 y 36.20 Tn ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Mientras que los suelos Marian con símbolo Mr-1 y Acuca con símbolo Cu-2, presentan tasas de erosión más bajas, inferiores a 8.91 Tn ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Figura 13), esto se debe a que están localizados en zonas de menor pendiente, inferiores a 15%.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Se determinó los niveles de erosión potencial del suelo en la zona agrícola de la cuenca Chancos como ligera con valores de  $0-10 \text{ Tn ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , moderado con valores de  $10-50 \text{ Tn ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y, alta con valores de  $50-198.72 \text{ Tn ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , y con una pérdida de suelo promedio de  $38.11 \text{ Tn ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Donde el 31.58% de toda la superficie presenta problemas de erosión potencial alta, que afecta principalmente al tipo de suelo Vicos, tal como se puede apreciar en el Anexo 2 (Mapa N° 05).

En función a los objetivos específicos planteados se tienen las siguientes conclusiones:

1. El mapa de erosividad hídrica muestra el poder erosivo de la lluvia sobre el suelo con un valor mínimo de  $71 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y un valor máximo de  $141 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , con un promedio de  $100.31 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , donde los valores más altos corresponden a zonas de mayor altitud, tal como se puede apreciar en el Anexo 2 (Mapa N° 01).
2. El mapa de erodabilidad del suelo, muestra la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica con valores entre 0.00 y  $0.096 \text{ Tn ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ , tal como se puede apreciar en el Anexo 2 (Mapa N° 03). Los suelos Vicos son los más erodables con un valor promedio de K de  $0.091 \text{ Tn ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  y con pérdida de suelo promedio de  $34.87 \text{ Tn ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ .
3. El mapa del factor topográfico LS, muestra el grado de influencia de la topografía sobre la erosión hídrica del suelo con valores entre 0.03 y 104.46,

tal como se puede apreciar en el Anexo 2 (Mapa N° 04), donde los valores más altos corresponden a sectores de elevada pendiente e indican una alta incidencia a la erosión del suelo.

## **5.2. Recomendaciones y lineamientos para prevenir la erosión del suelo**

- ✓ Producir cultivos que demanden remociones o araduras periódicas y continuas del suelo en zonas con pendiente hasta 25% (cultivos en limpio), como son los suelos Aluvión, Shimpi, Marian y pacuya.
- ✓ En suelos donde no es posible la producción de cultivos que requieren de remociones periódicas y permanente por algunas limitaciones, cultivar principalmente frutales, también se pueden cultivar pastos o pueden destinarse a la forestación, con pendientes hasta 25% (cultivo permanente), como son los suelos Huanchac y Huaylas.
- ✓ En suelos donde no es posible la producción de cultivos en limpio ni permanente, se recomienda el cultivo de pastos en zonas con pendientes hasta 50%, como son los suelos Vicos, Tingua y Santa Rosa.
- ✓ En suelos donde no es favorable para cultivo en limpio, permanente, y de pastos; se recomienda se recomienda la producción de especies forestales maderables y no maderables hasta 75% de pendiente.
- ✓ Las practicas agronómicas como cultivos en contorno, las terrazas y los desagües empastados; son efectivas en el control y manejo del escurrimiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almorox, J. R., De Antonio, R., Saa, A., Díaz, M. & Gasco, J. M. (1994). *Métodos de estimación de la erosión hídrica*. Madrid, España: Editorial Agrícola Española S.A.
- Arnoldus, H. M. J. (1980). An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In M. De Boodst y D. Gabriels (edrs), *Assesment of Erosion* (pp. 125-132). New York, USA: Wiley and Sons.
- Bergsma, E. (1980). Provisional rain erosivity map of the Netherlands. In M. De Boodst y D. Gabriels (edrs), *Assesment of Erosion* (pp. 121-126). New York, USA: Wiley and Sons.
- Bernard, J. M. & liavri, T. A. (2000). Sediment damages and recend trends in the United States. *Int. J. Sediment Res.*, 15, 135-148.
- Boellstorff, D. & Benito, G. (2005). Impacts of set-aside policy on the risk of soil erosion in central Spain Agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 107, 231-243.
- Canty, M. J. (2014). *Image Analysis, Classification and Change Detection in Remote Sensing* (Third Edition). New York, USA: CRC Press.
- Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA). (2007). *Plan general de ordenamiento forestal para el Departamento del Tolima*. Ibagué, Colombia.
- Castro, Q. A. F., Lince Salazar, L. A., & Riaño Melo, O. (2017). Determinación del riesgo a la erosión potencial hídrica en la zona cafetería del Quimio, Colombia. *Revista de investigación agraria y ambiental*, 8(1), 17-26.
- Cerdá, B. A. (1998). The influence of geomorphological position and vegetation cover on the erosional and hydrological processes on a Mediterranean hillslope. *Hydrological Processes*, 12, 661-671.
- Chen, J. (2001). A raster-based method for computing voronoi diagrams of spatial ojects using dynamic distance transformation. *Journal of Geographical Information Sciene*, 13(3), 209-225.
- Christopherson, R. W. (2004). *Elemental Geosystems* (fourth edition). New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Coordination Information Environment (CORINE). (1992). *soil erosion risk and important land resources. An assessment to evaluate and map of distribution of land quality and soil risk*. Luxembourg: Office for oficial publications of the European Community. EUR. 13233.
- Cook, H.F. (1936). The nature and controlling varables of the wáter erosion process. *Soil Sci. Am. Proc.* 1, 60-64.

- Desmet, P.J. & Govers, G. (1996). A GIS procedure for the automated calculation of the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5), 427-433.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (1967). *La erosión del suelo por el agua. Algunas medidas para combatirla en tierras de cultivo*. Roma, Italia: FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (1980). *Metodología Provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos*. Roma, Italia: FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (1994). *Erosión de suelos en América latina*. Santiago, Chile: FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2002). *Agricultura de conservación. Estudio de casos en América Latina*. Roma, Italia: FAO.
- Febles, J. M., Tolón, A. & Vega, M. (2009). Edaphic indicators for assesment of soil erosion in karst regions, province of Habana, Cuba. *Land degradation and development*, 20(3), 522-534.
- Figueroa, S. B. (1991). *Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión*. Chapingo, México: Colegio de Postgraduados de Chapingo.
- Foster, G. R. McCool, D. K., Renard, K. G. & Moldenhaver, L. S. (1981). Conversion of the Universal Soil Loss Equation (USLE) to SI metric units. *Journal Soil and Water Conservation*, 36(6), 355-359.
- Foster, G. R. (1991). Advances in wind and water erosion prediction. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, 27-29.
- Galilea, S. I. (2016). *Erosion de suelos y laderas en el espacio agrícola de la Rioja. Aplicación y cartografía del modelo Rusle* (tesis doctoral). Universidad de la Rioja, Logroño, España.
- Gabriels, D., Cadron, W. & De Mey, P. (1986). *Provisional rain erosivity map of some EC countries*. Brussels: Workshop on Erosion Assessment and Modelling.
- Hammad, A. A., Lundekvam, H., & Borresen, T. (2004). Adaptation of RUSLE in the Eastern Part of Mediterranean Region. *Environment management*, 34(6), 829-841.
- Henry, D. (1986). *Fundamentos de la ciencia del suelo* (segunda edición). México, Mexico: CECSA.
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). (1995). *Geología del Perú. Boletín N° 55. Serie A: Carta Geológica Nacional*. Lima, Peru.
- Jaramillo, V. J. (2015). *Estudio del riesgo por erosión hídrica del suelo utilizando el modelo U.S.L.E. mediante herramientas S.I.G. aplicado en la subcuenca rio*

- Portoviejo, Provincia de Manabí* (tesis de maestría). Universidad central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Jiménez, S. M. C. (2008). *Metodología de cálculo del factor topográfico, LS, integrado en los modelos RUSLE y USPED. Aplicación al arroyo del Lugar, Guadalajara (España)* (Tesis doctoral). Universidad politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Keller, E. & Blodgett, R. (2004). *Riesgos Naturales*. Madrid, España: Pearson Educación S.A.
- Kirkby, M. & Morgan, R.P.C. (1984). *Erosion de suelos*. Mexico, Mexico: Limusa.
- Kirkby, M. & Morgan, R.P.C. (1994). *Erosión de suelos* (tercera edición). México, Mexico: Limusa.
- Lal, R. (2000). Soil management in the developing countries. *Journal Soil Scienc*e, 165, 57-72.
- Lal, R. (2007). Anthropogenic influences on world soil and implications to global food security. *Adv. Agron.*, 93, 69-93.
- Laws, J.O., & Parson, D. A. (1943). The relation of raindrop-size to intensity. *Trans. AGU*, 24, 452-460.
- López V. M. (2007). *Erosión y redistribución del suelo en agroecosistemas mediterráneos: Modelización predictiva mediante SIG y validación con <sup>137</sup>Cs (Cuenca de Estaña, Pirineo Central)* (tesis doctoral). Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España.
- Loveland, P. & Webb J. (2003). Is there a critical level of organic matter in the agricultural soil of temperate regions: a review. *Soil Till. Res.*, 70, 1-18.
- Machin, J., & Navas, A. (1995). Land evaluations and conservation of semiarid agrosystems in Zaragoza (NE Spain) using an expert evaluation system and GIS. *Land Degra. Rehabíl*, 6(4), 203-214.
- Maguiña, S. R. (1995). *Diagnóstico de la erosión de suelos de la Subcuenca de Llanganuco* (tesis de pregrado). Universidad nacional Santiago Antunez de Mayolo, Huaraz, Perú.
- McCool, D. K., Foster, G.R., Mutchler, C. K., & Meyer, L. D. (1989). Revised slope length factors for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 32(5), 1571-1576.
- McCool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., Mutchler, C. K., & Meyer, L. D. (1987). Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1387-1396.
- Morgan, R. P. C., & Finney, H. J. (1984). A predictive model for the assessment of soil erosion risk. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 30, 245-253.

- Morgan, R. P. C. (1994). *Soil erosion and conservation*. London, Englan: Addison Wesley Longman Limited.
- Morgan, R. P. C. (1997). *Erosión y conservación del suelo*. Madrid, España: Editorial Mundi Prensa.
- Moore, I. D., & Wilson, J. P. (1992). Length-Slope factor for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal Soil and Water Conservation*, 47 (5), 423-428.
- Oldeman, L. R. (1994). The global extend of soil degradation. In D. J. Greenland y I. Szabolcs (edrs), *Soil Resilience and Sustainable Land Use* (pp. 99-118). Wallingford: CAB International.
- Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN). (1973). *Estudio de suelos del callejón de Huaylas "semidetallado"*. Lima, Perú: ONERN.
- Pimental, D. Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, k., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Saffouri, R. & Blair, R. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267, 1117-1123.
- Renard, K. G., & Freimund, J. R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157, 287-306.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yooder, D.C. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington D.C., USA: United States Department of Agriculture.
- Soil Surveys Staff. (2014). *Key to soil taxonomy* (twelfth edition). Washington D.C., USA: United States Department of Agriculture.
- Solano, P. 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, Peru.
- Schertz, D. L. (1983). The basis for soil loss tolerances. *Journal Soil Water Conservation*. 38(1), 10-14.
- Schowengerdt, R. A. (2007). *Models and Methods for Image Processing* (third Edition). California, USA: Academic Pres is an imprint of Elsevier.
- Smith, D. D. & Whitt, D. M. (1948). Evaluating soil losses from field áreas. *Agric. Eng.*, 29, 394-396.
- United States Department of Agriculture (USDA). (1983). *National Soils Handbook N° 430*. Washington D.C., USA: USDA.
- United States Department of Agriculture (USDA). (1995). *Water Erosion Prediction Project. WEPP*. Washington D.C., USA: Agricultural Research Service and Purdue University. EE. UU.

- Vega M. B & Febles J. M. (2006). Evaluación de la erosividad de la lluvia en regiones agropecuarias en la porción central de la provincia La Habana. *Revista cubana de ciencia agrícola*, 40(2), 12-17.
- Villón, B. M. (2011). *Hidrología* (tercera edición). Lim, Peru: Editorial Villón.
- Wischmeier, W. H. & Smith D. D. (1958) Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions of the American geophysical Union*. 39, 258-291.
- Wischmeier, W. H. (1959). A rainfall erosion index for a Universal Soil-Loss Equation. *Soil Science Society Proceedings*, 23, 246-249.
- Wischmeier, W.H. & Smith D. D. (1965). *Predicting rainfall erosion losses from cropland East of the Rocky Mountain. Guide for selection of practices for soil and water conservation*. Agriculture Handbook, n° 282. Washinton D.C. USA: USDA.
- Wischmeier, W. H. & Smith D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. Agriculture Handbook n° 537. Washinton D.C. USA: USDA.
- Zapata F. (2003). The use of environmental radionuclides as tracers in soil erosion and sedimentation investigations: recent advances and future development. *Soil Tillage Research*, 69, 3-13.
- Zachar, D. (1982), *Soil erosion*. Amsterdam: Elsevier.
- Zingg, A. W. (1940). Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. *Agr. Eng.*, 21(2), 59-64.

# **ANEXOS**

# **ANEXO 1**

## **Análisis físico de suelos**



**UNIVERSIDAD NACIONAL**  
**“Santiago Antúnez de Mayolo”**  
**“Una Nueva Universidad para el Desarrollo”**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**CIUDAD UNIVERSITARIA – SHANCAYAN**  
 Telefax. 043-426588 - 106  
**HUARAZ – REGIÓN ANCASH**



**RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICOS DE SUELOS**

**SOLICITANTE** : Reynaldo David Flores Coletto – Tesista

**TÍTULO DE LA TESIS** : “Modelamiento Cartográfico de los Niveles de Erosión Potencial del suelo en la Zona Agrícola de la Cuenca Chancos”

**UBICACIÓN** : Distritos de Marcará y San Miguel de Aco - Carhuaz - Ancash

UBICACIÓN POLITICA				COORDENADAS UTM		CALICATA	CARACTERÍSTICAS DEL SUELO				
REGION	PROVINCIA	DISTRITO	CC PP	ESTE	NORTE		% ARE	% LIM.	% ARC	% MO	CLASE TEXTURAL
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	MARCARA	213536.174	8968094.208	C1	66	24	10	0.96	Franco arenoso
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	COPA GRANDE	218832.085	8972050.266	C2	46	42	12	9.44	Franco
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	COPA GRANDE	217530.332	8971123.164	C3	32	40	28	2.55	Franco
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	VISTA ALEGRE	217600.182	8970380.212	C4	38	38	24	4.55	Franco
ANCASH	CARHUAZ	SAN MIGUEL DE ACO	CHOPIJIRCA	221968.991	8963547.599	C5	48	40	12	4.2	Franco
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	RECUAY HUANCA	219016.235	8965986.004	C6	52	36	12	2.55	Franco
ANCASH	CARHUAZ	SAN MIGUEL DE ACO	QUINRANCA	221060.939	8964042.900	C7	58	28	14	2.83	Franco arenoso
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	HUINAC	218622.534	8969376.910	C8	70	26	4	2.41	Franco arenoso
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	COPA GRANDE	218427.853	8971642.912	C9	40	33	27	1.79	Franco arcilloso
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	COPA GRANDE	217961.127	8971376.212	C10	44	26	30	1.45	Franco arcilloso
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	VISTA ALEGRE	217138.801	8970591.985	C11	44	40	16	2.14	Franco
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	SHUMAY	214544.821	8968280.581	C12	30	36	34	2.48	Franco arcilloso
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	MARCARA	214701.454	8968576.915	C13	42	40	18	2.83	Franco
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	MARCARA	213465.318	8968348.314	C14	58	34	8	1.72	Franco arenoso
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	HUASCAPAMPA	218896.696	8968148.924	C15	52	36	12	3.1	Franco
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	VICOS	218253.228	8968060.024	C16	30	34	36	2.34	Franco arcilloso
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	VICOS	219091.430	8967454.656	C17	40	40	20	2.55	Franco
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	HUINAC	217254.159	8969571.327	C18	34	32	34	3.17	Franco
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	TUYU	216310.124	8968716.192	C19	28	44	28	5.8	Franco arcilloso
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	CULLHUSH	220247.132	8968208.191	C20	60	34	6	3.24	Franco arenoso
ANCASH	CARHUAZ	MARCARA	HUASCAPAMPA	218922.096	8968932.092	C21	70	26	4	1.65	Franco arenoso
ANCASH	CARHUAZ	SAN MIGUEL DE ACO	PAMPAMACA	220323.332	8964779.184	C22	65	30	5	2.45	Franco arenoso

Huaraz, 28 de Junio del 2017.

  
**Ing. M.Sc. Guillermo Castillo Romero**  
 JEFE DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS Y AGUAS

## **ANEXO 2**

Mapas temáticos.

UNIVERSIDAD NACIONAL "SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"  
 FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE ESCUELA PROFESIONAL DE  
 INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: "MODELAMIENTO CARTOGRAFICO DE LOS NIVELES DE EROSION POTENCIAL  
 DEL SUELO EN LA ZONA AGRICOLA DE LA CUENCA CHANCOS"

**MAPA DE EROSIDAD DE LA LLUVIA EN LA ZONA AGRICOLA  
 DE LA CUENCA CHANCOS**

**UBICACIÓN:** Región Ancash, Provincia de Carhuaz, Distritos de  
 Marcá y San Miguel de Aco

**Mapa  
 N° 01**

Escala: 1:30,000

0 0.35 0.7 1.4 2.1 2.8 Km

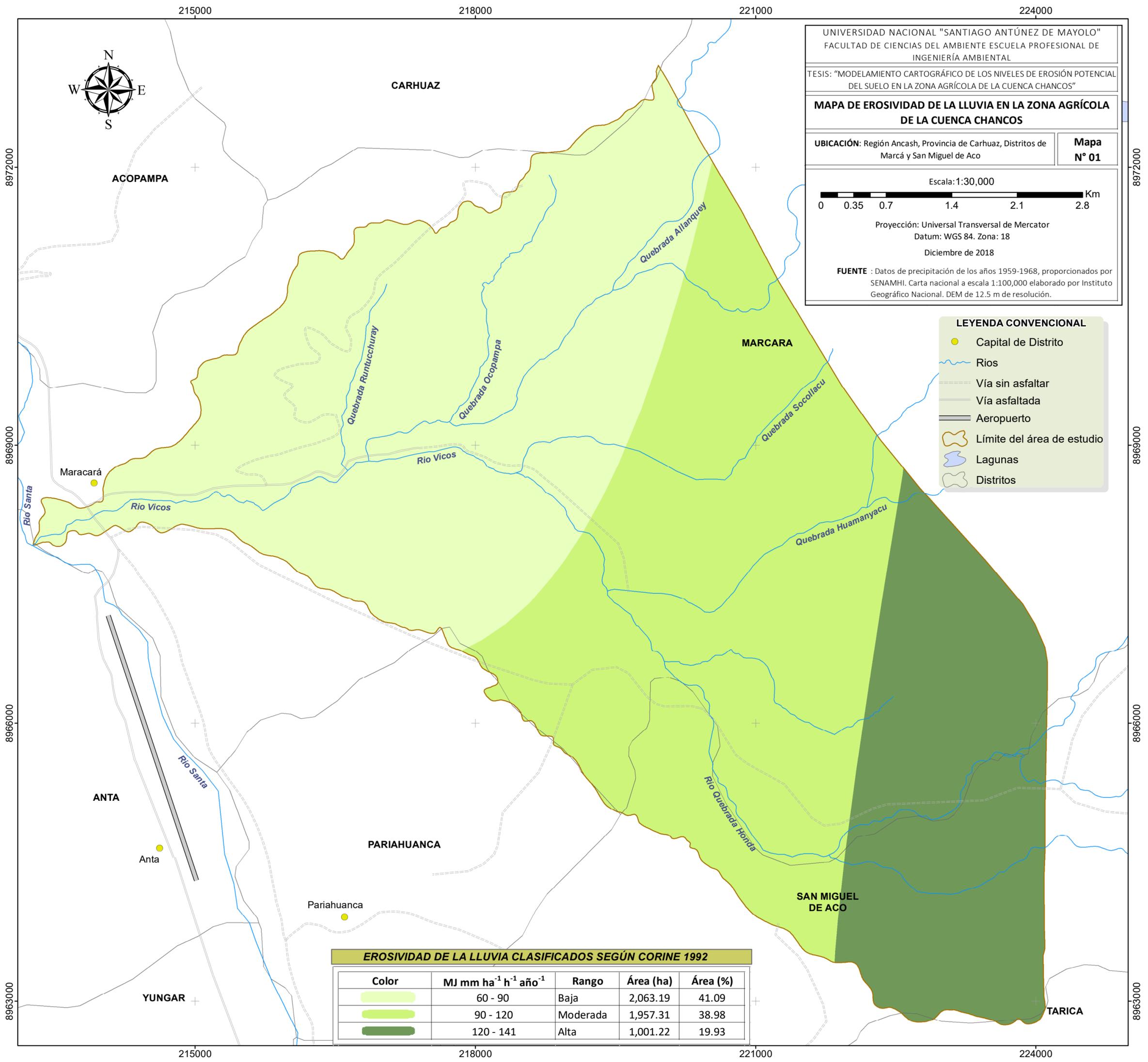
Proyección: Universal Transversal de Mercator  
 Datum: WGS 84. Zona: 18  
 Diciembre de 2018

**FUENTE :** Datos de precipitación de los años 1959-1968, proporcionados por  
 SENAMHI. Carta nacional a escala 1:100,000 elaborado por Instituto  
 Geográfico Nacional. DEM de 12.5 m de resolución.

- LEYENDA CONVENCIONAL**
- Capital de Distrito
  - Ríos
  - Vía sin asfaltar
  - Vía asfaltada
  - Aeropuerto
  - Límite del área de estudio
  - Lagunas
  - Distritos

**EROSIVIDAD DE LA LLUVIA CLASIFICADOS SEGÚN CORINE 1992**

Color	MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Rango	Área (ha)	Área (%)
	60 - 90	Baja	2,063.19	41.09
	90 - 120	Moderada	1,957.31	38.98
	120 - 141	Alta	1,001.22	19.93



215000

218000

221000

224000



UNIVERSIDAD NACIONAL "SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"  
 FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: "MODELAMIENTO CARTOGRÁFICO DE LOS NIVELES DE EROSIÓN POTENCIAL DEL SUELO EN LA ZONA AGRÍCOLA DE LA CUENCA CHANCOS"

**MAPA DE SUELOS DE LA ZONA AGRÍCOLA DE LA CUENCA CHANCOS**

**UBICACIÓN:** Región Ancash, Provincia de Carhuaz, Distritos de Marcá y San Miguel de Aco

**Mapa N° 02**

Escala: 1:30,000

0 0.35 0.7 1.4 2.1 2.8 Km

Proyección: Universal Transversal de Mercator  
 Datum: WGS 84. Zona: 18  
 Diciembre de 2018

**FUENTE :** Mapa de suelos y su capacidad de uso (ONERN, 1973). Carta nacional a escala 1:100,000 elaborado por Instituto Geográfico Nacional. DEM de 12.5 m de resolución.

**LEYENDA CONVENCIONAL**

- Capital del Distrito
- ~ Ríos
- - - - - Vía sin asfaltar
- Vía asfaltada
- ▬ Aeropuerto
- ▭ Límite del área de estudio
- ▭ Distritos

**TIPO DE SUELOS**

Color	Suelo	Símbolo	Fase del suelo por pendiente	Símbolo en el mapa
[Light Green]	Aluvión	Al	Inclinado (7 a 15%)	Al-2
[Light Yellow]	Acuca	Cu	Inclinado (7a 15%)	Cu-2
[Dark Green]	Huaylas	Ha	Moderadamente empinado (15 a 25%)	Ha-3
			Empinado (25 a 50%)	Ha-4
[Medium Green]	Huanchac	Hc	Moderadamente empinado (15 a 25%)	Hc-3
			Empinado (25 a 50%)	Hc-4
			Muy empinado (más de 50%)	Hc-5
[Light Yellow]	Huaraz	Hr	Inclinado (7 a 15%)	Hr-2
[Light Orange]	Marian	Mr	ligeramente inclinado (2 a 7%)	Mr-1
			Inclinado (7a 15%)	Mr-2
			Moderadamente empinado (15 a 25%)	Mr-3
[Light Brown]	Pacuyán	Pa	Inclinado (7a 15%)	Pa-2
[Light Red]	Shimpi	Sh	ligeramente inclinado (2 a 7%)	Sh-1
			Inclinado (7a 15%)	Sh-2
[Light Green]	Santa Rosa	SR	Moderadamente empinado (15 a 25%)	SR-3
			Empinado (25 a 50%)	SR-4
			Muy empinado (más de 50%)	SR-5
[Light Orange]	Tingua	Ti	Empinado (25 a 50%)	Ti-4
			Muy empinado (más de 50%)	Ti-5
[Light Pink]	Vicos	Vi	Moderadamente empinado (15 a 25%)	Vi-3
			Empinado (25 a 50%)	Vi-4
			Muy empinado (más de 50%)	Vi-5
[Light Pink]	Acantilado de terrazas	At	Muy empinado (más de 50%)	At
[Light Red]	Tierras de Cárcavas	TCv	Muy empinado (más de 50%)	TCv
[Light Yellow]	Tierra Montañosa E.	TMr	Muy empinado (más de 50%)	TMr
[Light Orange]	Tierras Urbanas	TU	ligeramente inclinado (2 a 7%)	TU

8972000  
8969000  
8966000  
8963000

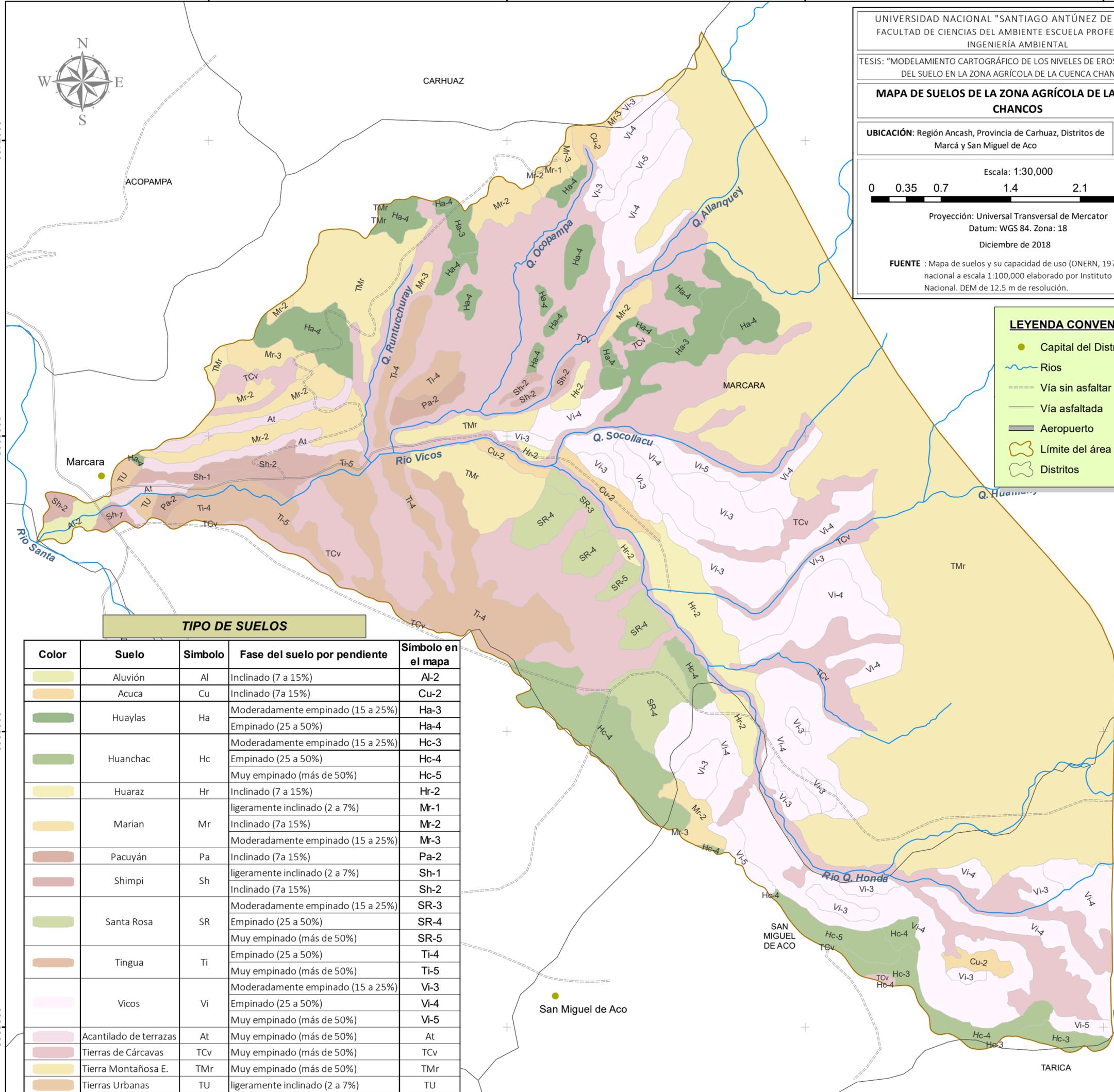
8972000  
8969000  
8966000  
8963000

215000

218000

221000

224000



UNIVERSIDAD NACIONAL "SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"  
 FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: "MODELAMIENTO CARTOGRAFICO DE LOS NIVELES DE EROSION POTENCIAL DEL SUELO EN LA ZONA AGRICOLA DE LA CUENCA CHANCOS"

**MAPA DE ERODABILIDAD DEL SUELO EN LA ZONA AGRÍCOLA DE LA CUENCA CHANCOS**

UBICACIÓN: Región Ancash, Provincia de Carhuaz, Distritos de Marcá y San Miguel de Aco **Mapa N° 03**

Escala: 1:30,000

0 0.35 0.7 1.4 2.1 2.8 Km

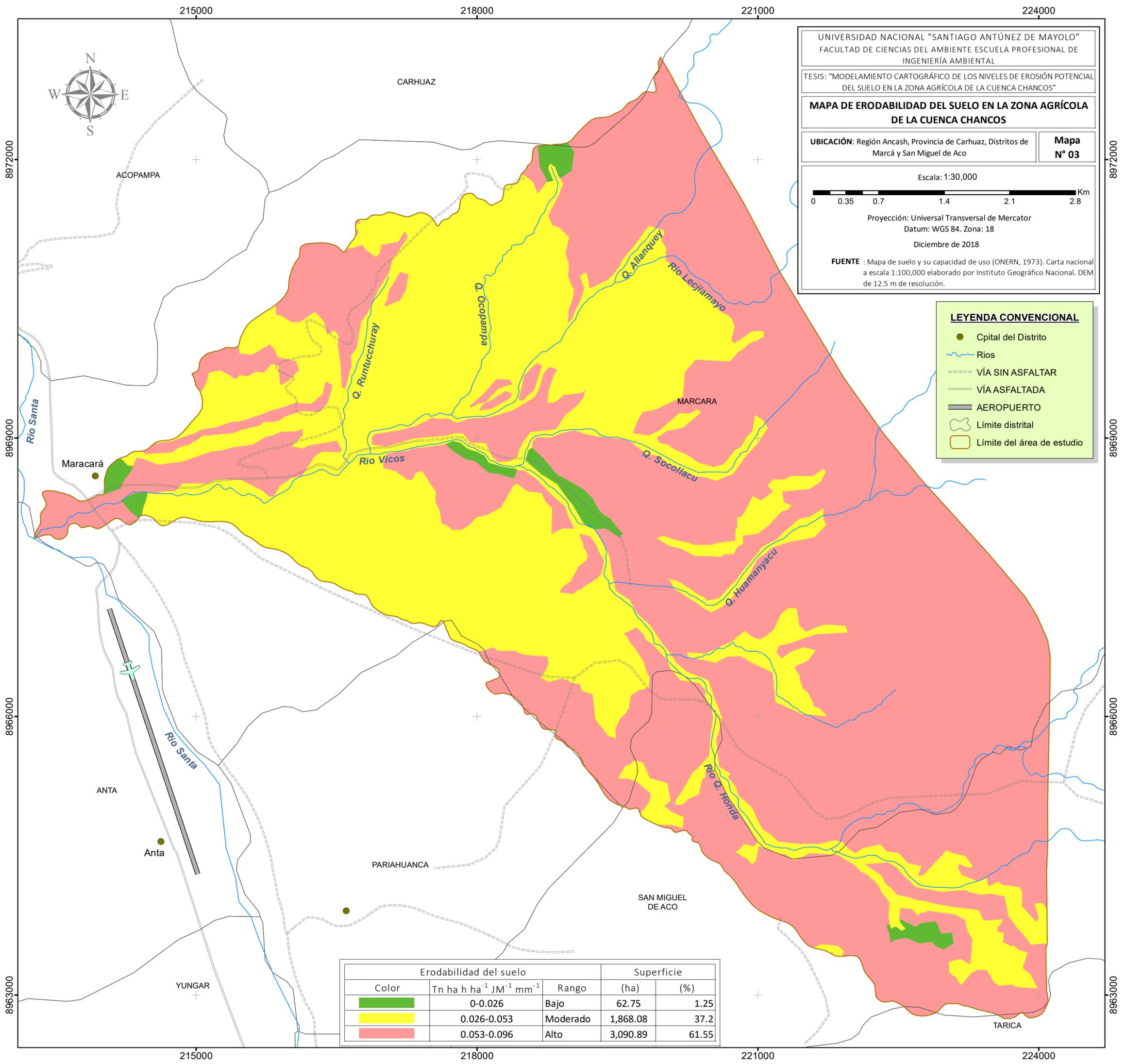
Proyección: Universal Transversal de Mercator  
 Datum: WGS 84. Zona: 18  
 Diciembre de 2018

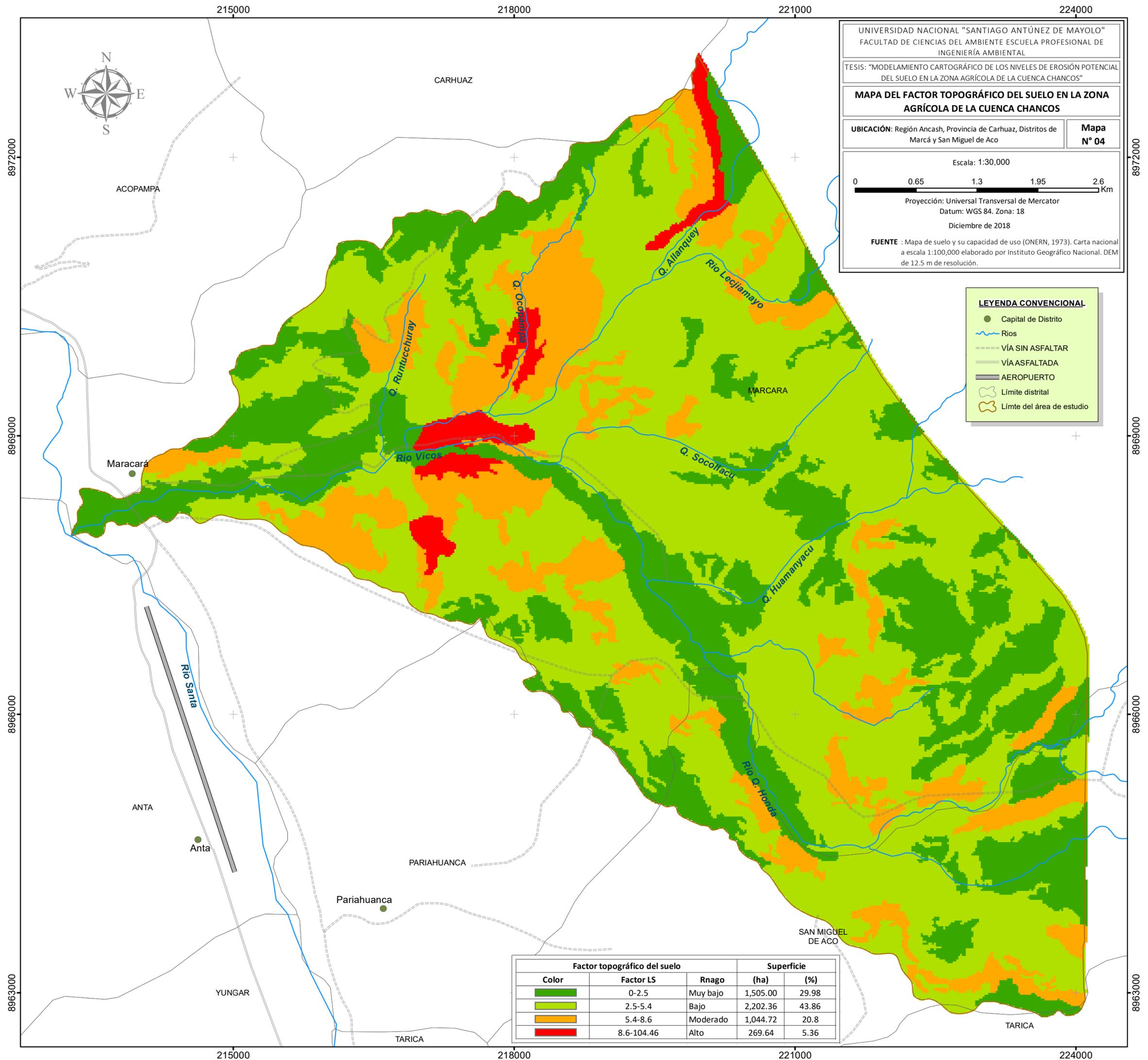
FUENTE : Mapa de suelo y su capacidad de uso (ONERN, 1973). Carta nacional a escala 1:100,000 elaborado por Instituto Geográfico Nacional. DEM de 12.5 m de resolución.

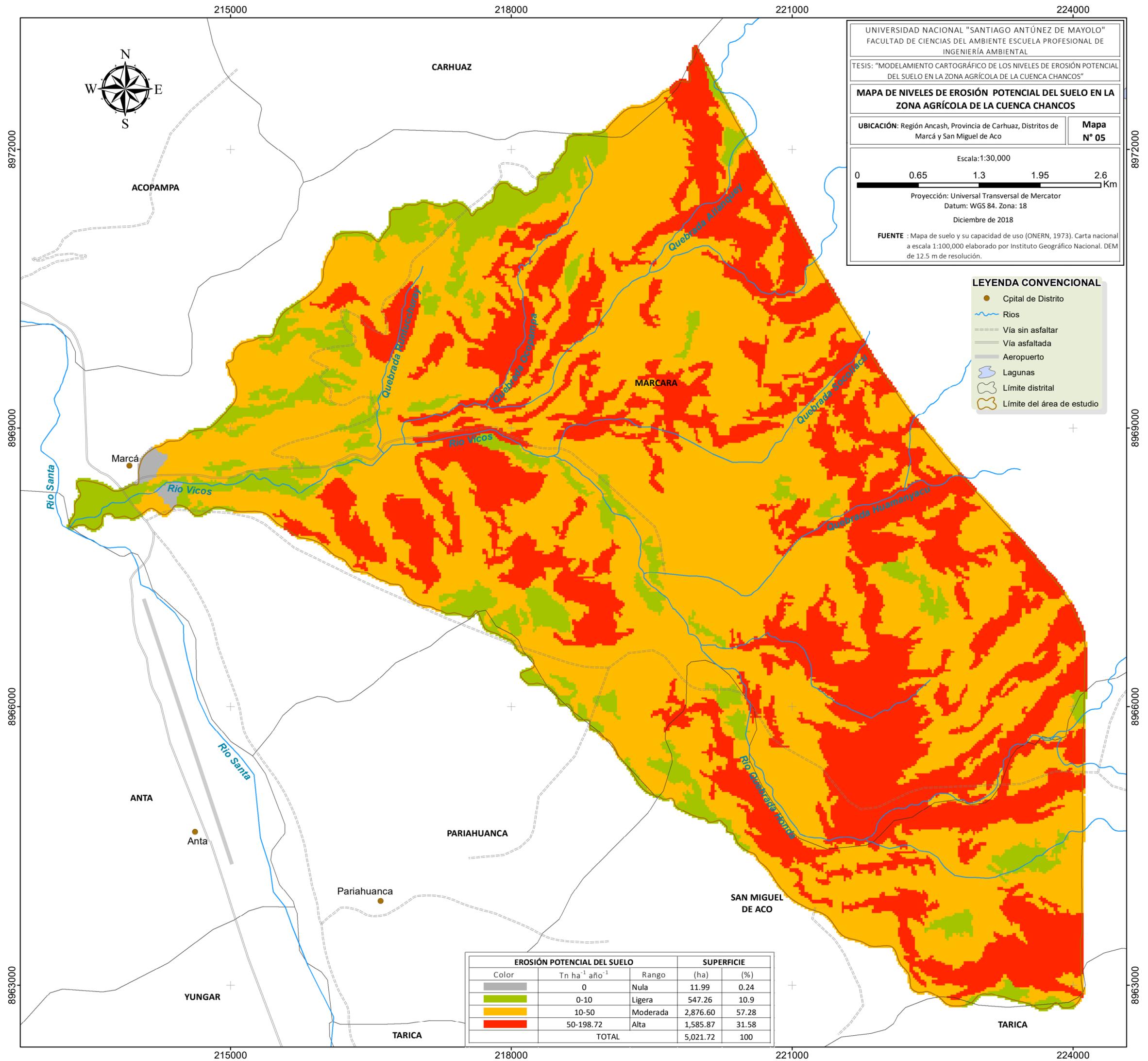
**LEYENDA CONVENCIONAL**

- Capital del Distrito
- ~ Rios
- - - VÍA SIN ASFALTAR
- VÍA ASFALTADA
- ▬ AEROPUERTO
- Límite distrital
- Límite del área de estudio

Erodabilidad del suelo			Superficie	
Color	Tn ha h ha <sup>-1</sup> JM <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup>	Rango	(ha)	(%)
	0-0.026	Bajo	62.75	1.25
	0.026-0.053	Moderado	1,868.08	37.2
	0.053-0.096	Alto	3,090.89	61.55







UNIVERSIDAD NACIONAL "SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"  
 FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS: "MODELAMIENTO CARTOGRÁFICO DE LOS NIVELES DE EROSIÓN POTENCIAL DEL SUELO EN LA ZONA AGRÍCOLA DE LA CUENCA CHANCOS"

**MAPA DE NIVELES DE EROSIÓN POTENCIAL DEL SUELO EN LA ZONA AGRÍCOLA DE LA CUENCA CHANCOS**

UBICACIÓN: Región Ancash, Provincia de Carhuaz, Distritos de Marcá y San Miguel de Aco **Mapa N° 05**

Escala: 1:30,000

0 0.65 1.3 1.95 2.6 Km

Proyección: Universal Transversal de Mercator  
 Datum: WGS 84. Zona: 18  
 Diciembre de 2018

FUENTE : Mapa de suelo y su capacidad de uso (ONERN, 1973). Carta nacional a escala 1:100,000 elaborado por Instituto Geográfico Nacional. DEM de 12.5 m de resolución.

- LEYENDA CONVENCIONAL**
- Capital de Distrito
  - ~ Ríos
  - Vía sin asfaltar
  - Vía asfaltada
  - Aeropuerto
  - ⊕ Lagunas
  - ⊕ Límite distrital
  - ⊕ Límite del área de estudio

EROSIÓN POTENCIAL DEL SUELO			SUPERFICIE	
Color	Tn ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Rango	(ha)	(%)
■	0	Nula	11.99	0.24
■	0-10	Ligera	547.26	10.9
■	10-50	Moderada	2,876.60	57.28
■	50-198.72	Alta	1,585.87	31.58
	TOTAL		5,021.72	100