

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“MODELACIÓN GEOESPACIAL CON SIG EN LA IDENTIFICACIÓN  
DE LAS ZONAS VULNERABLES Y CUANTIFICACIÓN DE LA  
EROSIÓN HÍDRICA, CUENCA DEL RÍO HUARMEY”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA AGRICOLA**

**LIZBETH ROCÍO CAYCHO TORRES**

**LIMA – PERÚ**

**2020.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA**

**“MODELACIÓN GEOESPACIAL CON SIG EN LA IDENTIFICACIÓN  
DE LAS ZONAS VULNERABLES Y CUANTIFICACIÓN DE LA  
EROSIÓN HÍDRICA, CUENCA DEL RÍO HUARMEY”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

**INGENIERA AGRÍCOLA**

Presentado por:

**BACH. LIZBETH ROCÍO CAYCHO TORRES**

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. ABSALÓN VÁSQUEZ VILLANUEVA  
Presidente

Dr. NÉSTOR MONTALVO ARQUÍÑIGO  
Asesor

Mest. JORGE LUIS DÍAZ RIMARACHIN  
Miembro

Dr. OSCAR OSWALDO LOLI FIGUEROA  
Miembro

LIMA – PERU

2020

## **DEDICATORIA**

Dedicada a mis padres Rocío Torres Robles y Esaud Caycho Espilco por la educación que me brindaron, sus lecciones de vida y su constante apoyo en el desarrollo de mi carrera profesional. Y en memoria de mi adorada abuela Lidia Robles Vicente y de mi querido primo Jaime Buleje Medrano que partieron hace poco, y con quienes me hubiera gustado compartir este logro, ya que no hubiera sido posible sin su aliento incondicional para cumplir mis metas.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Agraria La Molina, por ser la casa de estudios que me formó como profesional.

A mi asesor, el Dr. Néstor Montalvo Arquíñigo por sus enseñanzas, su paciencia y su tiempo para ayudarme en la elaboración de este trabajo de investigación.

Al Ing. Efraín Motta Padilla, director de la Agencia Agraria de Huarmey por su colaboración en los trabajos que tuve que realizar en la cuenca.

# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	xii
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	3
2.1. ANTECEDENTES .....	3
2.2. VULNERABILIDAD .....	5
2.3. INUNDACIÓN .....	6
2.4. INUNDACIÓN EXTRAORDINARIA .....	6
2.5. EL NIÑO COSTERO .....	7
2.6. EROSIÓN .....	7
2.7. EROSIÓN HÍDRICA.....	8
2.8. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EROSIÓN HÍDRICA .....	9
2.8.1. Precipitación .....	10
2.8.2. Pendiente.....	10
2.8.3. Cobertura Vegetal .....	10
2.8.4. Tipo de Suelos.....	10
2.8.5. Geología.....	11
2.8.6. Geomorfología .....	11
2.9. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	11
2.10. TELEDETECCIÓN .....	13
2.10.1. Radiación Electromagnética .....	15
2.10.2. Resolución de las imágenes satelitales .....	16
2.11. IMÁGENES SATELITALES: SENTINEL-2 .....	18
2.12. MODELAMIENTO GEOESPACIAL.....	21
2.13. MÉTODO DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS (USLE) .....	23

2.13.1. Factor de Precipitación (R) .....	24
2.13.2. Factor de Susceptibilidad a erosión del Suelo (K).....	25
2.13.3. Factor Topográfico (LS) .....	27
2.13.4. Factor de Cobertura Vegetal (C).....	29
2.13.5. Factor de Prácticas de Conservación (P) .....	30
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>31</b>
3.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	31
3.2. MATERIALES Y EQUIPOS.....	33
3.3. MÉTODOS .....	34
3.3.1. Fase Inicial o fase de preprocesamiento .....	35
3.3.2. 1 <sup>ra</sup> fase de Geoprocesamiento .....	38
a. Cobertura Vegetal.....	38
b. Pendiente.....	47
c. Capacidad de Infiltración.....	52
d. Geología.....	53
e. Geomorfología.....	55
f. Factor Forma.....	56
g. Precipitación .....	68
3.3.3. Fase de Campo.....	73
3.3.4. 2 <sup>da</sup> fase de Geoprocesamiento.....	74
a. Construcción de Base de Datos Geoespaciales .....	74
b. Elaboración de los modelos geoespaciales de Inundaciones .....	76
• Mapa de Inundaciones Extraordinarias .....	76
• Mapa de Inundaciones, considerando PP .....	81
c. Modelo Geoespacial de Vulnerabilidad Física.....	83
d. Modelo Geoespacial para la identificación y cuantificación de la erosión del suelo con el método USLE .....	87

• Factor de Precipitación (R).....	87
• Factor de Susceptibilidad a erosión del Suelo (K) .....	89
• Factor Topográfico (LS).....	95
• Factor de Cobertura Vegetal (C).....	96
• Factor de Prácticas de Conservación (P) .....	97
• Identificación y cuantificación de la erosión hídrica (USLE) .....	98
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>99</b>
4.1. 1 <sup>ra</sup> FASE DE GEOPROCESAMIENTO.....	99
4.1.1. Cobertura Vegetal .....	99
4.1.2. Pendiente.....	103
4.1.3. Capacidad de Infiltración.....	105
4.1.4. Geología.....	107
4.1.5. Geomorfología .....	109
4.1.6. Factor Forma.....	111
4.1.7. Precipitación .....	113
4.2. 2 <sup>da</sup> FASE DE GEOPROCESAMIENTO .....	115
4.2.1. Mapa de Inundaciones Extraordinarias.....	115
4.2.2. Mapa de Inundaciones, considerando PP.....	119
4.2.3. Mapa de Vulnerabilidad Física .....	121
4.2.4. Modelo Geoespacial para la identificación y cuantificación de la erosión del suelo con el método USLE .....	124
a. Factor de Precipitación (R).....	124
b. Factor de Susceptibilidad a erosión del Suelo (K) .....	126
c. Factor Topográfico (LS).....	128
d. Factor de Cobertura Vegetal (C).....	130
e. Mapa de Identificación y Cuantificación de la Erosión Hídrica (USLE).....	132
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>135</b>

<b>VI. RECOMENDACIONES</b> .....	138
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	140
<b>VIII. ANEXOS</b> .....	149



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resoluciones espacial y espectral de los sensores Sentinel-2 .....	20
Tabla 2: Valores de LS de acuerdo a la pendiente .....	29
Tabla 3: Forma de la cuenca según los valores de Factor Forma .....	67
Tabla 4: Datos completos por método de Regresión Lineal .....	68
Tabla 5: PP acumuladas .....	69
Tabla 6: Datos completos de las estaciones .....	70
Tabla 7: Puntos con los nuevos datos de precipitaciones .....	71
Tabla 8: Pesos y niveles .....	78
Tabla 9: Primera clasificación de los pesos y niveles de cada categoría .....	79
Tabla 10: Primera Ponderación de Valores .....	81
Tabla 11: Segunda clasificación de los pesos y niveles de cada categoría .....	82
Tabla 12: Segunda Ponderación de Valores .....	83
Tabla 13: Tercera clasificación de los pesos y niveles de cada categoría .....	84
Tabla 14: Valores del Factor K .....	94
Tabla 15: Valores del Factor C .....	97
Tabla 16: Resultados del mapa de cobertura .....	100
Tabla 17: Resultados del mapa de pendientes en porcentaje .....	103
Tabla 18: Resultados del mapa de capacidad de infiltración .....	105
Tabla 19: Resultados del mapa de geología .....	107
Tabla 20: Resultados del mapa de geomorfología .....	109
Tabla 21: Resultados del mapa de factor forma .....	111
Tabla 22: Resultados del mapa de precipitaciones .....	113
Tabla 23: Resultados del mapa de inundaciones extraordinarias .....	115
Tabla 24: Resultados del mapa de inundaciones, considerando PP .....	119

Tabla 25: Resultados del mapa de vulnerabilidad física de la cuenca Huarmey .....	121
Tabla 26: Resultados del mapa de Factor R .....	124
Tabla 27: Resultados del mapa de Factor K .....	126
Tabla 28: Resultados del mapa de Factor LS .....	128
Tabla 29: Resultados del mapa de Factor C .....	130
Tabla 30: Resultados del mapa de cuantificación de la erosión hídrica de la cuenca Huarmey .....	132

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Componentes para la teledetección espacial .....	14
Figura 2: Firmas espectrales típicas de distintas cubiertas .....	15
Figura 3: Espectro Electromagnético .....	16
Figura 4: Comparación de dos imágenes con diferente resolución espacial .....	17
Figura 5: Comparación de resolución radiométrica .....	17
Figura 6: Comparación de bandas espectrales de diferentes sensores .....	18
Figura 7: Bandas 2, 3, 4 y 8 con resolución espacial 10 m. ....	19
Figura 8: Bandas 5, 6, 7, 8a, 11 y 12 con resolución espacial 20 m. ....	19
Figura 9: Bandas 1, 9 y 10 con resolución espacial 60 m. ....	20
Figura 10: Integración de variables .....	22
Figura 11: Ubicación de la Cuenca Huarmey .....	32
Figura 12: División política de la Cuenca Huarmey .....	32
Figura 13: Esquema metodológico de la tesis .....	34
Figura 14: Sitio web Copernicus Open Access Hub .....	35
Figura 15: Selección de la cuenca Huarmey y aplicación de los filtros de búsqueda	36
Figura 16: Archivos abiertos en SNAP .....	39
Figura 17: Imagen corregida .....	40
Figura 18: Mosaico final .....	41
Figura 19: Imagen Satelital de la cuenca Huarmey delimitada .....	42
Figura 20: Llanura arenosa .....	43
Figura 21: Áreas agrícolas .....	44
Figura 22: Matorrales .....	44
Figura 23: Montañas .....	45
Figura 24: Suelo desnudo .....	45

Figura 25: Zonas urbanas .....	46
Figura 26: Cuenca Huarmey en Google Earth Pro .....	46
Figura 27: Zonas en la que recae la cuenca Huarmey .....	47
Figura 28: Ventana para crear el TIN .....	49
Figura 29: TIN resultante .....	49
Figura 30: Ventana TIN a Ráster .....	50
Figura 31: Primer DEM resultante .....	51
Figura 32: DEM de la cuenca Huarmey .....	51
Figura 33: Ventana de la herramienta <i>Slope</i> .....	52
Figura 34: Ventana de <i>Flow Direction</i> .....	57
Figura 35: Ráster de <i>Flow Direction</i> .....	58
Figura 36: Determinación de acumulación de flujo .....	58
Figura 37: Ventana de <i>Flow Accumulation</i> .....	59
Figura 38: Ráster de <i>Flow Accumulation</i> .....	59
Figura 39: Ventana de <i>Raster Calculator</i> .....	60
Figura 40: Ráster de Red de drenaje de la cuenca Huarmey .....	61
Figura 41: Ventana de <i>Stream To Feature</i> .....	62
Figura 42: <i>Shape</i> de red de drenaje .....	62
Figura 43: Ventana de <i>Feature Vertices To Points</i> .....	63
Figura 44: Puntos de desfogue .....	64
Figura 45: Ventana de <i>Watershed</i> .....	65
Figura 46: Ráster de las subcuencas de Huarmey .....	65
Figura 47: <i>Shape</i> de las subcuencas de Huarmey .....	66
Figura 48: Resultados en la tabla de atributos .....	67
Figura 49: Curva de doble masa .....	70
Figura 50: Relación Altura vs. PP media .....	71

Figura 51: Ventana de <i>Spline</i> .....	73
Figura 52: Esquema lógico de la base de datos de los modelos de inundaciones .....	74
Figura 53: Esquema lógico de la base de datos del modelo de vulnerabilidad .....	75
Figura 54: Esquema lógico de la base de datos del modelo USLE .....	75
Figura 55: Ventana de <i>Polygon to Raster</i> .....	77
Figura 56: Uso de <i>ModelBuilder</i> para convertir un <i>shape</i> a ráster .....	77
Figura 57: Uso de <i>ModelBuilder</i> para reclasificar las capas .....	80
Figura 58: Uso de <i>ModelBuilder</i> para la integración de variables .....	81
Figura 59: Conversión de los ráster a capas vectoriales en <i>ModelBuilder</i> .....	83
Figura 60: Intersección de las cinco capas en <i>ModelBuilder</i> .....	85
Figura 61: Cálculo de la Vulnerabilidad de la cuenca Huarmey .....	86
Figura 62: Uso de la calculadora ráster para aplicar la ecuación de Roose .....	88
Figura 63: Uso de <i>ModelBuilder</i> para calcular el Factor R .....	88
Figura 64: Toma de muestras en la unidad Batolito de la Costa .....	90
Figura 65: Toma de muestras en la unidad Depósito Aluvial .....	90
Figura 66: Toma de muestras en la unidad Formación Chimú .....	91
Figura 67: Toma de muestras en la unidad Formación Junco .....	91
Figura 68: Toma de muestras en la unidad Formación La Zorra .....	92
Figura 69: Toma de muestras en la unidad Formación Lupín .....	92
Figura 70: Toma de muestras en la unidad Formación Santa, Carhuaz .....	93
Figura 71: Toma de muestras en el Grupo Calipuy .....	93
Figura 72: Uso de <i>ModelBuilder</i> para hallar el Factor K .....	94
Figura 73: Reclasificación de las pendientes .....	95
Figura 74: Adición del Campo LS en la Tabla de Atributos .....	96
Figura 75: Uso de <i>ModelBuilder</i> para hallar el Factor C .....	97
Figura 76: Modelamiento geoespacial para hallar la ecuación USLE .....	98

Figura 77: Clasificación no supervisada de la cuenca Huarmey .....	101
Figura 78: Clasificación supervisada de la cuenca Huarmey .....	101
Figura 79: Mapa de cobertura de la cuenca Huarmey .....	102
Figura 80: Mapa de pendientes en porcentaje de la cuenca Huarmey .....	104
Figura 81: Mapa de Capacidad de Infiltración de la cuenca Huarmey .....	106
Figura 82: Mapa de Geología de la cuenca Huarmey .....	108
Figura 83: Mapa de Geomorfología de la cuenca Huarmey .....	110
Figura 84: Mapa de factor forma de la cuenca Huarmey .....	112
Figura 85: Mapa de precipitaciones de la cuenca Huarmey .....	114
Figura 86: Mapa de inundaciones extraordinarias de la cuenca Huarmey .....	116
Figura 87: Mapa de inundaciones extraordinarias de la cuenca Huarmey y puntos donde se produjeron inundaciones durante el Niño Costero, según INGEMMET ...	117
Figura 88: Primera vista a detalle del Mapa de inundaciones extraordinarias .....	118
Figura 89: Segunda vista a detalle del Mapa de inundaciones extraordinarias .....	118
Figura 90: Mapa de inundaciones de la cuenca Huarmey, considerando la capa de Precipitaciones .....	120
Figura 91: Mapa de Vulnerabilidad Física de la cuenca Huarmey .....	122
Figura 92: Vista a detalle del Mapa de Vulnerabilidad Física .....	123
Figura 93: Mapa del Factor R de la cuenca Huarmey .....	125
Figura 94: Mapa del Factor K de la cuenca Huarmey .....	127
Figura 95: Mapa del Factor LS de la cuenca Huarmey .....	129
Figura 96: Mapa del Factor C de la cuenca Huarmey .....	131
Figura 97: Mapa de la Identificación y Cuantificación de la Erosión Hídrica de la cuenca Huarmey (USLE) .....	133
Figura 98: Vista a detalle del Mapa de la Identificación y Cuantificación de la Erosión Hídrica de la cuenca Huarmey (USLE) .....	134

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Valores de C correspondiente al tipo de cobertura, según Montes-León et al. 2011 .....	150
Anexo 2: Valores de C correspondiente al tipo de cobertura vegetal, según Wischmeier, citado por Ramos Taipe 2001 .....	151
Anexo 3: Valores de P correspondiente al tipo de prácticas de conservación, según Taipe 2001 .....	151
Anexo 4: Descarga del programa SNAP .....	152
Anexo 5: Descarga de la herramienta Sen2Cor .....	152
Anexo 6: Archivos descargados por cada imagen satelital .....	153
Anexo 7: Uso de la herramienta Sen2Cor .....	153
Anexo 8: Uso de la herramienta Mosaico .....	155
Anexo 9: Extracción de la cuenca .....	158
Anexo 10: Definición de los ROI's de la cuenca .....	160
Anexo 11: Informe de Análisis Especial del Suelo .....	161

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación se desarrolló en la cuenca del río Huarmey, que abarca parte de las provincias Huarmey, Aija y Recuay pertenecientes al departamento de Áncash. Esta cuenca tiene una región costera, donde las lluvias son escasas, y una región andina donde se presentan fuertes precipitaciones anuales, siendo esta la zona más vulnerable a la erosión hídrica. Sin embargo, en marzo del 2017 se produjo el fenómeno del Niño Costero, que originó inundaciones extraordinarias en la región costera. Estas situaciones medio ambientales permitieron observar zonas sensibles a inundaciones y a la erosión hídrica, las cuales fueron ubicadas mediante el modelamiento geoespacial. El primer mapa elaborado fue el de inundaciones extraordinarias, basado en el estudio realizado por Wahid et al. en el 2016, empleando las capas de pendientes, capacidad de infiltración, factor forma y cobertura donde se localizaron las zonas más propensas a ser inundadas ante precipitaciones extraordinarias. La superposición ponderada de dichas capas, permitió determinar que las áreas urbanas, el valle y los depósitos aluviales presentan una alta vulnerabilidad a inundaciones. Un segundo modelo de inundaciones se efectuó usando el mismo procedimiento, pero considerando además el factor de precipitaciones, lo que permitió una mejor identificación de las zonas propensas a inundaciones. El tercer modelo fue de vulnerabilidad física, que mostró que las zonas con vulnerabilidad alta se encuentran en la parte andina de la cuenca, donde las pendientes y precipitaciones son elevadas. Por último, se cuantificó la pérdida de suelo debido a la erosión, con ayuda de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), la cual requirió de las variables de precipitaciones, suelos, pendientes y cobertura. Este modelo mostró que las zonas con mayores cantidades de pérdida de suelo fueron las de vulnerabilidad alta, entre 50 y 200 t/ha.año; y muy alta, mayores a 200 t/ha.año.

Palabras clave: SIG, inundaciones extraordinarias, erosión hídrica, USLE, modelo geoespacial, vulnerabilidad.



## **ABSTRACT**

The present research work was developed in the Huarmey river basin, which covers part of the Huarmey, Aija and Recuay provinces from the Ancash region. This basin has a coastal region with low rainfall, and a mountain region where heavy annual rainfall occurs, making this zone the most vulnerable to water erosion. However, in March 2017, the phenomenon known as Niño Costero occurred, which caused flash floods in the coastal region. These environmental situations revealed which areas were sensitive to flooding and water erosion, and were identified through geospatial modeling. First, the flash flood map was developed based on the study carried out by Wahid et al. in 2016, using the layers of slope, infiltration capacity, shape factor and land use/land cover to identify the areas that were most likely to be flooded as a result of unusually heavy rains. The result of the weighted overlay of these four layers established that the urban areas, the valley and the alluvial deposits presented a high vulnerability to these floods. A second flood model was carried out using the same procedure, but this time the rainfall factor was considered, allowing a better identification of the flood prone areas. The third model was of physical vulnerability, which showed that the areas with High vulnerability were located in the highlands of the basin, because of the steep slopes and heavy rainfall of that region. Finally, the soil loss due to erosion was quantified thanks to the Universal Soil Loss Equation (USLE), which required the variables of rainfall, soils, slopes and coverage. This model showed that the zones with the highest amounts of soil loss were the ones with high vulnerability, between 50 and 200 t/ha.year; and with very high vulnerability, greater than 200 t/ha.year.

Keywords: GIS, flash floods, water erosion, USLE, geospatial model, vulnerability.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se pueden evidenciar los diferentes efectos del cambio climático que se producen a nivel global, y un ejemplo de esto fue el fenómeno que se presentó en la costa peruana en el año 2017, donde se registró un aumento significativo de la temperatura en la temporada de verano y como consecuencia, las precipitaciones en esta zona del Perú aumentaron a niveles atípicos. De este modo, se produjo el fenómeno denominado Niño Costero, el cual, a diferencia del Fenómeno del Niño, este no se anuncia con anticipación, sino que se produce de forma repentina. Durante la temporada del Niño Costero, las precipitaciones se incrementaron a niveles altos en zonas donde las lluvias eran escasas, y esto llevó al origen de inundaciones extraordinarias y procesos de erosión del suelo, tal como ocurrió en la provincia de Huarmey que, en el 16 de marzo del 2017, se produjo un desbordamiento de agua que ocasionó fuertes desastres. Por esta razón, es que la prevención ante este tipo de desastres naturales es importante, para evitar mayores daños.

Debido a este escenario atípico, es que se planteó la generación del modelo geoespacial de Inundaciones Extraordinarias, para simular que efectos puede causar este fenómeno en la cuenca. Utilizando el programa ArcGIS se llevó a cabo la superposición ponderada de las capas de pendientes, capacidad de infiltración, factor forma y cobertura para localizar las zonas susceptibles a precipitaciones inusuales. Esta información tiene como objetivo ser de utilidad para las autoridades, y les permita conocer cuáles son las regiones que requieren de mayor atención para el desarrollo de proyectos de prevención, y de esta forma se pueda aminorar el impacto ante este tipo de desastre. De igual forma, se generó un segundo modelo geoespacial de inundaciones, realizando un procedimiento similar al primero, pero en este caso tomando en cuenta la información de las precipitaciones, para realizar un análisis entre el primer y segundo modelo y compararlos.

Por otro lado, es importante recalcar que en la parte andina de la cuenca, las precipitaciones fuertes suceden anualmente, y la población tiene que lidiar con este problema de manera periódica. Debido a esto, se elaboró un tercer modelo geoespacial de vulnerabilidad física,

que mostró cuáles eran las zonas más propensas a ser afectadas por la erosión hídrica, y para ello se tomaron en cuenta las capas de pendientes, precipitaciones, geología, geomorfología y cobertura.

Finalmente, se elaboró un modelo geoespacial utilizando la ecuación USLE, para cuantificar la pérdida de suelo anual que se producen en la cuenca por la erosión hídrica, el cual requirió de las variables de precipitaciones, suelos, cobertura y pendientes; y de la aplicación de técnicas de Sistema Información Geográfica (SIG). Estos dos últimos modelos, al igual que el primero es de gran importancia, ya que en este caso el escenario que se plantea sucede cada año.

De acuerdo a lo explicado previamente, el objetivo general de esta tesis fue:

Identificar las zonas vulnerables a inundaciones y procesos de erosión, y cuantificar la erosión hídrica en la cuenca del río Huarmey mediante el modelamiento geoespacial y uso del Sistema de Información Geográfica (SIG).

Del mismo modo, los objetivos específicos fueron:

- Elaborar una base de datos geoespacial con la información temática de capacidad de infiltración, cobertura, pendiente, geología, geomorfología y precipitación.
- Realizar el modelamiento geoespacial para identificación y localización de las zonas vulnerables a inundaciones y erosión hídrica.
- Identificar y cuantificar las áreas de riesgos a erosión hídrica mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) y el Sistema de Información Geográfica.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. ANTECEDENTES**

El Perú por su ubicación geográfica y características morfológicas, está sujeto a la manifestación de diversos fenómenos naturales, entre ellos están los peligros hidrometeorológicos, que generan inundaciones en zonas expuestas, los cuales afectan a la población y sus medios de vida (CENEPRED, 2014). Las inundaciones, traen como consecuencia lamentables y cuantiosos decesos, miles de damnificados y significativas pérdidas económicas que reducen la calidad de vida y obstaculizan el desarrollo sostenible del país (INDECI, 2011).

En el 2017, el Perú fue terriblemente golpeado por lluvias intensas, acompañadas de altas temperaturas del mar en la costa durante el verano y el otoño. Este evento se denominó El Niño Costero, que es un fenómeno nuevo, aunque similar al Fenómeno del Niño (Martínez y Takahashi, 2017). Este fenómeno generó lluvias costeras inusuales, las cuales conllevaron a los desbordes de ríos y deslizamientos de lodo y piedras, produciendo daños en las zonas de cultivo e infraestructura como viviendas, carreteras, puentes, canales de riego, colegios, hospitales, entre otros bienes públicos y privados (Aguilar y Reyes, 2017). Así mismo, las quebradas Río Seco, Gramadal y Huarney se activaron y rebasaron la ciudad en pocas horas. Se formaron cinco huaicos que devastaron la ciudad, resultando en 425 viviendas dañadas, 146 colapsadas y 23 inhabitables; mientras que 12 instituciones educativas también fueron afectadas, 11 quedaron inhabitables y otras tres colapsaron. Además, tres establecimientos de salud fueron inundados y a dos de ellos los declararon inhabitables (Urbina, 2017).

Debido a que estos fenómenos producidos por el cambio climático se han producido en otras regiones, existen diversos trabajos de investigación sobre las zonas vulnerables a inundaciones extraordinarias en zonas donde las lluvias usualmente son escasas. Un ejemplo de estos estudios, fue el realizado por Wahid et al. (2016), quienes mencionan la importancia

de la localización de los lugares propensos a las inundaciones para evitar pérdidas económicas y salvaguardar a la población, así como para la planificación del uso del suelo. La zona de estudio de esta investigación fue en la llanura costera del sudoeste del Sinaí, Egipto, la cual cuenta con características geológicas, morfológicas y condiciones climáticas que son responsables de las inundaciones extraordinarias estacionales que pueden amenazar la planificación del uso del suelo en esta área. Por ello, Wahid et al. (2016) realizaron un trabajo de investigación para obtener un mapa de índice potencial de inundaciones, mediante el modelamiento geoespacial de información temática de los datos de uso de suelo/cobertura vegetal, capacidad de infiltración, factor forma y pendiente. En este estudio, se concluyó que los dos factores que más influencia tenían en el potencial de inundaciones extraordinarias fueron las pendientes y la capacidad de infiltración. El fin de esta investigación fue prevenir la pérdida de vidas, daños a la propiedad e impactos ecológicos por inundaciones, antes de que los planes de desarrollo se inicien en esta zona.

Por otro lado, a pesar de que estos eventos extraordinarios ocasionados por el cambio climático deben de tomarse en cuenta para el desarrollo de modelos geoespaciales, las precipitaciones de altas magnitudes que se producen anualmente en la zona andina, generan desastres a causa de la erosión hídrica, por lo que también es de importancia la generación de modelos tomando en cuenta el factor de las lluvias.

Los procesos de erosión del suelo pueden producirse de manera progresiva a lo largo del tiempo, siendo imperceptible, o de manera abrupta con una pérdida significativa de suelo en corto tiempo. Así mismo, la erosión puede producirse tanto de manera natural por efectos del agua o el viento, como por la actividad humana. Esta pérdida de suelos que se producen tiene como consecuencias la degradación del suelo, la reducción de la productividad agrícola y la contaminación de fuentes cercanas de agua (Telkar y Pote, 2014).

La cuenca Huarmey está comprendida por zonas de costa y andina, donde la vegetación se produce a diferentes niveles. En la parte baja de la cuenca, la vegetación es escasa y la que existe solo depende de la zona agrícola de los valles, abarcando un área mínima. En la zona alta de la cuenca, es donde se encuentra la mayor vegetación de la cuenca, sin embargo, esta se va reduciendo cada vez más producto del sobre pastoreo y la quema de pastos, trayendo como consecuencia de esto una mayor erosión de los suelos (Manrique et al. 2018).

Existen diferentes trabajos de investigación en las cuales se han generado modelos geoespaciales, para determinar las zonas más vulnerables a erosión hídrica, así como para cuantificar la pérdida de suelo que se produce al año. Montes-León et al. (2011), realizaron un estudio para elaborar el Mapa Nacional de Erosión Potencial, que tuvo como finalidad encontrar las áreas más vulnerables de México a la erosión potencial, así como la cantidad de suelo que se perdía al año, utilizando las herramientas SIG y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE). La razón por la cual este mapa era de importancia, fue el registro de diferentes problemas surgidos a causa de la erosión hídrica. La pérdida de suelos que se venía produciendo en la región, originó la desaparición de zonas agrícolas, la disminución en los niveles de nutrientes de la tierra, daños en el área urbana donde llegaban los materiales acumulados, alteraciones en el ciclo hidrológico, impactos negativos en la biodiversidad y maltrato a las obras hidráulicas, disminuyendo su vida útil. Estas dificultades que se han presentado en México, debían ser atendidas, para lo cual el mapa de erosión de la zona permitió, además de la identificación de las zonas más susceptibles, el reconocimiento de los lugares donde se puedan desarrollar planes de conservación, y otros proyectos, como la reforestación, que disminuyan el impacto de la erosión en el ambiente (Montes-León et al. 2011).

## **2.2. VULNERABILIDAD**

En el marco de la Ley N° 29664 del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y su Reglamento (D.S. N°048-2011-PCM) se define la vulnerabilidad como la susceptibilidad de la población, la estructura física o las actividades socioeconómicas, de sufrir daños por acción de un peligro o amenaza (CENEPRED, 2014).

INDECI (2006) define la vulnerabilidad, como el grado de debilidad o exposición de un elemento o conjunto de elementos frente a la ocurrencia de un peligro natural o antrópico de una magnitud dada. Es decir, la predisposición intrínseca de como un elemento (infraestructura, vivienda, actividades productivas, grado de organización, sistemas de alerta y desarrollo político-institucional, entre otros), puede sufrir daños humanos y materiales cuando no se ha invertido lo suficiente en obras o acciones de prevención y mitigación y se ha aceptado un nivel de riesgo demasiado alto.

Se han establecido los siguientes tipos de vulnerabilidad: Física, ambiental y ecológica, económica, social, educativa, cultural e ideológica, política e institucional, y, científica y tecnológica (INDECI, 2011).

Por otro lado, SINAGERD (2014) alerta que el 46 por ciento del territorio nacional se encuentra en condiciones de vulnerabilidad Alta a Muy Alta y que, además el 36.2 por ciento de la población nacional (9'779,370 habitantes aproximadamente) ocupan y usan este espacio territorial.

### **2.3. INUNDACIÓN**

La inundación es un proceso de desbordamiento del agua fuera del cauce natural o artificial. Se producen cuando las lluvias intensas o continuas sobrepasan la capacidad de campo del suelo, el volumen de transporte del río es superado y el cauce principal se desborda e inunda los terrenos circundantes (INDECI, 2011). Según las estadísticas, el 40 por ciento de las víctimas por desastres naturales, se debieron por inundaciones, convirtiéndolo en uno de los fenómenos más letales. Esto es reforzado por el hecho de que más de la mitad de la población mundial vive en las costas y a lo largo de ríos y estuarios. (Martínez, 2007).

El INDECI (2011), clasifica las inundaciones según su duración y su origen. Por su duración se clasifican como inundaciones rápidas e inundaciones estáticas; y según su origen, como inundaciones pluviales, inundaciones fluviales e inundaciones por operaciones incorrectas de obras de infraestructura hidráulica o rotura.

### **2.4. INUNDACIÓN EXTRAORDINARIA**

El Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos, citado por UCAR (2010), establece que este tipo de inundaciones se producen rápidamente con caudales muy altos y en zonas generalmente secas, a causa de precipitaciones intensas. Se estima que el tiempo aproximado que tarda en ocurrir este evento es de seis horas, aunque esto puede variar en diferentes lugares.

Así mismo, las inundaciones extraordinarias suelen caracterizarse por las fuertes precipitaciones y el rápido desarrollo de escorrentía. De estos dos factores, las características

del suelo donde caen estas precipitaciones, son las más relevantes para el desarrollo de predicciones de este fenómeno (UCAR, 2010).

Las propiedades del suelo como la humedad, alteraciones a la superficie, permeabilidad y perfil vertical; y las características de la cuenca como tamaño, forma, pendiente y cobertura de suelo, son las que influyen en la producción de escorrentía y por ende en la ocurrencia de inundaciones extraordinarias, razón por la cual forman parte de la data a tener en cuenta para la predicción de estos eventos (UCAR, 2010).

## **2.5. EL NIÑO COSTERO**

El Niño Costero es un evento climático que, independientemente de los procesos físicos que lo puedan originar, está relacionado a la presencia de aguas anómalamente cálidas en forma persistente durante varios meses en la región del Océano Pacífico, principalmente a lo largo de la costa norte del Perú y de Ecuador. En algunos casos las aguas cálidas pueden extenderse hacia la costa central y sur del Perú. Este evento puede estar asociado a lluvias muy fuertes durante el verano en las zonas medias y bajas de la costa norte e inclusive de la costa central, así como a impactos en el ecosistema marino peruano, de acuerdo a su magnitud y persistencia (IMARPE, 2018).

La terminología de “El Niño Costero” fue introducida formalmente por el Comité Multisectorial encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) integrado por el Instituto del Mar del Perú, Servicio Nacional de Meteorología e Higiología (SENAMHI), Instituto Geofísico del Perú (IGP), Dirección de Hidrografía y Navegación (DHN), Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en el año 2012, con el fin de precisar las definiciones y conceptos que por años han causado confusión entre la población.

## **2.6. EROSIÓN**

De acuerdo a Tayupanta (1993), el suelo al estar en contacto con factores externos físicos o químicos, puede tender a presentar cambios en la superficie, y a este desgaste del material del suelo se le conoce como erosión. Los suelos van perdiendo parte de su estructura durante el año, y esto se debe a dos factores, que son el aire y el agua (Telkar y Pote, 2014).



A nivel global de la superficie terrestre, existen diferentes tipos de erosión que pueden agruparse en seis categorías: erosión hídrica, erosión eólica, erosión fluvial, erosión marina y litoral, erosión glaciaria y erosión kárstica (Arias, 2006). Para Kirkley y Morgan (1984); citado por Arias (2006), a la escala reducida de un talud y zonas aledañas, los únicos que revisten importancia son la erosión eólica y sobre todo la erosión hídrica.

## **2.7. EROSIÓN HÍDRICA**

La erosión hídrica es el proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de las partículas del suelo causado por la acción del agua que disminuye la productividad de los suelos y afecta la salud de los ecosistemas. La erosión hídrica es el principal problema que compromete la sustentabilidad de todos los sistemas productivos. La estimación de pérdidas de suelo por este fenómeno es una información de suma importancia para la planificación y toma de decisiones a diferentes niveles (Gaitán et al. 2017).

Arias (2006) menciona cuatro tipos de erosión hídrica: La erosión laminar, erosión por arroyada anastomosada, erosión por surcos y la erosión cárcavas.

- **Erosión Laminar:** Para Howell et al. (1979); citado por Arias (2006), consiste en la remoción de delgadas capas de suelo producida por el agua que fluye por terrenos uniformes y de poca pendiente, ocasionando la pérdida de la porción de suelo con mayor contenido en materia orgánica, causando un empobrecimiento en elementos nutrientes y un descenso de la capacidad de almacenamiento de agua.
- **Erosión por Arroyada Anastomosada o Trenzada:** La lámina de agua no suele discurrir a mucha distancia, concentrándose en las pequeñas depresiones e irregularidades del terreno, formando pequeños hilillos de corriente no jerarquizado y de trayectoria cambiante, siendo sus efectos similares a los producidos por el flujo laminar.
- **Erosión en Regueros o 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 (FAO, 2000; citado por Cabrejos, 2016).

- Erosión por Cárcavas: es el estado más avanzado de la erosión por surcos. Dependiendo de la pendiente y la longitud de la ladera del terreno, el flujo concentrado de agua provoca el aumento de las dimensiones de los surcos, hasta transformarse en zanjas de gran tamaño llamadas cárcavas.

El proceso de erosión hídrica involucra tres etapas en las cuales se producen daños importantes: preparación del material (desprendimiento y remoción), transporte y sedimentación.

En la etapa de preparación del material se produce una alteración de la estructura superficial del suelo, destrucción de agregados, formación de costras y sellos, alteración de la relación infiltración/escurrimiento y pérdida de fertilidad del suelo. En la etapa de transporte se completa la pérdida de las partículas del suelo (materiales coloidales como materia orgánica, humus, y nutrientes) iniciada en la etapa anterior, y se genera el escurrimiento superficial que produce distintas formas de erosión (laminar, en surcos y/o en cárcavas) y daños a la infraestructura. En la etapa de sedimentación el depósito del material puede destruir cultivos, dañar la infraestructura (caminos, vías férreas, etc.) y colmatar y reducir la capacidad de represas y embalses (Gaitán et al. 2017).

## **2.8. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EROSIÓN HÍDRICA**

Entre los factores que determinan la erosión hídrica, Bascuñán (2010) menciona que son, tectónicos, litológicos, edafológicos, morfológicos, e incluso antrópicos, y que en conjunto forman un entramado complejo interdependiente a lo largo del tiempo.

Morgan y Rickson, citado por Arias (2006) señalan que, a la escala reducida de un talud, y a corto plazo, los factores que controlan la erosión son el clima con su agresividad o erosividad, la naturaleza del terreno con su mayor o menor erosionabilidad, el relieve topográfico con su pendiente, longitud y forma de la vertiente, y la cobertura vegetal propia o implantada en su superficie.

El análisis y la evaluación de la vulnerabilidad del territorio a los procesos erosivos y a las inundaciones por acción de las aguas pluviales, implica conocer las características del

material parental, tipos de suelos, variabilidad climática, tipos de cobertura vegetal, formas de relieve, pendiente, entre otros, que son los factores más importantes que determinan la vulnerabilidad de una zona. En tal sentido, el grado de vulnerabilidad a la erosión deberá ser definido sobre la base de su geología, geomorfología, suelos, clima, pendiente y cobertura vegetal, cuyo análisis e integración se realiza con el SIG (Montalvo, 2015).

### **2.8.1. Precipitación**

Las áreas con grandes precipitaciones son propensas a ser más vulnerables que las áreas con baja precipitación. Para Vásquez (2000); citado por Cabrejos (2016), establece que las precipitaciones que se producen en una zona, guardan una fuerte relación con la escorrentía que se genere en el lugar, así mismo el factor viento influye en el impacto que tenga las precipitaciones en el suelo, ya que puede alterar la velocidad de la lluvia, variando el ángulo de impacto, produciéndose una fuerte erosión.

### **2.8.2. Pendiente**

Es uno de los factores que valora el grado de inclinación del sustrato litológico en las diferentes geoformas. Se debe tener en cuenta que las zonas con poca inclinación o pendiente, son menos vulnerables a la erosión en comparación de las zonas con pendientes muy empinadas.

### **2.8.3. Cobertura Vegetal**

Se debe considerar los parámetros de fisonomía, tamaño y porte de las especies que habitan en la unidad; así como también la cobertura, que se refiere a la densidad de especies vegetales, y al número de estratos. Por lo tanto, zonas de mayor cobertura arbórea y mayor número de estratos, son menos vulnerables a la erosión.

### **2.8.4. Tipo de Suelos**

Para Vásquez (2000); citado por Cabrejos (2016), la resistencia que tenga un suelo ante el desprendimiento de sus partículas por efecto de fuertes escorrentías y la capacidad de

infiltración del suelo, será determinado por las propiedades físicas de estructura, textura, contenido de materia orgánica, entre otros.

### **2.8.5. Geología**

Para el análisis de esta variable se debe tener en consideración el tipo de material parental, el ambiente de depositación, el grado de alteración, el grado de cohesión de los minerales que forman las rocas y en menor grado los procesos endógenos y exógenos que afectaron las secuencias litoestratigráficas. Debido a esto, toda zona que posee material parental inconsolidado es más vulnerable, ya que poseen baja estabilidad por su falta de cohesión y está expuesta a la constante alteración de la naturaleza. Por otra parte, las zonas con material más consolidado, como las rocas de alta compactación, son menos vulnerables a la erosión.

### **2.8.6. Geomorfología**

Están estrechamente relacionadas con la variable geológica a través de los parámetros morfométricos como la declividad, amplitud altimétrica y los grados de disección, condicionando la acción de los procesos geodinámicos que también califican cuando interactúan. En el caso de la erosión, las formas de tierra tipo terrazas altas o medias son menos vulnerables, que las formas montañosas. Por otro lado, los relieves planos o terrazas bajas, cercanos a las márgenes de los ríos son más inestables por su exposición permanente a los fenómenos naturales como las inundaciones.

## **2.9. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)**

Actualmente, se puede recopilar una gran cantidad de datos sobre diferentes temas, y si estos se encuentran georreferenciados, existe una manera eficiente de manejar esta data, la cual es mediante los sistemas de información geográfica.

El Sistema de Información Geográfica (SIG) se define como un sistema completo, formado por cinco componentes (personal capacitado, datos espaciales y descriptivos, métodos analíticos, *hardware* y *software*), cuyo propósito es proporcionar un marco espacial para apoyar las decisiones para el uso inteligente de los recursos de la tierra y gestionar el entorno creado por el hombre (Zeiler, 1999).

Por otro lado, Kuroiwa (2002) menciona que los SIG están cambiando los procedimientos de administración de datos y los procesos analíticos, al emplearse para ayudar a la toma de decisiones, al proporcionar varias alternativas para la planificación del desarrollo, incluyendo datos socioeconómicos, la conservación del medio ambiente, y el manejo adecuado de los recursos del país. Afirma también que están siendo utilizados para modelar los peligros naturales, la vulnerabilidad y los riesgos, con resultados de suma utilidad en los escenarios geográficos.

El *software* del sistema tiene la capacidad de soportar modelos o representaciones de la realidad atentos a puntos de vista, percepciones o intereses heterogéneos. Ello se plasmará tanto en la información que se seleccionará, como en la manera de organizarla en el programa (Moreno et al. 2008).

Según Buzai (2008), son dos modelos utilizados computacionalmente para representar la información obtenida de las diferentes unidades espaciales: el modelo ráster y el modelo vectorial.

El modelo ráster se caracteriza por dividir el espacio geográfico mediante una matriz cuadrículada, donde cada celda tiene información correspondiente a la característica dominante en ella. Cada celda es una localización, técnicamente se denomina píxel (*picture element*) y es la unidad mínima de representación espacial. Por otro lado, el modelo vectorial organiza los datos geográficos en base a la perspectiva de bases de datos relacionadas y a partir de esto permite trabajar digitalmente utilizando las tres entidades gráficas que se usan para confección de mapas: puntos, líneas y áreas. Hoy en día los SIG combinan ambos tipos de estructuras según la precisión de los datos con los que se va a operar.

Los *softwares* más avanzados, como el ArcGIS, proporcionan al usuario un conjunto de objetos prediseñados listos para ser usados, así como también la posibilidad de desarrollar objetos nuevos. De esta manera se dispone de la capacidad de construir una representación del espacio geográfico más realista y poderosa, pero también más compleja (Zeiler, 1999); pudiendo desarrollar tareas tanto simples como avanzadas, incluyendo mapeo, administración de datos, análisis geográfico, edición de datos y geoprocésamiento.

## 2.10. TELEDETECCIÓN

Cuando se quiere caracterizar alguna región de interés, se pueden realizar diferentes actividades, por ejemplo, un levantamiento topográfico, muestras de tipo de suelo, visitas de campo, entre otras muchas más. Sin embargo, cuando toda esta información va de la mano de una fotografía aérea o espacial de la zona de estudio, esto logra que toda la data tomada previamente, cobre mayor sentido, ya que estas fotografías se convierten en herramientas audiovisuales que permiten que cualquier usuario distinga con claridad las propiedades y atributos que posee la región y cómo éstas pueden variar a lo largo del tiempo.

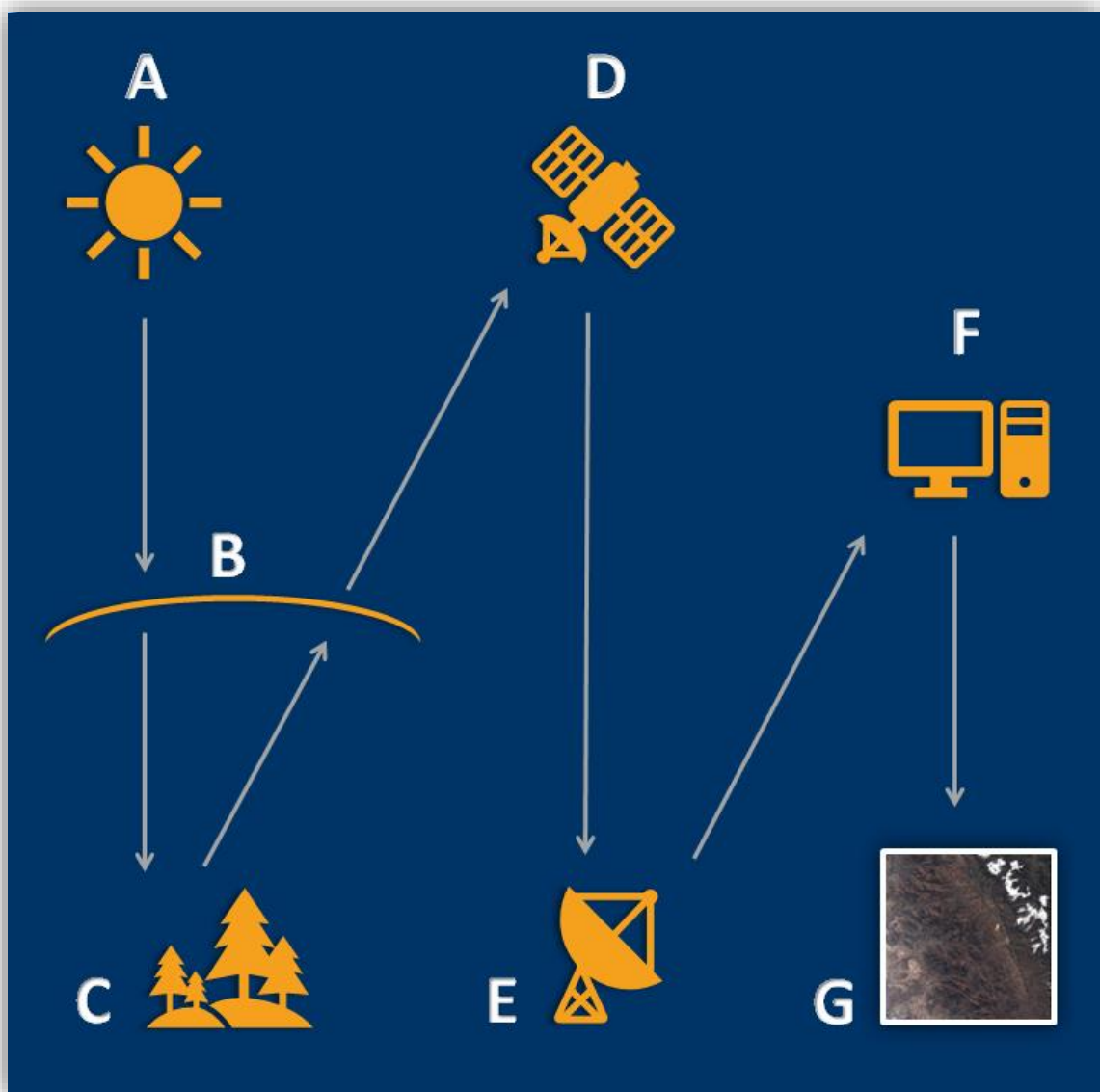
Chuvieco (1995) indicó que la definición de teledetección incluye tanto la toma de imágenes desde el espacio o el aire de un área de estudio, así como de los procedimientos que siguen para tratar dicha data según el uso que se le va a dar. Existen dos maneras de realizar una percepción remota, la primera es la teledetección aérea, realizada mediante aviones especiales y la segunda es la teledetección espacial, que es la recopilación de fotografías mediante sensores espaciales, siendo ésta el método más innovador.

Actualmente, debido a que existe la disponibilidad de imágenes satelitales de manera gratuita, la percepción remota por medio de satélites es la que será definida en el presente estudio.

De acuerdo con Labrador García et al. (2012), la teledetección espacial cuenta con siete componentes para su desarrollo:

- El primero de éstos, es la fuente de energía que permite iluminar los elementos de estudio. El principal ejemplo es la radiación proveniente del sol (A).
- El segundo, es la atmósfera, la cual es atravesada por la energía que viaja de la fuente al objeto de interés (B).
- El tercero, es el conjunto de elementos sobre la superficie terrestre, que se desea observar. Los objetos se distinguen por la diferente radiación que refleja cada uno de ellos (C).
- El cuarto es el sensor que se encuentra en el satélite, cuya función es recopilar la radiación reflejada (D).

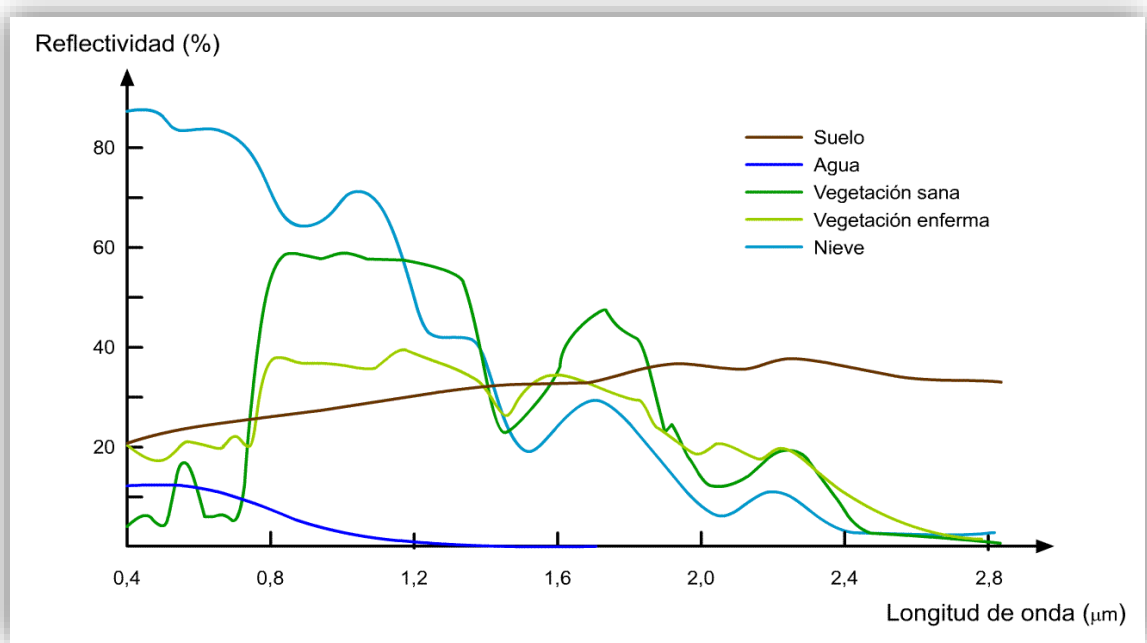
- El quinto es la estación que recibe la data de la radiación reflejada y la procesa para convertirla en imágenes digitales (E).
- El sexto elemento es el proceso para interpretar la imagen digital con el fin de obtener información de los objetos de interés (F).
- El último componente consiste en la aplicación de estas imágenes para el desarrollo de estudios, resoluciones de problemas de la zona, etc (G).



**Figura 1:** Componentes para la teledetección espacial

### 2.10.1. Radiación Electromagnética

La fuente de energía al entrar en contacto con los elementos sobre la superficie terrestre, cada uno de estos objetos emitirá y/o reflejará una radiación electromagnética diferente, que se denomina signatura espectral (Castaño Fernández et al. 1996).

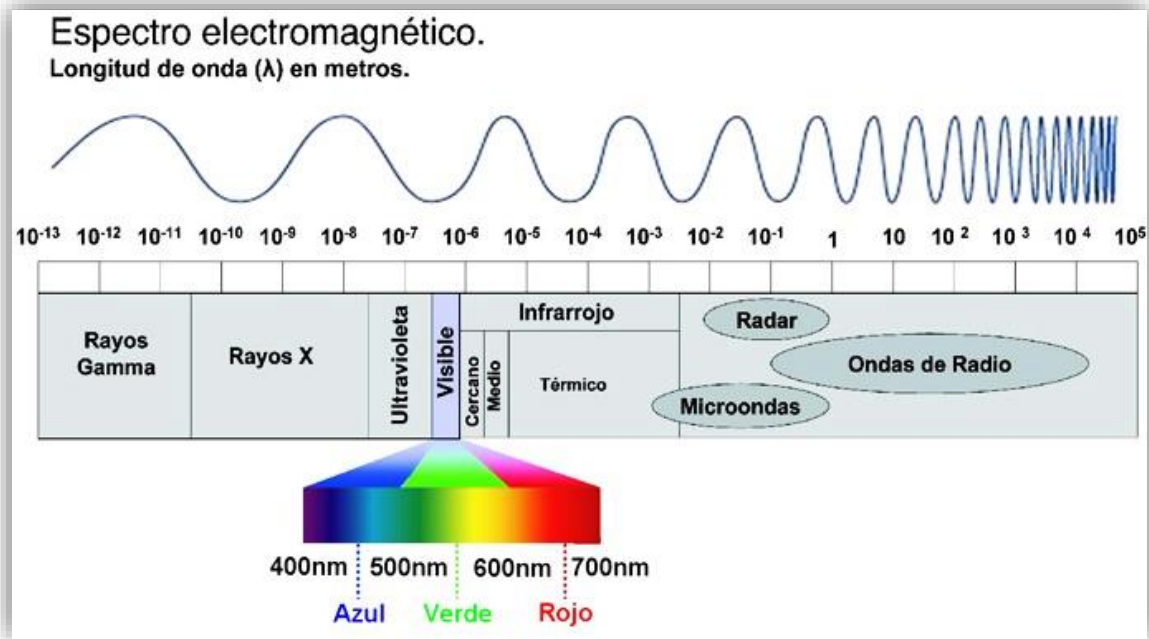


**Figura 2:** Firmas espectrales típicas de distintas cubiertas (Fuente: Tomado de Piazzese y Oñate 2004)

La energía electromagnética, que es emitida por los objetos, está conformada por la longitud de onda y la frecuencia. El espectro electromagnético es donde estos dos componentes se muestran de forma continua. Así mismo, las bandas espectrales son diferentes fragmentos del espectro, que son captados por los sensores. Debido a que el ojo humano, es un sensor, éste puede percibir una parte del espectro, denominada “Espectro Visible” (Schomwandt, 2015).

Según Labrador García et al. (2012), las unidades en que se mide la longitud de onda electromagnética son los micrómetros ( $\mu\text{m}$ ,  $10^{-6}$  m.) o nanómetros (nm,  $10^{-9}$  m.). De esta manera, los valores de longitud de onda se reflejan en el espectro en dichas unidades, lo que permite su división en diferentes zonas, como la visible, ultravioleta y demás, que se muestran en la Figura 3.





**Figura 3:** Espectro Electromagnético (Fuente: UNAM 2016)

### 2.10.2. Resolución de las imágenes satelitales

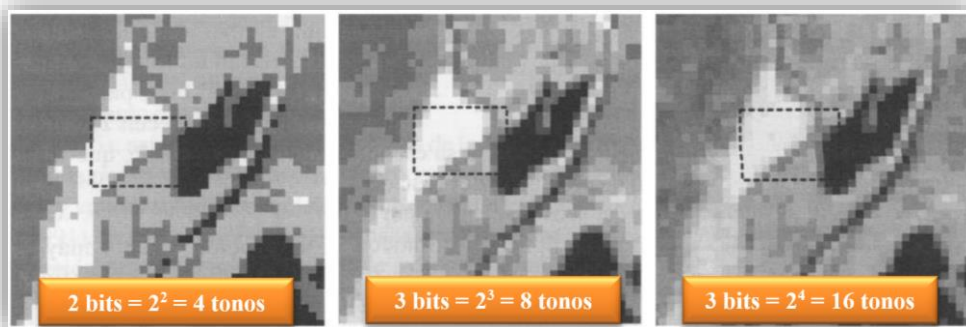
Existen diferentes tipos de sensores espaciales, que obtienen información de la superficie terrestre en distintas resoluciones. Los cuatro tipos de resoluciones que posee una imagen satelital son la espacial, la radiométrica, la espectral y la temporal. Estas cuatro resoluciones permiten al usuario distinguir entre todas las imágenes que se cuente de una región de interés, para que utilicen las adecuadas, dependiendo de la aplicación que se les quiera dar.

- Resolución Espacial: Las imágenes satelitales están compuestas por un conjunto de píxeles, que son la mínima unidad que capta un sensor remoto. Esta resolución indica la longitud que posee el píxel de la imagen. Por ejemplo, si se comparan dos imágenes, donde la primera cuente con una resolución de 0.5 m., que es la longitud del píxel, y la segunda posea una resolución de 2 m., la primera permitirá visualizar objetos más pequeños, que en la segunda no podrán ser identificables (Labrador García et al. 2012).



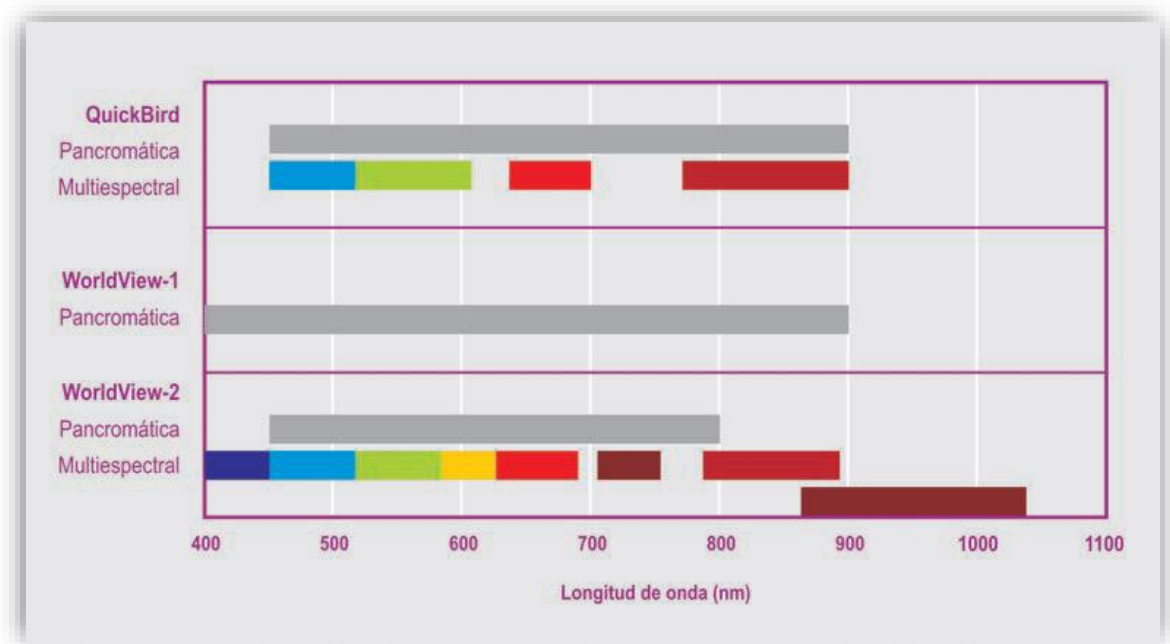
**Figura 4:** Comparación de dos imágenes con diferente resolución espacial (Fuente: Adaptado de SATELMAC, citado por Labrador García et al. 2012)

- **Resolución Radiométrica:** cada sensor posee la capacidad de detectar diferentes niveles de radiancia espectral, es así que cuando un sensor puede captar mayores variaciones de radiancia, éste posee una resolución mayor que una que detecta menos variaciones. Si se toma como ejemplo un sistema fotográfico, su resolución radiométrica dependerá del número de los diferentes tonos de grises que capte el sensor (Chuvieco, 1995). Así mismo, en el caso de los sensores espaciales, con los que se obtiene una imagen digital, la resolución radiométrica depende de la cantidad de bits que se requieren para que un píxel sea almacenado, es así que, un sensor de 8 bits, se traduce en  $2^8 = 256$  Niveles Digitales que percibirá el sensor (Sarría, 2003).



**Figura 5:** Comparación de resolución radiométrica (Fuente: Adaptado de Chuvieco, citado por Roberto et al. 2018)

- Resolución Espectral: este indicador permite saber cuántas bandas espectrales capta un sensor, así como su localización en el espectro electromagnético y el ancho de banda que poseen. Mientras el sensor capta un mayor número de bandas, la resolución será mejor; sin embargo, la elección de las bandas dependerá del uso que se les dé a las imágenes (Roberto et al. 2018).



**Figura 6:** Comparación de bandas espectrales de diferentes sensores (Fuente: Tomado de Labrador García et al. 2012)

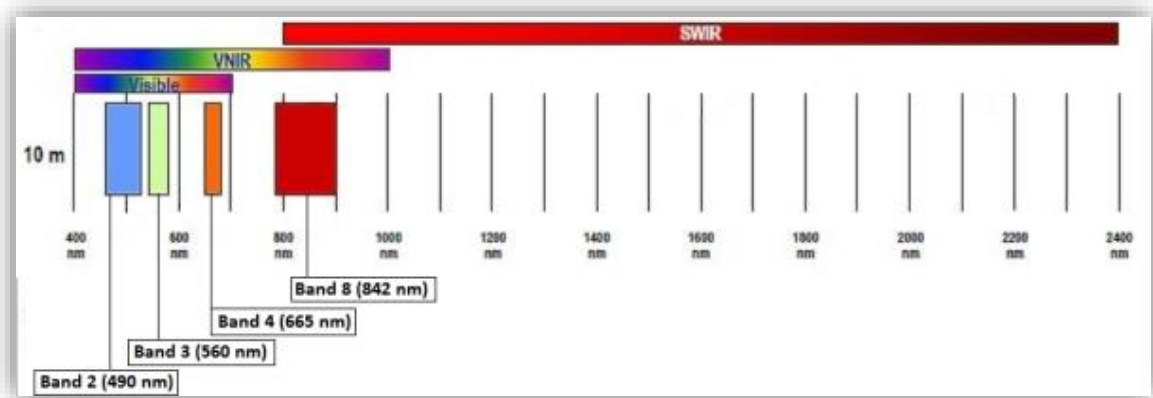
- Resolución Temporal: es el tiempo que toma un sensor. para volver a tomar una imagen de una misma área de la superficie de la Tierra. Es el período que le toma visitar una misma zona (Roberto et al. 2018).

## 2.11. IMÁGENES SATELITALES: SENTINEL-2

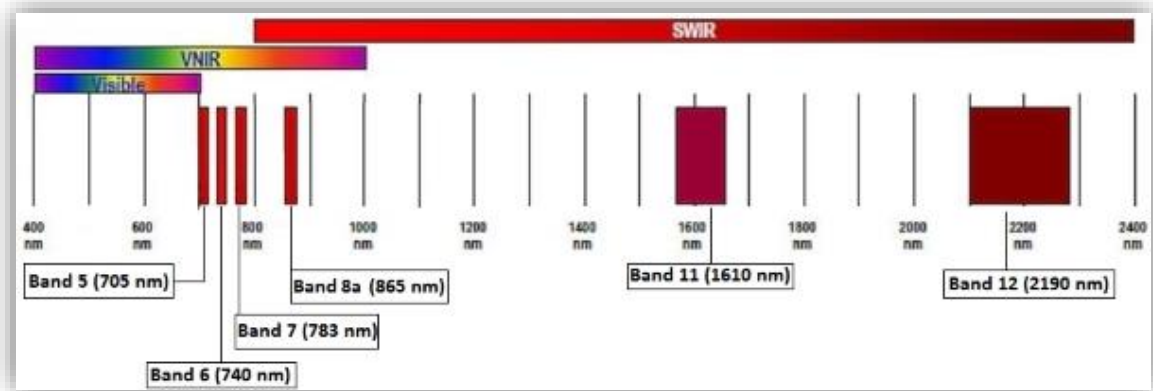
En este estudio se utilizaron las imágenes satelitales de Sentinel-2. De acuerdo a ESA (2012), el Sentinel-2 es una misión desarrollada por el programa Copernicus de la European Space Agency (ESA) y está conformado por dos satélites idénticos, el Sentinel-2A (lanzado el 23 de junio del 2015) y el Sentinel-2B (lanzado el 07 de marzo del 2017), que vuelan en lados opuestos de la misma órbita simultáneamente. Además, cuenta con una cámara

multiespectral (MSI) con 13 bandas espectrales y un ancho de barrido de 290 km., cuyas imágenes tienen las siguientes resoluciones:

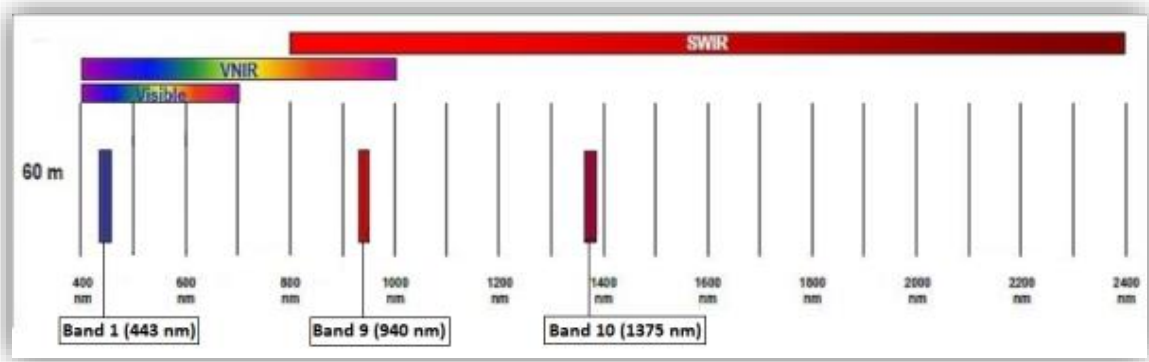
- La resolución espacial de 4 bandas espectrales es de 10 m. (figura 7), la de 6 bandas es de 20 m. (figura 8) y la de 3 es de 60 m (figura 9).



**Figura 7:** Bandas 2, 3, 4 y 8 con resolución espacial 10 m. (Fuente: Tomado de ESA 2012)



**Figura 8:** Bandas 5, 6, 7, 8a, 11 y 12 con resolución espacial 20 m. (Fuente: Tomado de ESA 2012)



**Figura 9:** Bandas 1, 9 y 10 con resolución espacial 60 m. (Fuente: Tomado de ESA 2012)

- La resolución temporal de cada satélite es de 10 días, pero en conjunto es de 5 días en la línea ecuatorial con condiciones climáticas de cielo despejado
- La resolución radiométrica es de 12 bits.
- La resolución espectral de las imágenes del Sentinel-2A y Sentinel-2B se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Resoluciones espacial y espectral de los sensores Sentinel-2 (Fuente: Tomado de ESA 2012)

Resolución Espacial (m)	Número de Banda		Sentinel-2A	Sentinel-2B
			Longitud de onda (nm)	Longitud de onda (nm)
10	2	(azul)	496.6	492.1
	3	(verde)	560.0	559
	4	(rojo)	664.5	665
	8	(IR cercano)	835.1	833
20	5	(red edge)	703.9	703.8
	6	(red edge)	740.2	739.1
	7	(red edge)	782.5	779.7
	8a	(red edge)	864.8	864
	11	(SWIR)	1613.7	1610.4
	12	(SWIR)	2202.4	2185.7
60	1	(aerosoles)	443.9	442.3
	9	(vapor de agua)	945.0	943.2
	10	(nubes)	1373.5	1376.9

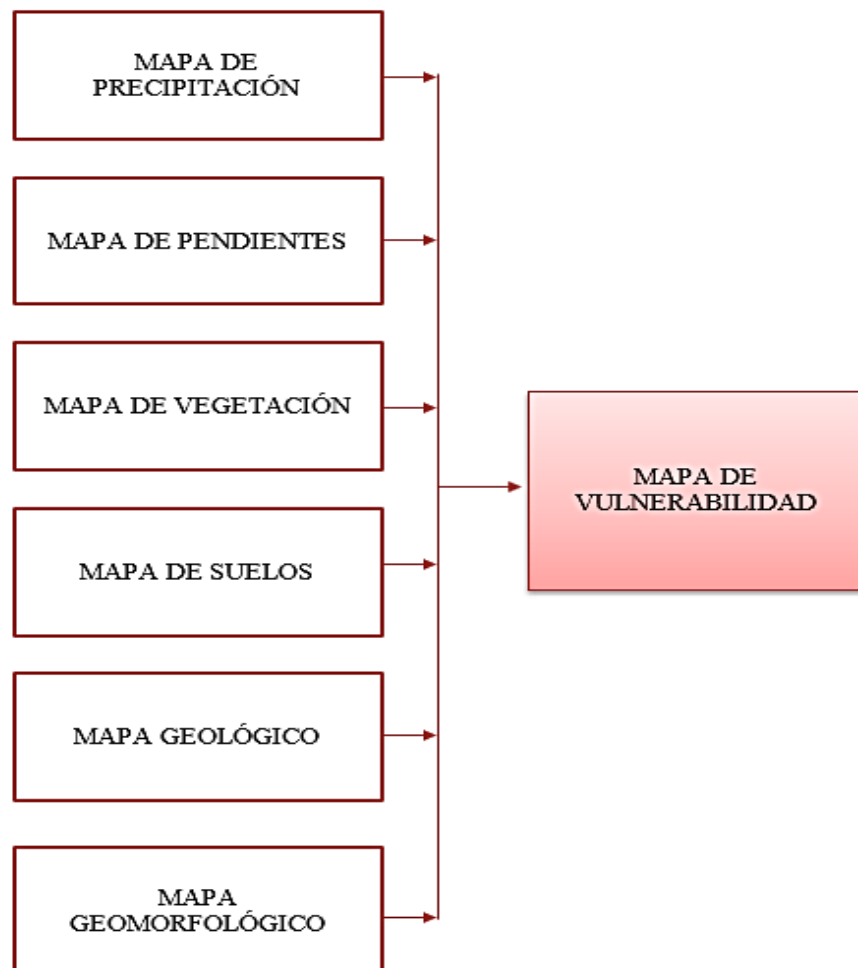
Así mismo, los productos que genera Sentinel-2 han sido agrupados de acuerdo al nivel de procesamiento en la que se encuentra la imagen multispectral. El Nivel-0 representa la data comprimida sin procesar que será la base para obtener los demás productos. Luego, se obtiene el Nivel-1a, que es la data sin procesar descomprimida. En el Nivel-1b, la imagen es corregida radiométricamente en valores de radiancia en techo de atmósfera, o *Top-Of-Atmosphere* (TOA), y se provee un modelo geométrico refinado que servirá en el siguiente nivel de procesamiento. El producto en el Nivel-1c es una orto-imagen en la proyección UTM/WGS84, obtenida gracias al uso de un DEM (90 m.); además, cada banda espectral fue redimensionada, generando imágenes con distancias entre los centros de los píxeles medidos en el suelo, o *Ground Sample Distance* (GSD), de 10 m., 20 m. y 60 m. de acuerdo a la banda; de igual forma, la reflectancia por píxel es calculada en TOA (codificada en 12 bits) y se generan las máscaras de nubes y suelo/agua (ESA, 2012). Finalmente, en el Nivel-2a se obtiene un producto con correcciones atmosféricas, que resulta de la transformación de la reflectancia TOA a una reflectancia a nivel de superficie, o *Bottom-Of-Atmosphere* (BOA) de lo generado en el Nivel-1c, y de igual forma se incluye una clasificación de escenas (nubes, sombra de nubes, vegetación, suelos/desiertos, agua, nieve, etc.), según ESA (2019). Del total de productos hallados en los diferentes niveles (0, 1a, 1b, 1c y 2a), Sentinel-2 solo pone a disposición del público las imágenes en el Nivel-1c y Nivel-2a, los cuales podrán ser utilizados para trabajos de gestión de riesgo, ordenamiento territorial, agricultura, entre otros; y en el caso del presente estudio, estas imágenes fueron empleadas para hallar la capa de cobertura de la cuenca Huarmey.

## **2.12. MODELAMIENTO GEOESPACIAL**

El modelamiento es un procedimiento donde se realiza la integración de capas temáticas existentes y el diseño de un sistema para la creación de nuevos mapas, y poder efectuar un análisis de datos correcto. De esta manera, para realizar el modelamiento, el analista debe organizar los procedimientos necesarios para diseñar e identificar toda la data necesaria para el estudio. El modelo resultante será una representación gráfica simplificada de la realidad, que servirá como fuente de documentación y referencia para futuros estudios. La precisión del modelo final, será definida por la calidad de los datos recogidos. La principal razón para construir un modelo, es su uso en la predicción de eventos desconocido, por ejemplo, la longitud de un elemento, el cual no puede ser medido de manera directa o la condición futura de un fenómeno de interés (Trodd, 2005).

Una de las etapas más importantes en el procedimiento para construir un modelo geoespacial, es la identificación de factores que influyen en el estudio que se planea realizar. Dependiendo de cada modelo, se preparan matrices donde se representará el modo y el peso en el que las variables y los atributos influirán. De igual forma, se asignan calificaciones a los atributos de los submodelos, mediante el *software* del Sistema de Información Geográfica utilizado. (Trodd, 2005 y Rodríguez, 2007).

De acuerdo con Montalvo (2015), se lleva a cabo una integración de variables en un esquema, tal como se muestra en la Figura 10, el cual es un ejemplo para obtener el mapa de vulnerabilidad. Cada variable posee un valor de acuerdo a la incidencia en el objetivo del modelo.



**Figura 10:** Integración de variables (Fuente: Tomado de Montalvo 2015)

## 2.13. MÉTODO DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS (USLE)

El Método de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (Universal Soil Loss Equation, USLE), fue desarrollado en Estados Unidos por Wischmeier y Smith en 1965 y modificado en 1978. Esta ecuación evalúa principalmente la erosión laminar o erosión “entre surcos” y la erosión en surcos en forma conjunta, no así a la erosión por escurrimiento o “flujo concentrado” cuya expresión máxima es la formación de cárcavas (Marelli, 1988; citado por Gaitán et al. 2017).

Mancilla (2008) afirma que el método USLE permite predecir la pérdida anual de suelo por hectárea y también precisar las técnicas más apropiadas para el laboreo del suelo, en especial para cultivos agrícolas. Por otro lado, Gaitán et al. (2017) menciona que la USLE es un método que se puede aplicar en cualquier región, de allí el termino universal, ya que considera los principales factores que intervienen en el proceso de erosión hídrica (precipitaciones, suelo, relieve, coberturas y prácticas de conservación); además permite predecir la erosión actual y realizar simulaciones con diferentes escenarios.

La representación matemática de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo es:

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

En donde:

A = es la pérdida de suelo total (t/ha.año)

R = es el índice de erosividad de la precipitación (MJ.mm/ha.h.año)

K = es el factor de la erodabilidad del suelo (t.ha.h/ha.MJ.mm).

L = es el factor de longitud de la pendiente

S = es el factor de inclinación de la pendiente

C = es el factor de la cobertura vegetal

P = es el factor de prácticas de conservación



### 2.13.1. Factor de Precipitación (R)

Este índice climático expresa la energía potencial de las precipitaciones y su escorrentía, que originan la erosión de una región determinada (Montes-León et al. 2011). De este modo, cuando las lluvias que se producen son más intensas y duran por mayor tiempo, mayor es la erosión potencial producida en la zona (Stone y Hilborn, citado por Chadli 2016).

De acuerdo con Wischmeier y Smith, citado por Chadli (2016), este factor se obtiene de la multiplicación de la intensidad máxima de la precipitación en un intervalo de 30 minutos con la energía cinética producida.

$$EI_{30} = E_C \times I_{30}$$

Donde:

$EI_{30}$  = Índice de erosividad de la lluvia (MJ.mm/ha.h)

$E_C$  = Energía cinética total de la lluvia (MJ/ha)

$I_{30}$  = Máxima intensidad de la lluvia en 30 minutos (mm/h)

La ecuación de Wischmeier y Smith depende de la recolección de data de intensidad de las lluvias en períodos corto de tiempo, sin embargo, debido a la dificultad para obtener esta información, se pueden utilizar otras fórmulas. Ramos Taipe (2001) indicó que el Factor R puede ser hallado mediante el uso de datos de precipitación anual, del mes más lluvioso o la máxima diaria, utilizando las siguientes fórmulas.

$$R = a (P_2/P)^b$$

Donde:

$P_2$  = Precipitación del mes más lluvioso

$P$  = Precipitación del año

$b$  = Exponente

Así mismo, según Roose, citado por Ramos Taipe (2001), el Factor R se obtiene mediante la siguiente fórmula.

$$R = 1.73 \times 0.5 \times P$$

Donde:

R = Factor de erosividad de la lluvia (MJ.mm/ha.h.año)

P = Precipitación media anual (mm)

De acuerdo con Morgan, citado por Ramos Taipe (2001), en el caso de zonas que presentan altas precipitaciones, este índice se determina por la siguiente ecuación.

$$R = I_{30}(9.28P - 8,383)/1000$$

Donde:

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

P = Precipitación media anual (mm)

Por último, este factor se puede hallar mediante la ecuación de Foster, citado por Ramos Taipe (2001).

$$R = 0.276P \times I_{30}/100$$

La elección de la ecuación a utilizar dependerá de la data de precipitaciones con la que se cuente. Además, Ramos Taipe (2001) señaló que las fórmulas de Roose, Morgan y Foster son las más recomendables, debido a que se pueden adaptar fácilmente.

### **2.13.2. Factor de Susceptibilidad a erosión del Suelo (K)**

El Factor K representa la medida de la susceptibilidad a la erosión del suelo causado por precipitaciones y escorrentía. La textura, estructura, materia orgánica y permeabilidad del suelo son factores que influyen en el valor de “K”, sin embargo, la textura es la propiedad que tiene mayor impacto en este factor (Stone y Hilborn, citado por Chadli 2016).

Un método para hallar este factor es mediante la ecuación de Wischmeier y Smith en 1978, la cual requiere de los datos de textura, estructura, permeabilidad y materia orgánica de los tipos de suelos que existan en la zona de estudio.

$$100K = 2.1M^{1.14}(10^{-4})(12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3)$$

Donde:

M = (% limo + % arena muy fina) \* (% limo + % arena - % arena fina)

a = Porcentaje de materia orgánica

b = Parámetro de tipo de estructura de suelo

c = Clase de permeabilidad

Por otro lado, Sharpley y Williams (1990), establecen que, para el cálculo del Factor K, se requiere solo de los datos de textura y materia orgánica y se realiza un análisis de la capa superior del suelo al comienzo del año de cada simulación que se realice y de acuerdo a los resultados que se obtengan, se efectúan las siguientes ecuaciones.

$$K_{USLE} = f_{csand} \times f_{cl-si} \times f_{orgc} \times f_{hisand}$$

$$f_{csand} = \left( 0.2 + 0.3 \times \exp^{-0.256 \times m_s \left(1 - \frac{m_{silt}}{100}\right)} \right)$$

$$f_{cl-si} = \left( \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3}$$

$$f_{orgc} = \left( 1 - \frac{0.25 \times orgC}{orgC + \exp[3.72 - 2.95 \times orgC]} \right)$$

$$f_{hisand} = \left( 1 - \frac{0.7 \times \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100}\right) + \exp[-5.51 + 22.9 \times \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)]} \right)$$

Siendo:

$K_{USLE}$ : Factor de Susceptibilidad a erosión del Suelo

$m_s$ : Porcentaje de arena

$m_{silt}$ : Porcentaje de limo

$m_c$ : Porcentaje de arcilla

orgC: Porcentaje de materia orgánica

### 2.13.3. Factor Topográfico (LS)

Los factores de longitud de la pendiente “L” y grado de inclinación “S” expresan la influencia de la topografía de un lugar en la erosión hídrica (Montes-León et al. 2011). Por esta razón, cuando las pendientes de una región son más largas y pronunciadas, las probabilidades para que se produzcan erosiones son mayores (Stone y Hilborn, citado por Chadli 2016).

De acuerdo con Desmet y Govers (1996), el cálculo de los factores LS se realiza gracias a un algoritmo de computadora vinculada a un *software* de SIG. De este modo, la ecuación originalmente desarrollada por Foster y Wischmeier en 1974, fue adaptada para que sea ejecutada con valores de una grilla de celdas, resultando en la ecuación de Desmet y Govers.

$$LS_j = \frac{S_j(\lambda_j^{m+1} - \lambda_{j-1}^{m+1})}{(\lambda_j - \lambda_{j-1})(22.13)^m} \quad (\text{Foster y Wischmeier, 1974})$$

Donde:

L = Factor de longitud de pendiente para el segmento j

S<sub>j</sub> = Factor de pendiente para el segmento j

λ<sub>j</sub> = Distancia de la pendiente del segmento j (m)

m = Exponente del factor LS de la USLE

22.13 es la longitud de la parcela unitaria

$$L_{(i,j)} = \frac{[A_{(i,j)} + D^2]^{(m+1)} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m D^{m+2} (22.13)^m} \quad (\text{Desmet y Govers, 1996})$$

Donde:

L<sub>(i,j)</sub> = Factor de longitud de pendiente para el píxel con coordenadas (i,j)

A<sub>(i,j)</sub> = Área de captación a la entrada de un píxel con coordenadas (i,j) (m<sup>2</sup>)

D = Tamaño de píxel (m)

m = Exponente del factor LS de la USLE

22.13 es la longitud de la parcela unitaria

x = Factor de corrección forma (x = 1 para sistemas pixeleados)

## **Factor L**

Este factor mide la distancia que recorre la escorrentía, desde su origen en la divisoria de las aguas de la cuenca, hasta alcanzar una zona de sedimentación o cauce (Wischmeier y Smith, citado por González del Tánago, 1991). De este modo, es que en la realidad cuando la longitud recorrida por la escorrentía incrementa, se producen mayores pérdidas de suelo, y es en la zona baja, dónde esta pérdida aumenta, ya que la acumulación de la escorrentía aumenta al llegar aguas abajo (Meyer et al., citado por González del Tánago, 1991).

Para efectuar la ecuación de Desmet y Govers, se requiere hallar el parámetro “m”. Según la metodología desarrollada por Foster et al., citada por Yaguache Ordoñez et al. (2016), para encontrar los valores de “m” del área de estudio se utiliza la siguiente ecuación.

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (\text{Foster et al. 1977})$$

Así mismo, de acuerdo a McCool et al., citado por Yaguache Ordoñez et al. (2016), la siguiente fórmula es aplicada para hallar “β”.

$$\beta = \frac{\left(\frac{\sin \theta}{0.0896}\right)}{[3(\sin \theta)^{0.8} + 0.56]} \quad (4) \quad (\text{McCool et al. 1987})$$

Donde:

Θ = Pendiente del terreno

## **Factor S**

El factor de inclinación de pendiente se halla mediante la relación de la pérdida de suelos en una pendiente determinada, entre una pendiente normalizada de nueve por ciento (Zúñiga Huaco, 2017).

Según McCool, citado por Yaguache Ordoñez et al. (2016), las siguientes ecuaciones son utilizadas para hallar el factor topográfico “S”.

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03 \quad s < 9\% \quad (\text{McCool et al. 1987})$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.50 \quad s \geq 9\%$$

Donde:

S = Factor de pendiente

$\Theta$  = Ángulo de pendiente en grados

s = Inclinación =  $\tan \Theta$

Además de estas ecuaciones para el cálculo del factor topográfico, existe un método simplificado desarrollado por la Facultad de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid, que permite saber el valor del Factor LS mediante las pendientes en porcentajes que se presentan en la zona de estudio.

**Tabla 2:** Valores de LS de acuerdo a la pendiente (Fuente: Tomado de Ramos Taipe 2001)

GRUPOS DE PENDIENTES EN %	FACTOR L.S
0 - 3	0,3
3 -12	1,5
12 - 18	3,4
18 - 24	5,6
24 - 30	8,7
30 - 60	14,6
60 - 70	20,2
70 - 100	25,2
> 100	28,5

#### 2.13.4. Factor de Cobertura Vegetal (C)

Este factor refleja la capacidad de la cobertura vegetal para brindar protección al suelo, frente al impacto de las precipitaciones y la potencia del flujo que se producen en la superficie (Morante Vargas y Gonzales Carrasco, 2019). De esta manera, en las áreas que cuenten con una mayor cobertura vegetal, los valores de C se acercarán a cero, mientras que en las zonas cuya superficie se encuentra desprotegida, los valores alcanzarán el valor de uno (Montes-León et al. 2011).

Montes-León et al. (2011) realizó una compilación de diferentes valores de C para diferentes tipos de cobertura, consultando una variedad de bibliografías (Anexo 1). Así mismo, Wischmeier, citado por Ramos Taipe (2001), estableció valores del coeficiente C, para diversas coberturas vegetales (Anexo 2).

#### **2.13.5. Factor de Prácticas de Conservación (P)**

La eficiencia de las prácticas de conservación que se llevan a cabo en una región para controlar la erosión se expresa mediante este factor. Algunos ejemplos de estas técnicas de preservación son el laboreo a nivel, el aterrazado y el cultivo en fajas alternantes (Ibañez Asencia et al., citado por Morante Vargas y Gonzales Carrasco 2019).

De acuerdo con Ramos Taipe (2001), los valores de P dependiendo de las prácticas de conservación obtendrán ciertos valores que se observan en el Anexo 3. Sin embargo, si no se cuenta con esta información o no existe la práctica de estas técnicas, P obtiene el valor de uno en la ecuación.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

El área de estudio del presente trabajo de investigación se desarrolló en la cuenca del río Huarmey, la cual está ubicada en la zona noroeste del Perú, dentro de la región Áncash.

La zona de estudio se encuentra entre los paralelos  $9^{\circ}37'16''$  y  $10^{\circ}11'21''$  de latitud sur, entre los meridianos  $77^{\circ}27'20''$  y  $78^{\circ}10'39''$  longitud oeste y su altitud varía de 0 a 4950 m.s.n.m. Así mismo, cuenta con un área de  $2,245 \text{ km}^2$  y un perímetro de 267.2 km.

Políticamente, la cuenca del río Huarmey comprende tres provincias de la región Áncash. La provincia de Huarmey es la que abarca mayor área de la cuenca, contando con  $1,375.1 \text{ km}^2$ , que significa un 61.3 por ciento del total; por otro lado, la provincia de Aija cuenta con un área de  $599.1 \text{ km}^2$ , que representa el 26.7 por ciento; y finalmente, la provincia de Recuay abarca  $270.8 \text{ km}^2$ , siendo el 12.1 por ciento del total de la cuenca.

La principal vía que se utiliza para trasladarse a la cuenca, es la carretera Panamericana Norte, la cual conecta a la ciudad de Lima con la ciudad de Huarmey. Así mismo, esta vía conecta a la ciudad de Huarmey con las ciudades de Casma y Chimbote por el norte. Para poder trasladarse a la parte alta de la cuenca, existe una carretera asfaltada que va desde la ciudad de Huarmey hasta la localidad de Huamba Baja, y a partir de ahí, existe una vía no asfaltada para trasladarse a las demás provincias.



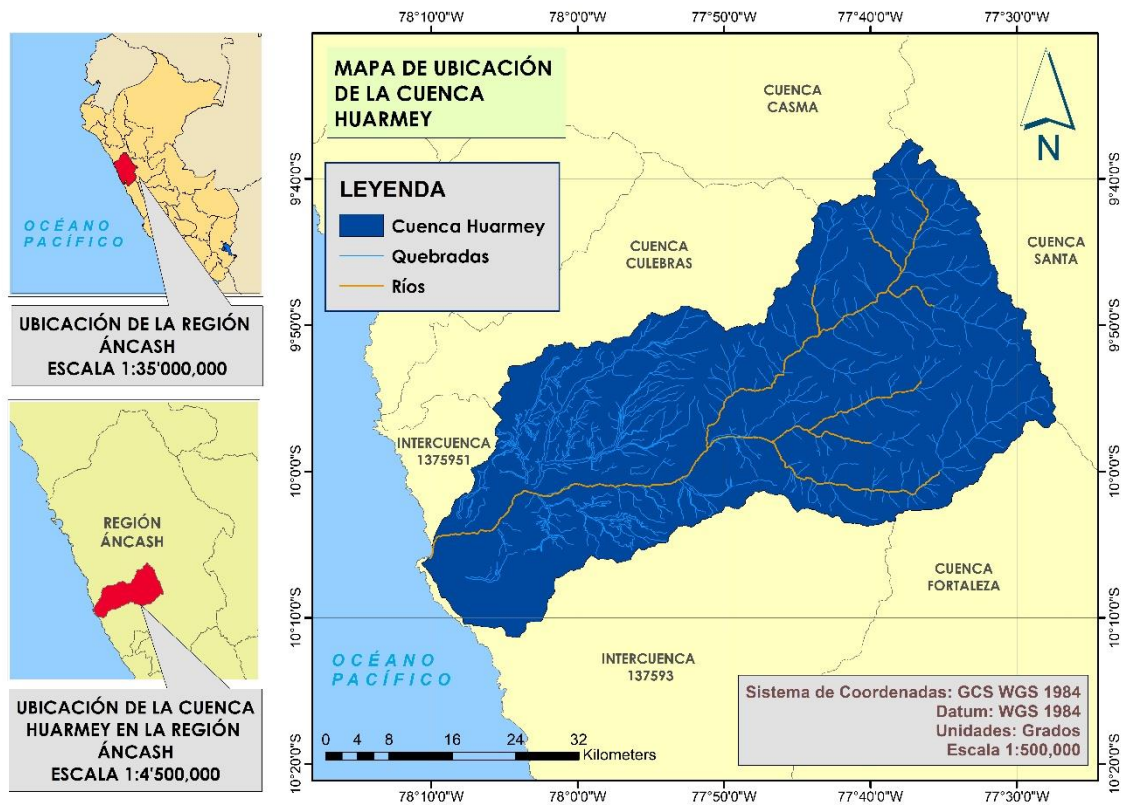


Figura 11: Ubicación de la Cuenca Huarney

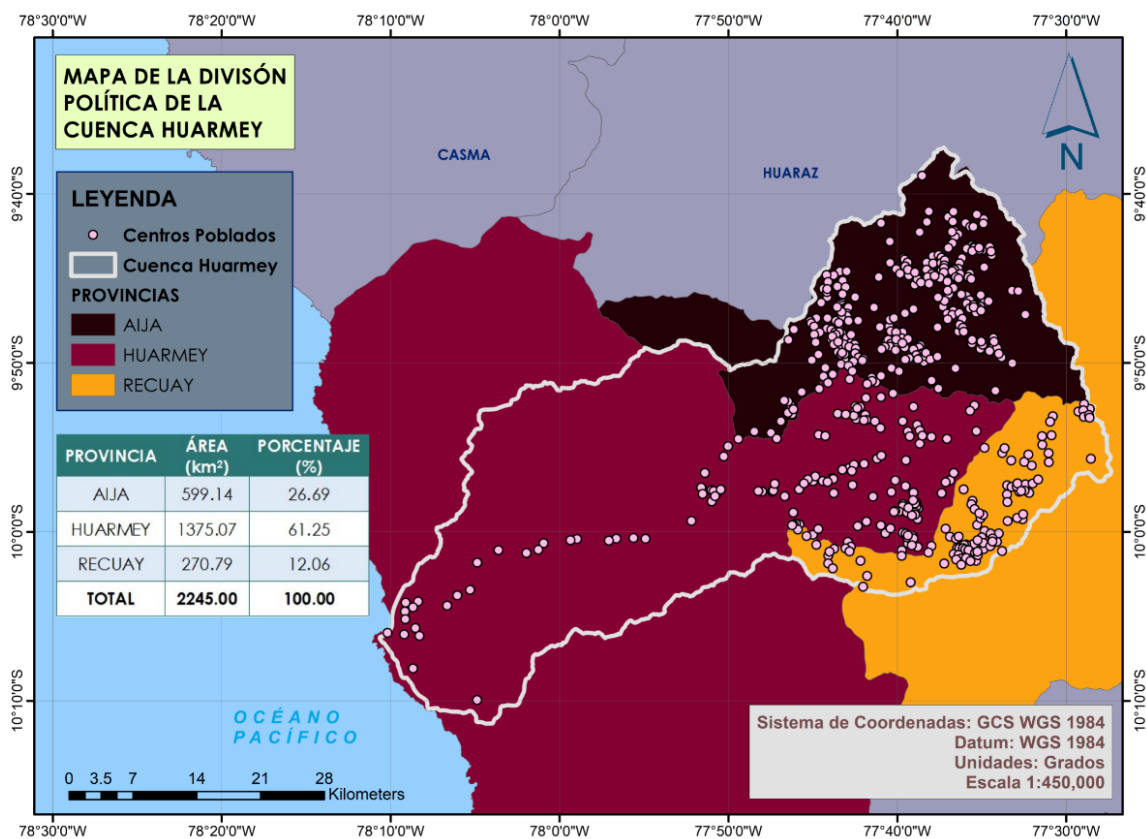


Figura 12: División política de la Cuenca Huarney

### 3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

A continuación, se detallará la lista de materiales que se utilizaron en el presente estudio para el desarrollo de los modelos.

#### **Materiales:**

- Capa vectorial de las unidades hidrográficas del Perú en formato *shape* del portal web del ANA
- 02 imágenes satelitales de la misión Sentinel-2, desarrollada por el programa Copernicus de la European Space Agency (ESA), que abarca la cuenca Huarmey en su totalidad.
- Las cartas nacionales 20-g (Culebras), 20-h (Huaraz), 20-i (Recuay), 21-g (Huarmey) y 21-h (Huayllapampa), elaboradas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en formato *shape*, que unidas contienen la información topográfica a un intervalo de 50 m. de la Cuenca Huarmey.
- La capa vectorial del Mapa de Hidrogeología Nacional (2016), creado por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET)
- Datos de precipitaciones de las estaciones climáticas de Malvas, Cotaparaco, Chamaná y Huarmey del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)
- Las cartas nacionales 20-g, 20-h, 20-i, 21-g y 21-h de los Mapas Geológicos Integrados a Escala 1:100,000, elaborados entre el 2014 y 2016 por INGEMMET.
- La capa vectorial del Mapa Geomorfológico del Perú, desarrollado por la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del INGEMMET, a escala 1:250,000, entre los años 2012 y 2016.

#### **Equipos:**

- Cámara digital
- Memoria extraíble
- GPS
- Libreta de campo
- Lápices, lapiceros, regla y borrador
- Bolsas para muestras de 0.5 kg.
- Plumón indeleble
- Lampa

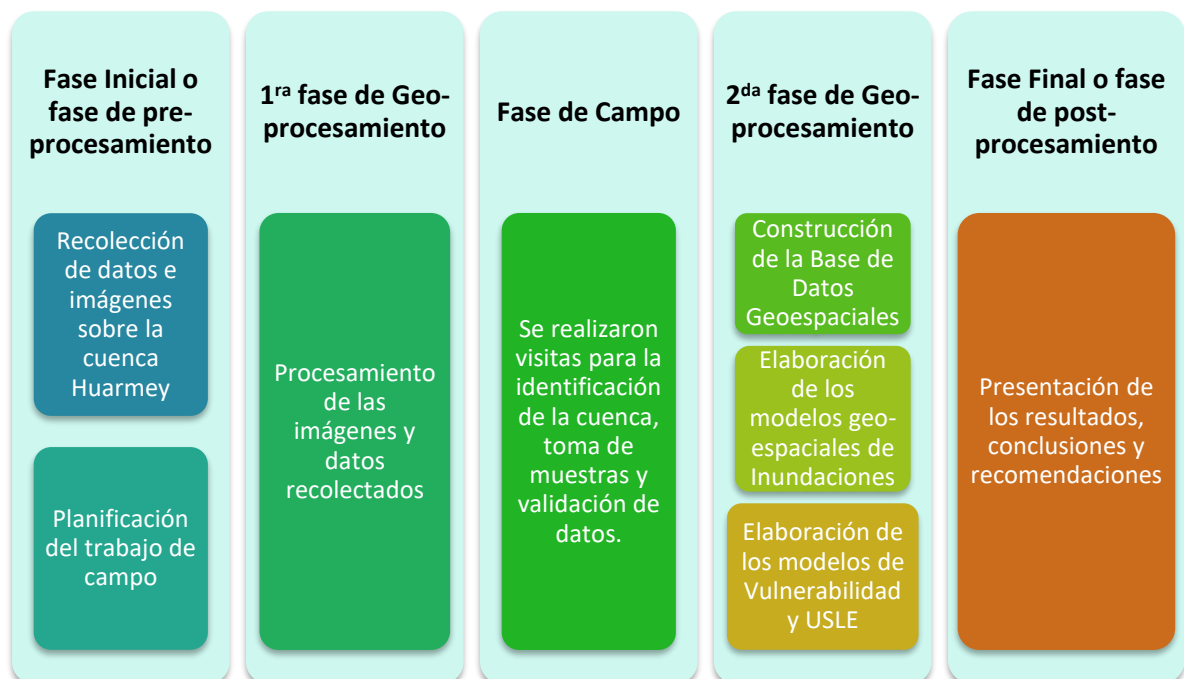
- Barreta
- EPP (Guantes de seguridad, lentes de sol, zapatillas de montaña)
- Wincha
- Celular inteligente
- Laptop
- Impresora

**Softwares:**

- Sentinel Application Platform (SNAP)
- ENVI 5.0
- Google Earth Pro
- Microsoft Office (Word y Excel)
- ArcGIS 10.4

**3.3. MÉTODOS**

El método que se realizó consistió en cinco fases según se muestra en el siguiente gráfico.



**Figura 13:** Esquema metodológico de la tesis

### 3.3.1. Fase Inicial o fase de preprocesamiento

En esta primera fase, se realizó la recopilación de datos sobre la zona de estudio, necesaria para la elaboración de los modelos geoespaciales.

#### a. Imágenes Satelitales:

Para obtener la capa de cobertura, se requirieron de imágenes satelitales actuales, razón por lo que se utilizaron imágenes Sentinel-2 de alta resolución (10 m.) del área de estudio. Es por ello que, para obtener esta información de manera libre, se creó una cuenta de usuario en el sitio web Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), que forma parte del Programa Copernicus, desarrollado por la Unión Europea, para descargar de forma gratuita las imágenes Sentinel-2 y (figura 14).

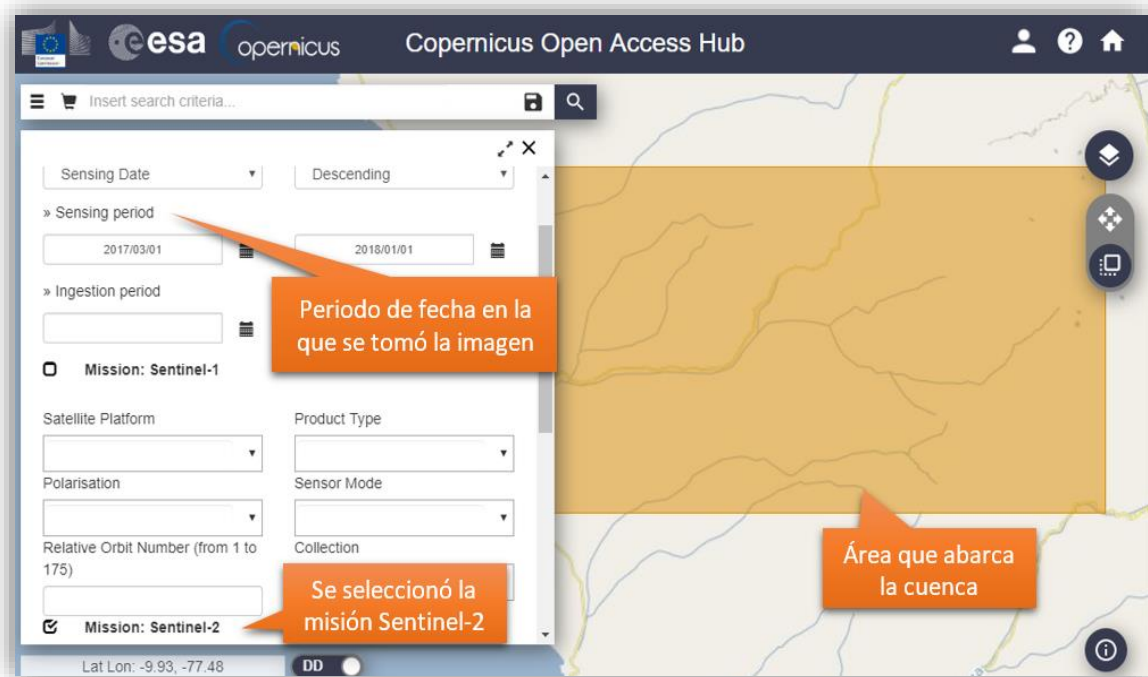


**Figura 14:** Sitio web Copernicus Open Access Hub (Fuente: Tomado de ESA, c2014.)

Una vez que se creó la nueva cuenta de usuario, se procedió a buscar las imágenes de la Cuenca Huarmey. Se seleccionó un área rectangular que abarcó la cuenca en la página de inicio de Copernicus y se ingresaron en los filtros de búsqueda la fecha del último año y de la misión Sentinel-2 (figura 15). Debido a que la búsqueda de imágenes se realizó antes de

que el producto en el Nivel-2a estuviera disponible para la zona, se hizo la descarga de la data en el Nivel-1c, que cuenta solo con las correcciones radiométrica y geométrica pero no con la atmosférica. Para esta investigación se descargaron dos archivos comprimidos:

- S2A\_MSIL1C\_20170723T152641\_N0205\_R025\_T17LRK\_20170723T152915  
archivo que pertenece al 23 de julio del 2017
- S2A\_MSIL1C\_20170703T152641\_N0205\_R025\_T17LRJ\_20170703T153040 archivo  
que pertenece al 03 de julio del 2017



**Figura 15:** Selección de la cuenca Huarney y aplicación de los filtros de búsqueda

### Software SNAP:

Para poder realizar el procesamiento de las imágenes Sentinel-2, se requirió del programa Sentinel Application Platform (SNAP). Según STEP (s.f.), este *software* de libre acceso fue desarrollado por ESA y dirigido por Brockmann Consult, Array Systems Computing y C-S, y tiene como función almacenar las herramientas para procesar las imágenes Sentinel. SNAP fue descargado de la página web <http://step.esa.int/main/download/snap-download/>, que es la Plataforma para la Aplicación de Herramientas Científicas, cuyas siglas en inglés son STEP (Anexo 4). Además, desde esta web también se descargó el procesador Sen2Cor, en

la dirección <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/>, el cual efectuó la corrección atmosférica de las imágenes para transformar la reflectividad de techo de atmósfera (TOA) a nivel de superficie (BOA) y de esta manera pasar el producto del Nivel-1c al Nivel-2a (Anexo 5).

**b. Información digital de base de datos nacional:**

- Para la elaboración de la capa de pendientes de la zona de estudio, se requirió como elemento principal las curvas de nivel, las cuales se obtuvieron del aplicativo de descargas puesto a disposición por el Ministerio de Educación (MINEDU) a través de la web <http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/#>. Es por medio de este servidor, que se descargaron las cartas nacionales 20-g, 20-h, 20-i, 21-g y 21-h, que cubrieron toda el área de la cuenca. Luego de haber descargado y descomprimido los archivos en formato zip, se procedió a trabajar con las curvas de nivel en formato *shape* de cada carta.
- Se requirió del Mapa de Hidrogeología Nacional, creado por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), cuya última actualización fue en el 2016. Esta información se obtuvo del portal GEOCATMIN, el cual es un Sistema de Información Geológico y Catastral Minero donde se encuentra una base de datos del territorio nacional (INGEMMET, c.2017). Desde este servidor, se descargó un archivo en formato *shape* del Mapa de Hidrogeología.
- Se utilizó el visor de estaciones que se encuentra en el portal web del ANA (<http://snirh.ana.gob.pe/visors2/>), ya que contiene los datos de precipitaciones del SENAMHI, para descargar información de las estaciones climáticas de Malvas, Cotaparaco, Chamana y Huarmey por un período de 21 años (1990-2010).
- Se utilizó el portal GEOCATMIN (<http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>) para la descarga de los archivos en formato *shape* de las cartas nacionales 20-g, 20-h, 20-i, 21-g y 21-h de los Mapas Geológicos Integrados a Escala 1:100,000, elaborados entre el 2014 y 2016 por INGEMMET.

- Se obtuvo el Mapa Geomorfológico del Perú, desarrollado por el INGEMMET, mediante el portal GEOCATMIN, donde se descargó un archivo en formato *shape* del mapa completo.

#### **c. Coordinación para visita de campo:**

Se concertaron reuniones con el director de la Agencia Agraria de Huarney, el Ing. Efraín Tito Motta Padilla, para explicarle el proyecto de tesis y elaborar el plan de visita a la cuenca.

### **3.3.2. 1<sup>ra</sup> fase de Geoprocesamiento**

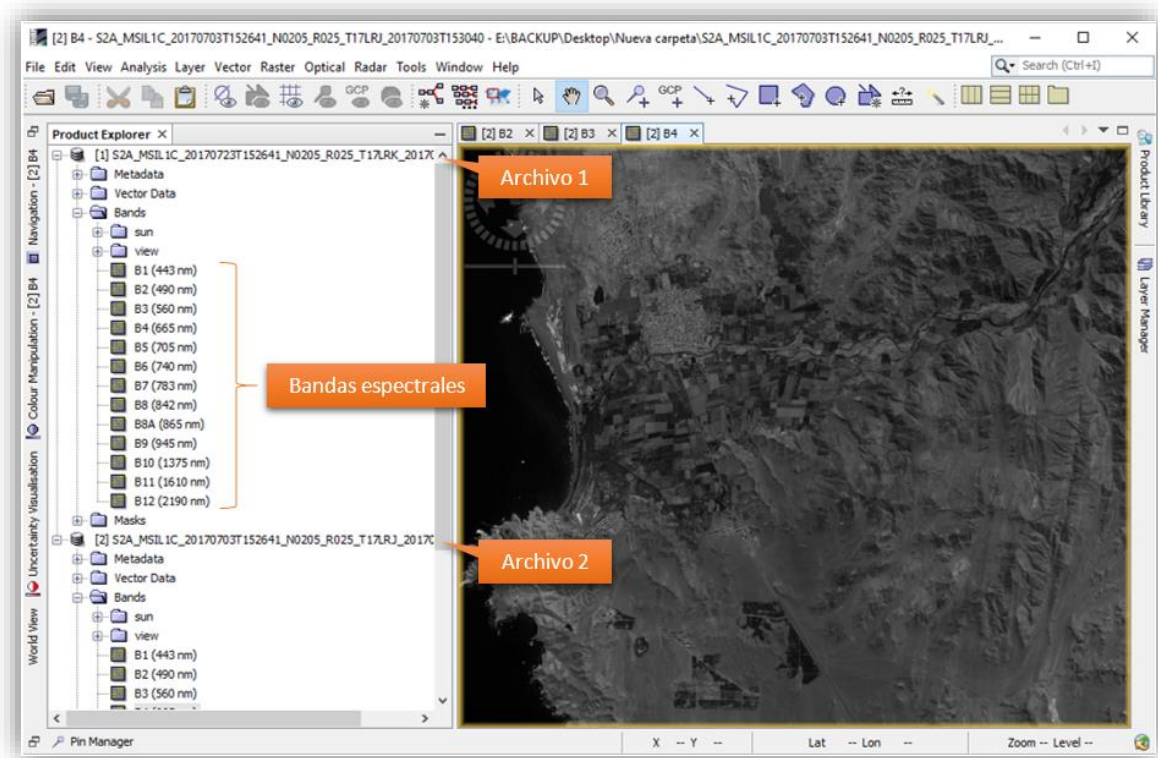
En esta etapa se realizó el procesamiento de las imágenes e información digital de la cuenca Huarney para la elaboración de la información temática de cobertura, pendiente, capacidad de infiltración, geología, geomorfología, factor forma y precipitación.

#### **a. Cobertura Vegetal**

##### Delimitación de la imagen satelital

En este mapa temático se podrá visualizar la clasificación de uso de suelo, y la cobertura vegetal, que representa las formaciones naturales que están sobre la superficie. Debido a que este mapa puede ser utilizado para diferentes propósitos, no existe una clasificación estandarizada, por lo que para cada estudio se llevará a cabo una distribución acorde a las necesidades (Anderson et al. 1976).

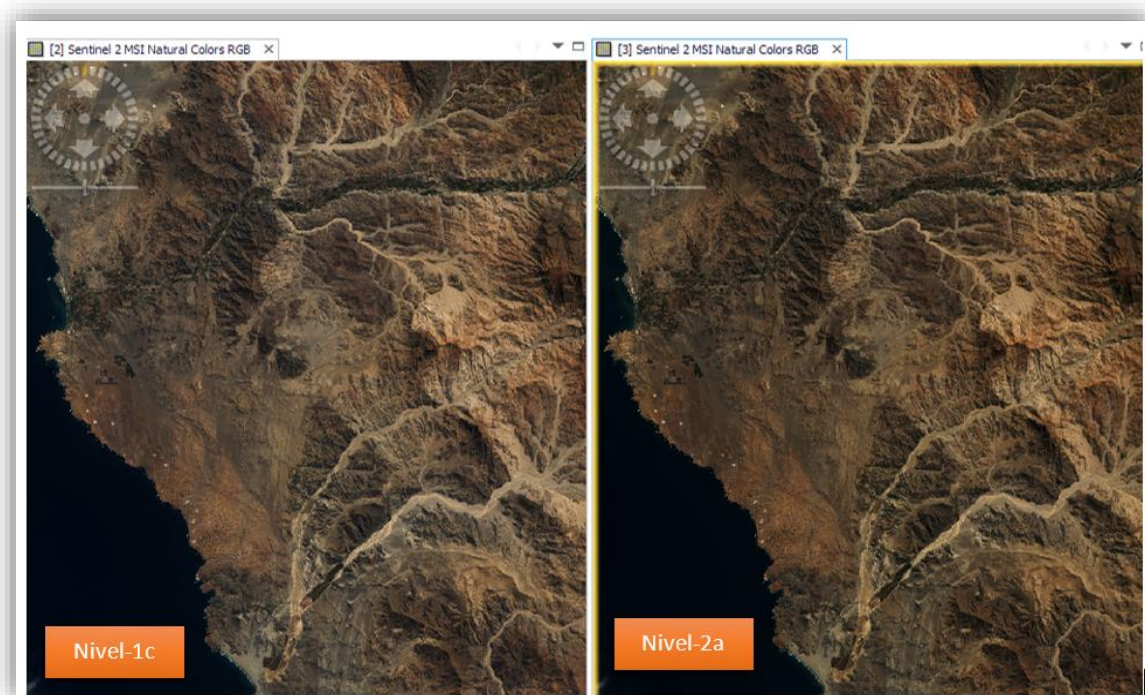
Una vez efectuada la descarga de las imágenes satelitales Sentinel-2, se procedió a ejecutar la corrección atmosférica para que pasen del Nivel-1c al Nivel-2a, por lo cual se utilizó el programa SNAP y la herramienta Sen2Cor. Las dos imágenes descargadas (la primera del 23 de julio del 2017 y la segunda del 03 de julio del 2017) fueron descomprimidas y dentro de la carpeta se encontraron diferentes archivos (Anexo 6). El archivo de metadatos, MTD\_MSIL1C en formato XML, de cada producto se abrió en el programa SNAP, ya que dentro de ellos se encontraban las 13 bandas espectrales (figura 16).



**Figura 16:** Archivos abiertos en SNAP

Después se procedió a usar el procesador Sen2Cor, que efectuó la corrección atmosférica para alcanzar el Nivel-2a, en esta ventana se seleccionó el primer archivo y en la sección de Parámetros para Procesamiento se escogió la resolución en la que se quiso obtener el resultado, que en este estudio fue de 10 m., con el fin de conseguir una imagen de alta resolución que permita una mejor clasificación de clases (Anexo 7). Una vez terminado el proceso de corrección, las imágenes logradas en el Nivel-2a (figura 17) se guardaron en la misma carpeta donde se encontraban los archivos originales. Este proceso se repite para el segundo archivo.





**Figura 17:** Imagen corregida

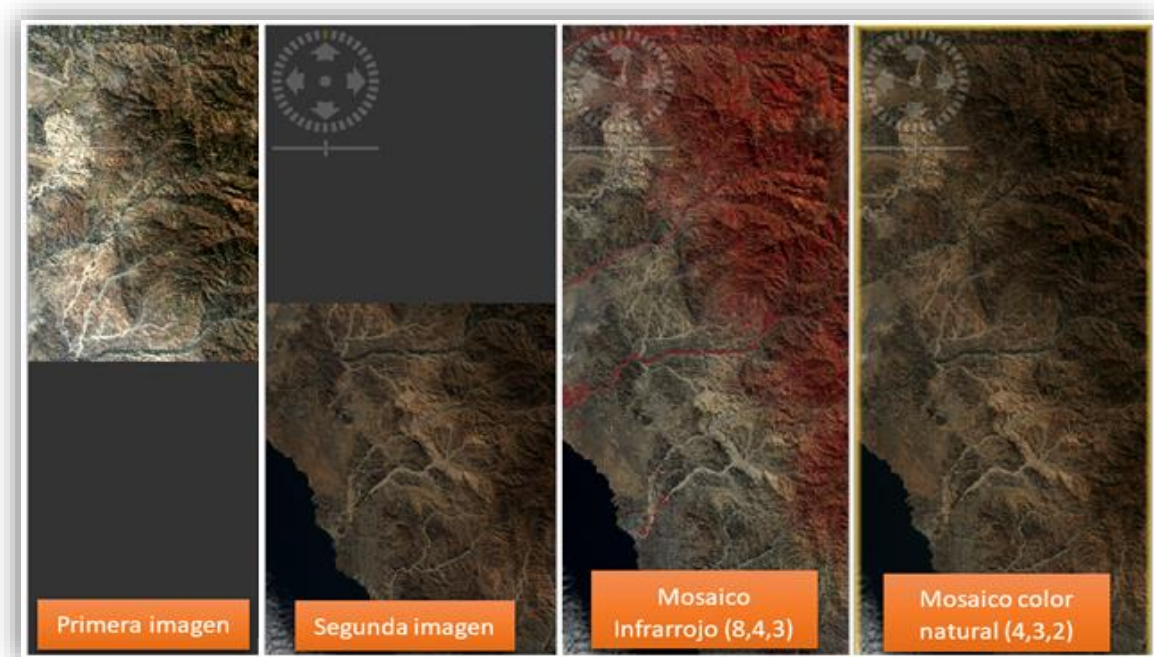
Las bandas 2, 3, 4 y 8 que cuentan con una resolución de 10 m. fueron las que se utilizaron para los pasos siguiente; sin embargo, las demás bandas que cuentan con una resolución de 20 m. y 60 m., también pueden emplearse, luego de pasar por un proceso de remuestreo gracias a la opción *Resampling* que ofrece SNAP, donde se puede cambiar la resolución de estas bandas a 10 m.

Después de los procesos anteriores, se efectuó el mosaico de las dos imágenes que cubren la cuenca Huarney ya en el Nivel-2a. Ambos archivos de metadatos (MTD\_MSIL2A) fueron exportados en el formato original de SNAP, BEAM-DIMAP, que permite que el procesamiento no tarde demasiado por no contar con memoria suficiente en el ordenador (Casella et al. 2018). Estos nuevos archivos, se abrieron en SNAP y se seleccionó la operación *Mosaicing*.

En la primera pestaña de la ventana de *Mosaicing*, se ingresaron los datos de entrada, los cuales fueron las dos imágenes a unir; y los parámetros de salida fueron, la ruta del archivo resultante, el nombre, y el formato.

En la pestaña de *Map Projection Definition*, se escogió la opción de UTM/WGS 84 (automático), se indicó que el tamaño del píxel resultante fuera de 10 m. y en el mapa mundial que se muestra, se encerró en un recuadro los límites donde se encuentra el mosaico.

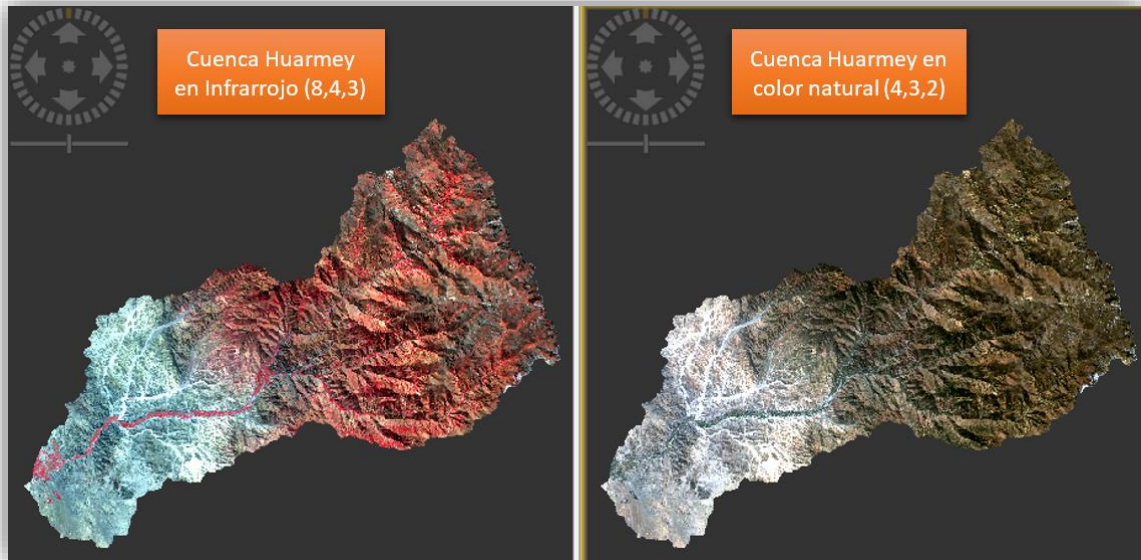
Por último, en la tercera pestaña de *Variables y Condiciones* se añadieron las bandas a mostrarse en el producto final, que en este caso fueron las bandas 2, 3, 4 y 8, para finalmente correr el procesamiento con el comando *Run* (Anexo 8).



**Figura 18:** Mosaico final

Una vez que se contó con el mosaico final (figura 18), se procedió con la extracción de la cuenca Huarmey, razón por la que se importó al SNAP el archivo en formato *shape* de la cuenca, apareciendo como una máscara sobre el mosaico. Luego, se abrió la ventana de Land/Sea Mask cuya función es igualar a cero el valor de los píxeles fuera de la región de interés (ROI), que en este caso fue el polígono de la cuenca. En la primera pestaña se ingresaron los datos de entrada/salida y en la segunda se seleccionaron las bandas que conformaron la imagen resultante (2, 3, 4 y 8) y el vector que se usó como máscara (Anexo 9). Finalmente se corrió el procesamiento dando como producto la imagen satelital delimitada (figura 19). Este archivo final se exportó en formato ENVI, para que en ese *software* pueda ser clasificado, esto a causa de que el ordenador donde se realizó este estudio

no tuvo la capacidad para procesar las clasificaciones supervisadas y no supervisadas en el programa SNAP.



**Figura 19:** Imagen Satelital de la cuenca Huarmey delimitada

#### Clasificación No Supervisada y Supervisada

Después de obtener la imagen satelital delimitada de la cuenca del río Huarmey, se hizo uso del *software* ENVI para la clasificación de coberturas. En este programa se realizaron dos tipos de clasificación, la supervisada y no supervisada.

Durante este proceso, se encuentran zonas con características similares para que sean agrupadas en clases, de este modo, se inició con una clasificación no supervisada K-Means o K-Medias, que realizó este procedimiento de manera automática, solo necesitando los datos de la imagen de entrada, los números de clases y el nombre del archivo de salida, resultando en la imagen de la figura 77.

Después, se llevó a cabo la clasificación supervisada que, a diferencia de la no supervisada, realiza una agrupación de forma controlada. Para ello, se utilizaron imágenes de Google Earth, y la imagen satelital delimitada en infrarrojo (para localizar las áreas verdes).

La clasificación supervisada comienza con la definición de los ROI's o también llamados regiones de interés, para lo cual se abrió la herramienta ROI y se dibujaron los polígonos de cada zona en la imagen, los cuales resultaron en 11 clases (Anexo 10). Una vez que se obtuvo el archivo de clases, se probó con diferentes métodos de clasificación supervisada que cuenta el programa ENVI, siendo la clasificación por Máxima Probabilidad (*Maximum Likelihood*), por la que se optó en este estudio, y la cual generó el gráfico de la figura 78.

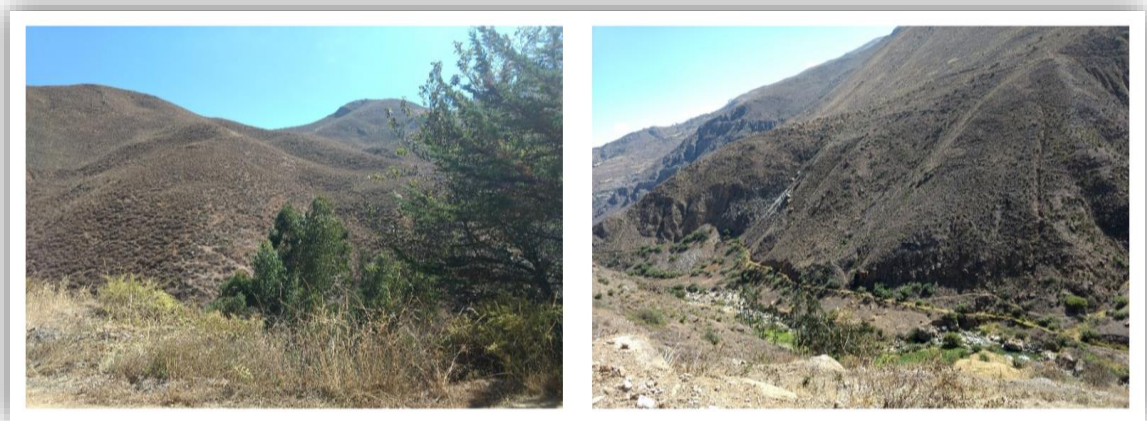
Luego de realizar la clasificación supervisada por Máxima Probabilidad, se observó en la imagen resultante que aún existían algunos errores en la distribución de las zonas. Debido a esto, se efectuaron algunas correcciones, con el fin de obtener una mayor precisión en el mapa de cobertura. Para ello, se utilizó el TIN elaborado para este estudio y se realizaron visitas de campo a la zona urbana, agrícola, llanuras, entre otras de la cuenca Huarmey, para poder fotografiar las diferentes coberturas encontradas, así como para tomar las coordenadas mediante un GPS, para asignar la ubicación de los lugares en donde se tomaron las fotografías (figura 20, 21, 22, 23, 24 y 25). Por otro lado, en las áreas que fueron inaccesibles, debido a la falta de carreteras, se emplearon las imágenes satelitales provistas por Google Earth Pro (figura 26).



**Figura 20:** Llanura arenosa



**Figura 21:** Áreas agrícolas



**Figura 22:** Matorrales



**Figura 23:** Montañas



**Figura 24:** Suelo desnudo



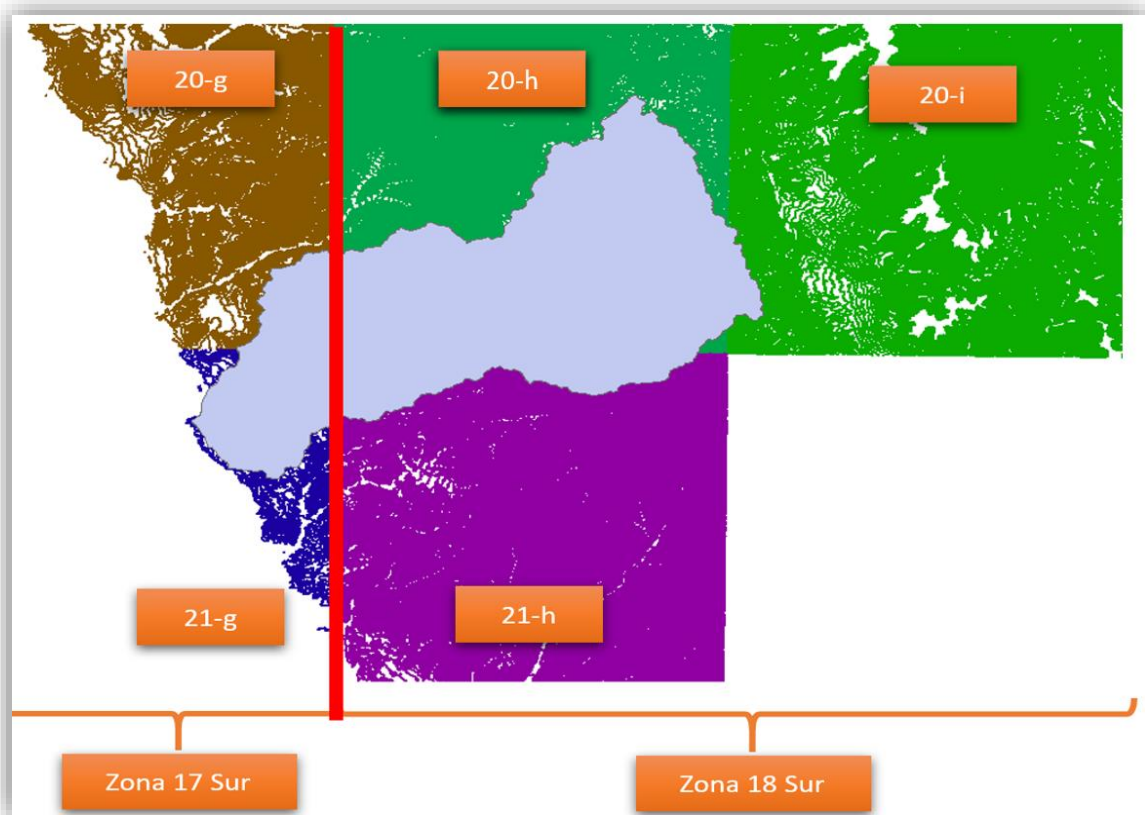
**Figura 25:** Zonas urbanas



**Figura 26:** Cuenca Huarney en Google Earth Pro (Fuente: Tomado de Google, c2019.)

## b. Pendiente

Se utilizó el componente ArcMap del *software* ArcGIS, como medio para trabajar con los archivos descargados de las cartas nacionales. Se inició agregando las curvas de nivel de todas las cartas al ArcMap, sin embargo, en este caso se observó que la cuenca se encontraba dentro de las zonas 17 y 18 sur en la proyección UTM. Para continuar con los siguientes procesos, se necesitaba trabajar en un sistema definido de coordenadas, para lo cual se eligió la zona 18 sur, ya que la mayor parte de la cuenca recae en esta área (figura 27). Una vez realizado este análisis, se hizo el cambio de sistema de coordenadas de las cartas 20-g y 21-g de la zona 17 sur, con la herramienta *Project* de ArcGIS, cuya ruta es **ArcToolbox > Data Management Tools > Projections and Transformations > Project**. En esta ventana se agregó el archivo en formato *shape* de la carta a transformar, el programa por defecto detectó el sistema en el que se encontraba; luego se agregó la ubicación del resultado, se seleccionó el nuevo sistema de coordenadas, que en este caso fue WGS 1984 UTM Zona 18S, y se corrió el programa. El mismo proceso se realizó para la segunda carta.

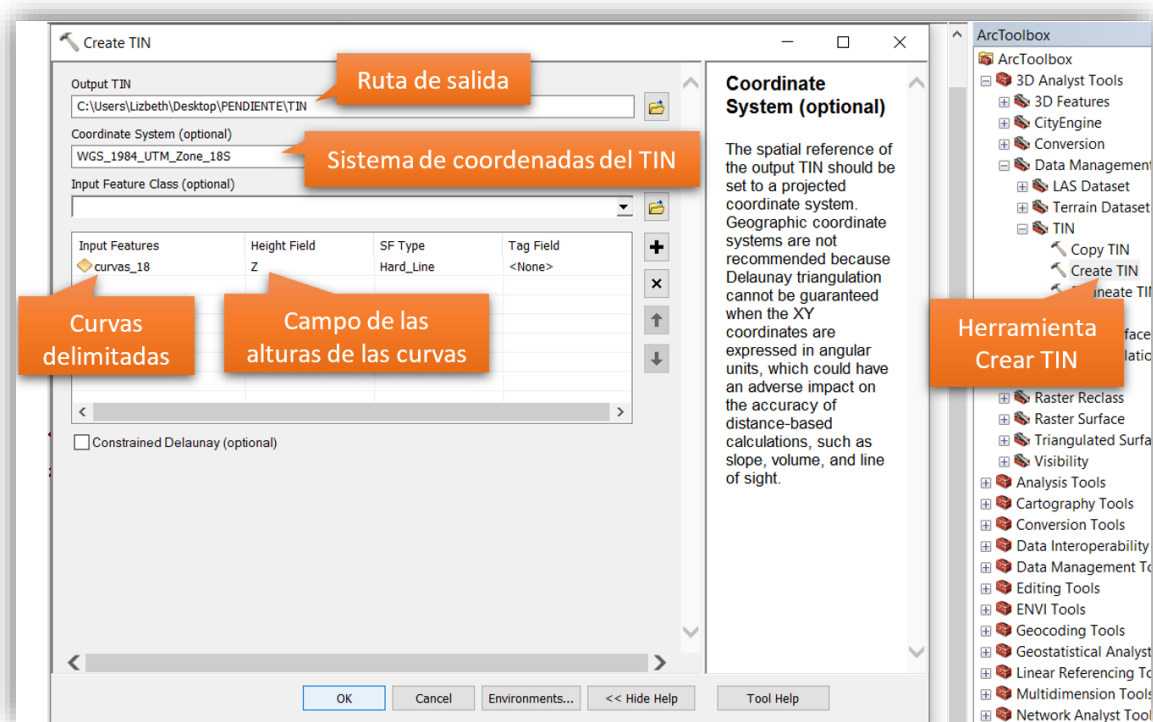


**Figura 27:** Zonas en la que recae la cuenca Huarmey

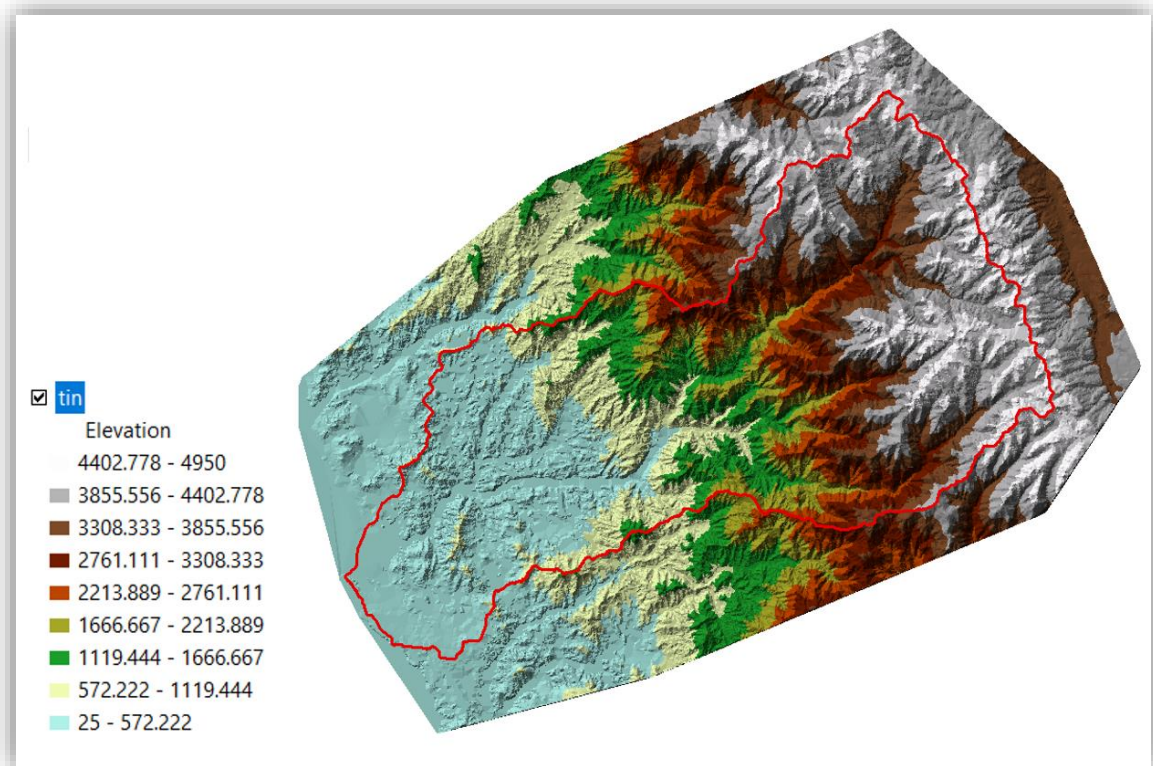


Antes de seguir con los siguientes pasos, se definieron las propiedades del Marco de Datos (*Data Frame Properties*) de ArcMap, que luego del análisis previo, se definió la zona 18 Sur como el sistema de coordenadas. Después de esto, el siguiente paso fue combinar las cinco capas vectoriales de las curvas de nivel con la herramienta Fusionar (*Merge*), ubicado en la opción de Geoprocesamientos (*Geoprocessing*) de la barra de herramientas. En esta ventana se agregaron las cinco capas de las curvas de nivel y se añadió la ubicación del archivo de salida. Luego de conseguir el resultado, se procedió a cortar las curvas en forma de un polígono que encerraba el área de la cuenca, esto con ayuda de la herramienta Recortar (*Clip*), que también se encuentra en *Geoprocessing*. La razón por la cual no se cortaron las líneas de las curvas de nivel con la forma de la cuenca de estudio, fue porque los bordes irregulares de este polígono generaron imprecisiones en la creación de las redes irregulares de triángulos (TIN).

La elaboración del TIN se llevó a cabo con la herramienta Crear TIN (*Create TIN*), cuya dirección es **ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Data Management > TIN > Create TIN**. En esta ventana se añadió la capa de las curvas delimitadas, se escogió el sistema de coordenadas del TIN, zona 18 Sur, luego se ingresó la ubicación del producto de salida y en las características del archivo de entrada se seleccionó el campo donde se encontraban las alturas de las curvas de nivel en la Tabla de Atributos, que en el caso de las cartas del IGN es el campo “Z” (figura 28). El resultado muestra la forma del relieve de la cuenca Huarmey y se puede observar en la figura 29.

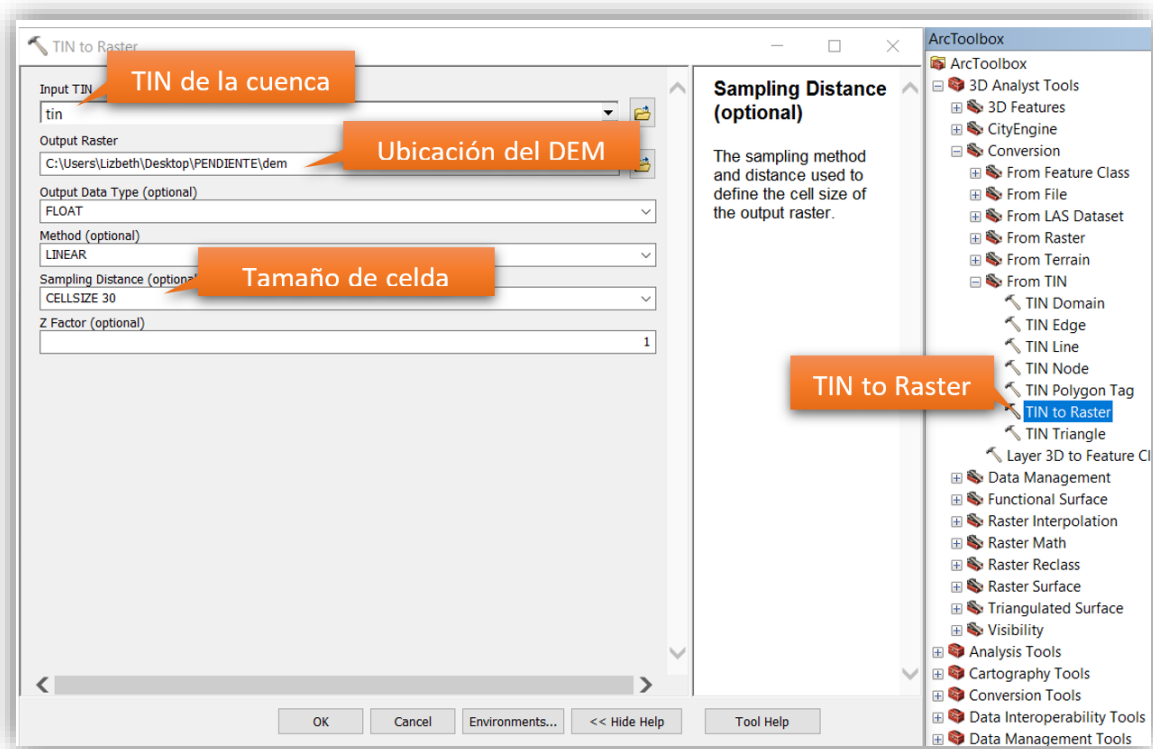


**Figura 28:** Ventana para crear el TIN

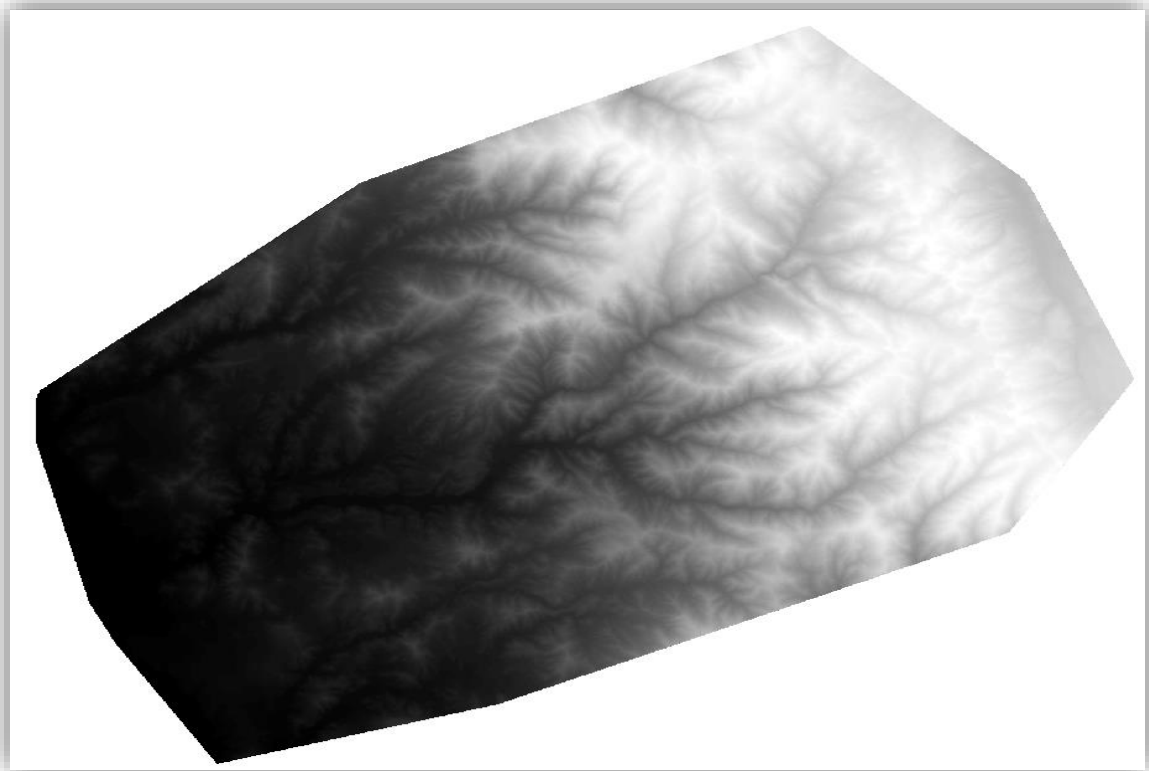


**Figura 29:** TIN resultante

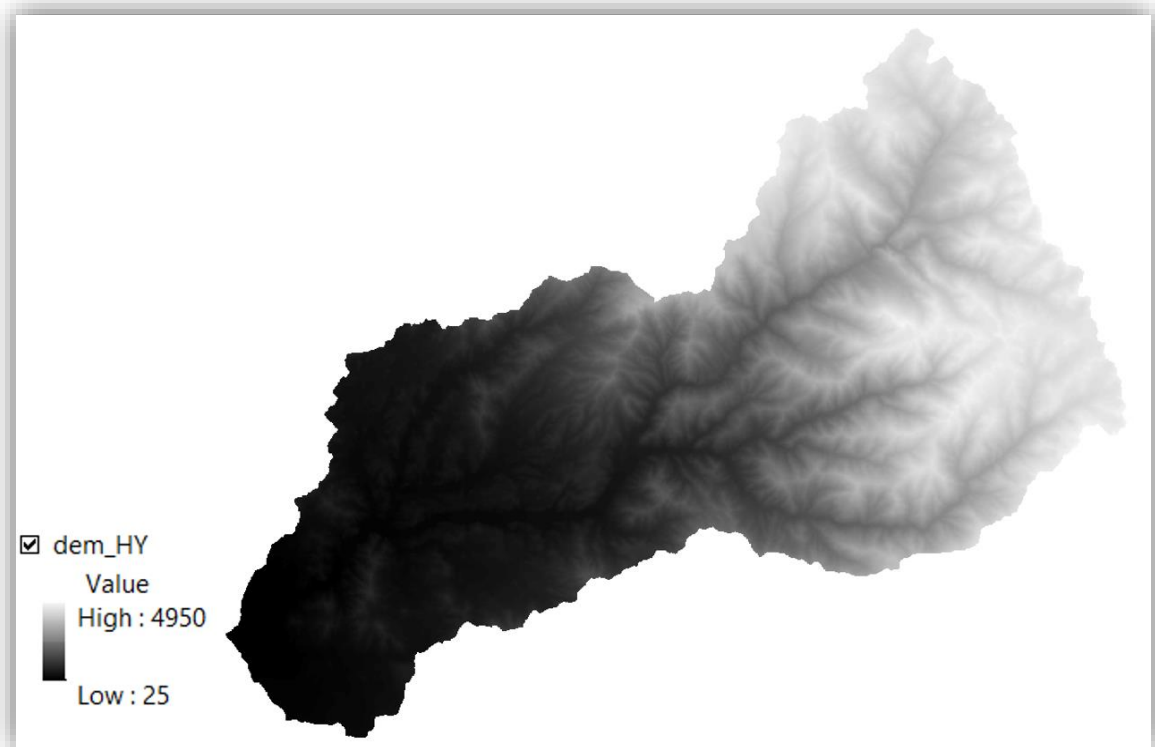
Después, se efectuó una interpolación del TIN obtenido, para generar un Modelo Digital de Elevaciones (DEM), con la herramienta TIN a Ráster, que se encontró en la ruta **ArcToolbox > 3D Analyst Tools > Conversion > From TIN > TIN to Raster**. Como datos de entrada, se añadió el TIN y se especificó que el tamaño de celda fuera de 30 m. (este tamaño fue utilizado en todos los ráster del proyecto). Como dato de salida, se agregó la ruta de salida del DEM (figura 30). El resultado fue un ráster que representa la superficie del suelo (figura 31). Ya que el DEM se elaboró de forma correcta, en este punto se delimitó el DEM con la forma de la cuenca Huarmey con ayuda de la herramienta Extraer por Máscara (*Extract by Mask*), el cual tiene la ruta **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Extraction > Extract by Mask**, en esta ventana se agregó el ráster resultante, el polígono de la cuenca en formato *shape* y la ubicación que se dio al DEM de Huarmey (figura 32).



**Figura 30:** Ventana TIN a Ráster

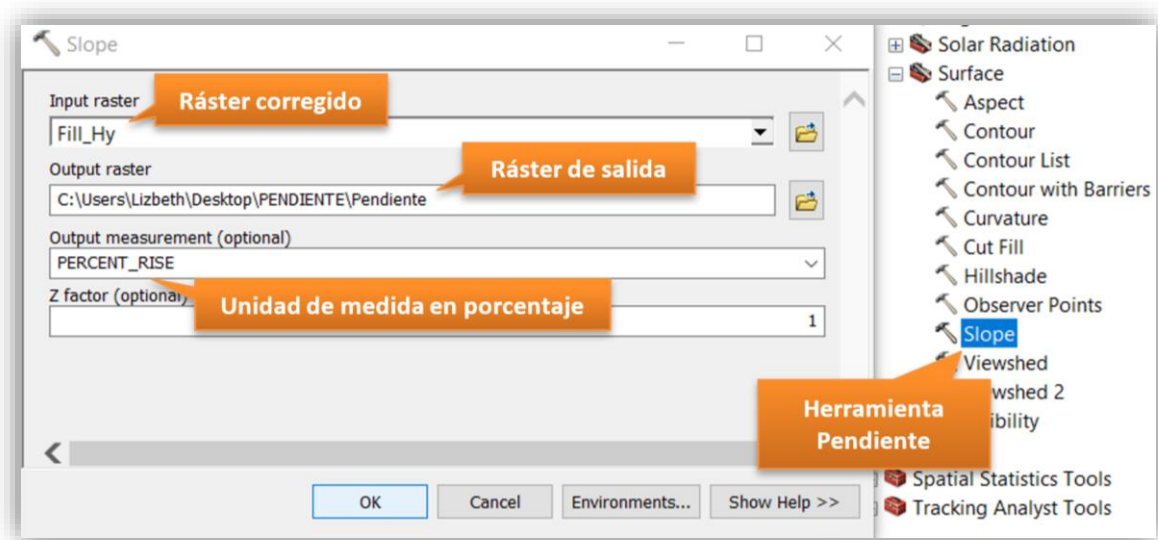


**Figura 31:** Primer DEM resultante



**Figura 32:** DEM de la cuenca Huarmey

Los sumideros son errores comunes que puede presentar un DEM, es por esta razón que, como solución ante este posible escenario, se aplicó la función Rellenar (*Fill*), que se encontró en la ruta **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Fill**. Este nuevo ráster corregido se utilizó para hallar las pendientes de la superficie, para lo cual se empleó la herramienta Pendiente (*Slope*), localizada en la dirección **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Surface > Slope**. Para el presente estudio, se necesitó un mapa de pendientes con las unidades de medidas en porcentaje, por lo cual en la ventana *Slope* se ingresaron los datos del ráster corregido, la ruta de salida y se especificó la unidad de medida en porcentaje (figura 33).



**Figura 33:** Ventana de la herramienta *Slope*

### c. Capacidad de Infiltración

Luego de haber descargado el Mapa de Hidrogeología Nacional del INGEMMET en formato *shape*, se procedió a utilizar la herramienta *Clip* de la opción *Geoprocessing*, en el programa ArcGIS, para delimitar los datos a la cuenca hidrográfica en estudio. Una vez que se obtuvo la capa de capacidad de infiltración delimitada, se realizó una comparación con los Mapas Geológicos Integrados y el TIN de la cuenca, donde se mostraba que algunas áreas de los tipos de suelo requerían modificaciones en su delimitación, razón por la cual se procedió a efectuar estas correcciones. Esta nueva capa corregida contó con una tabla de atributos que indicaba el tipo de permeabilidad que existía en los grupos de suelo de la zona de estudio. Según el nivel de la capacidad de infiltración, se clasificaron los tipos de suelo en los grupos

A, B y C; donde A representa el mayor nivel de infiltración, B el nivel medio de infiltración y C la más baja.

#### **d. Geología**

Una vez que se descargaron las cartas nacionales 20-g, 20-h, 20-i, 21-g y 21-h de los Mapas Geológicos Integrados en formato *shape* del portal GEOCATMIN, se procedió con el cambio del sistema de coordenadas de las cartas que se encontraban en la zona 17 sur de la proyección UTM, a la zona 18 sur, como se realizó para las curvas de nivel. Luego, estas cartas fueron fusionadas con la opción *Merge* de *Geoprocessing* y después se utilizó la herramienta *Clip* para delimitar los datos a la cuenca Huarmey. Finalmente, con la función *Dissolve* se simplificaron los datos de la capa de geología, que resultó en ocho unidades geológicas.

#### Unidades Geológicas de la Cuenca Huarmey

– Batolito de la Costa:

Está conformado por una masa de rocas ígneas de tipo plutónicas, compuesto por dioritas, tonalitas, gabros, granodioritas y monzogranitos. Forma parte del período Cretácico Superior – Paleógeno. Se presentan en forma de colinas y montañas a los lados del río Huarmey, entre las localidades de Tayca y Huamba, las cuales se ubican en la zona media de la cuenca. Debido a que en estas unidades geológicas se pueden encontrar fracturas de gran intensidad, son consideradas de gran riesgo, ya que son susceptibles a movimientos sísmicos, así como a erosiones hídricas, tal y como ocurrió en marzo del 2017, donde se produjeron derrumbes en este sector (Concha Niño de Guzmán et al. 2017).

– Depósito Aluvial:

Estas formaciones geológicas, pertenece al período Cuaternario y están localizadas en el valle de la cuenca, así como en las quebradas de esta, formando abanicos en algunas zonas. La mayor parte de esta unidad se presenta como rocas ígneas intrusivas en fracciones subredondeadas, y el resto como rocas sedimentarias como calizas y areniscas. Durante el fenómeno del Niño Costero, estos depósitos fueron afectados por las precipitaciones extraordinarias, los cuales generaron movimientos de masa de agua con detritos (huaycos) en esta zona (Concha Niño de Guzmán et al. 2017).

– Formación Chimú:

La edad de esta unidad es del Valanginiano inferior y ocupa un área pequeña en la parte superior de la cuenca. Se conforma por rocas sedimentarias, tales como ortocuarcitas, areniscas e intercalaciones de lutitas negras y capas de carbón antracítico (INGEMMET, 1995).

– Formación Junco:

Esta unidad pertenece al Cretácico Inferior y está compuesta principalmente por lavas almohadilladas, y en menor proporción por brechas sedimentarias. A pesar de que se desarrollaron flujos de detritos en Tayca y Monsalve, esta formación geológica no presentó derrumbes de gran magnitud durante los eventos del Fenómeno del Niño Costero (ATDR Casma-Huarmey, 2007; Concha Niño de Guzmán et al. 2017).

– Formación La Zorra:

Se encuentra ubicado en la zona costera de la cuenca Huarmey y pertenece a la edad Albiano medio a superior. Esta unidad presenta flujos piroclásticos, asimismo una intercalación de rocas sedimentarias e ígneas como las limolitas y andesitas, y finalmente cuenta con las rocas sedimentarias calizas y areniscas. Se encuentra sobre la Formación Junco y bajo la Formación Lupín. Durante las precipitaciones de marzo del 2017, no se produjeron mayores cambios en esta unidad, sin embargo, los depósitos cuaternarios ubicados sobre esta formación presentaron deslizamientos (Concha Niño de Guzmán et al. 2017).

– Formación Lupín:

Tiene una edad del Cretáceo Superior, y aflora en la zona media y baja de la cuenca Huarmey. Está compuesto principalmente por lavas almohadilladas y brechas, y en menor proporción de tufo andesítico. Esta unidad permaneció estable cuando se presentó el Fenómeno del Niño Costero en 2017 (ATDR Casma-Huarmey, 2007; Concha Niño de Guzmán et al. 2017).

– Formación Santa, Carhuaz:

Estas formaciones integran el Grupo Goyllarisquizga. La Formación Santa forma parte del período Valanginiano medio a superior y está compuesta por rocas sedimentarias, tales como

las calizas y lutitas calcáreas abigarradas, de igual forma presenta calizas negras, margas y lutitas oscuras. Por otro lado, la Formación Carhuaz sobreyace la Formación Santa y tiene una edad de Valanginiano superior. En la parte inferior de esta formación existe una composición donde predomina la arcilla y está compuesta por intercalaciones de rocas sedimentarias como las lutitas fosilíferas con areniscas, calizas y yeso. Así mismo, la parte superior se caracteriza por el color pardo rojizo de las areniscas y presenta lutitas y lutitas arenosas (INGEMMET, 1995).

– Grupo Calipuy

Ubicado en la parte superior de la cuenca Huarmey, abarcando la Cordillera Negra de Áncash. Forma parte del período tardío del Terciario Inferior. Esta unidad también llamada Volcánico Calipuy está compuesta principalmente por lavas andesíticas, toba volcánica, piroclastos, aglomerados y lavas ácidas, así también de cuerpos intrusivos subvolcánicos. Esta unidad no presentó alteraciones durante las precipitaciones en marzo del 2017 (ATDR Casma-Huarmey, 2007; Concha Niño de Guzmán et al. 2017).

### **e. Geomorfología**

El archivo *shape* del Mapa Geomorfológico del Perú se agregó al marco de datos (*Data Frame*) de ArcMap para que sea recortado con la herramienta *Clip* de la opción *Geoprocessing*, de acuerdo al área de estudio. A la capa resultante, se le aplicó la función *Dissolve*, y esto dio como resultado cinco unidades geomorfológicas.

#### Unidades Geomorfológicas de la Cuenca Huarmey

– Colinas y lomadas

Se localizan en la parte media baja de la cuenca, a ambos lados del valle, con elevaciones que van de 50 a 300 m. y pendientes suaves. Así mismo, presentan cumbres y laderas redondeadas. Esta unidad presenta rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias, las cuales pueden ser vulnerables a movimientos en masa, deslizamientos o derrumbes, dependiendo de su composición, grado de fracturamiento y exposición ante efectos climáticos (erosión o meteorización) (Zavala et al. 2009).



– Mantos de arena

Se originan por la migración y acumulación de arena debido a procesos eólicos y la geomorfología de la zona, y pueden presentar formas alargadas, onduladas o de dunas. En la cuenca de estudio, los mantos se encuentran adyacentes a las colinas (Zavala et al. 2009).

– Montaña con pendientes suaves a moderadas

Se encuentra distribuida a lo largo de la cuenca, con pendientes de  $15^\circ$  a  $29^\circ$ , y están localizadas adyacente a montañas estructurales de laderas escarpadas. El relieve de las montañas está relacionado con la formación de cárcavas, derrumbes y huaycos. Las rocas intrusivas que se presentan en esta unidad pueden ser vulnerables a movimientos de masa (Zavala et al. 2009).

– Montaña con pendientes moderadas a fuertes

En esta unidad existen laderas que van de moderadas a fuertes, no menores a  $30^\circ$  y llegando a superar los  $70^\circ$ . Se localizan a partir de la parte media a la parte alta de la cuenca y presenta rocas intrusivas, sedimentarias y volcano-sedimentarias. En esta zona existe la posibilidad de caídas de rocas, deslizamientos, derrumbes y avalanchas de detritos (Zavala et al. 2009).

– Terraza aluvial

Esta unidad está ubicada sobre el cauce y la zona de inundación fluvial, y está rodeada por los valles de la cuenca. Esta unidad presenta una superficie plana, con pendientes de  $1^\circ$  a  $5^\circ$ , y depósitos aluviales en forma de terrazas. Es susceptible a inundaciones periódicas, así como erosión y derrumbes en los márgenes (Zavala et al. 2009).

## **f. Factor Forma**

Şen (2008) indicó que el factor forma presenta una relación con la cantidad de esorrentía que se da en la cuenca, al igual que con la formación de inundaciones. Así mismo, en el caso de que existan dos cuencas con una misma área, la cuenca con forma más alargada tendrá un caudal máximo menor, que la cuenca con una forma más redonda. Debido a lo explicado, es que se requirió de esta capa y para ello se utilizó la fórmula de factor forma propuesto por Horton.

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

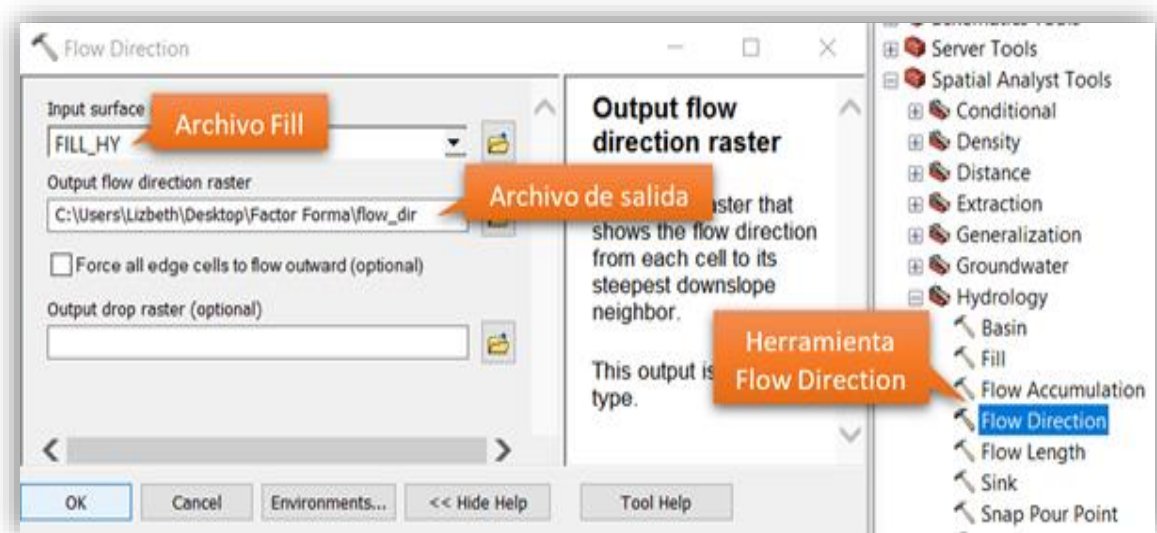
Donde:

$K_f$ : Factor forma

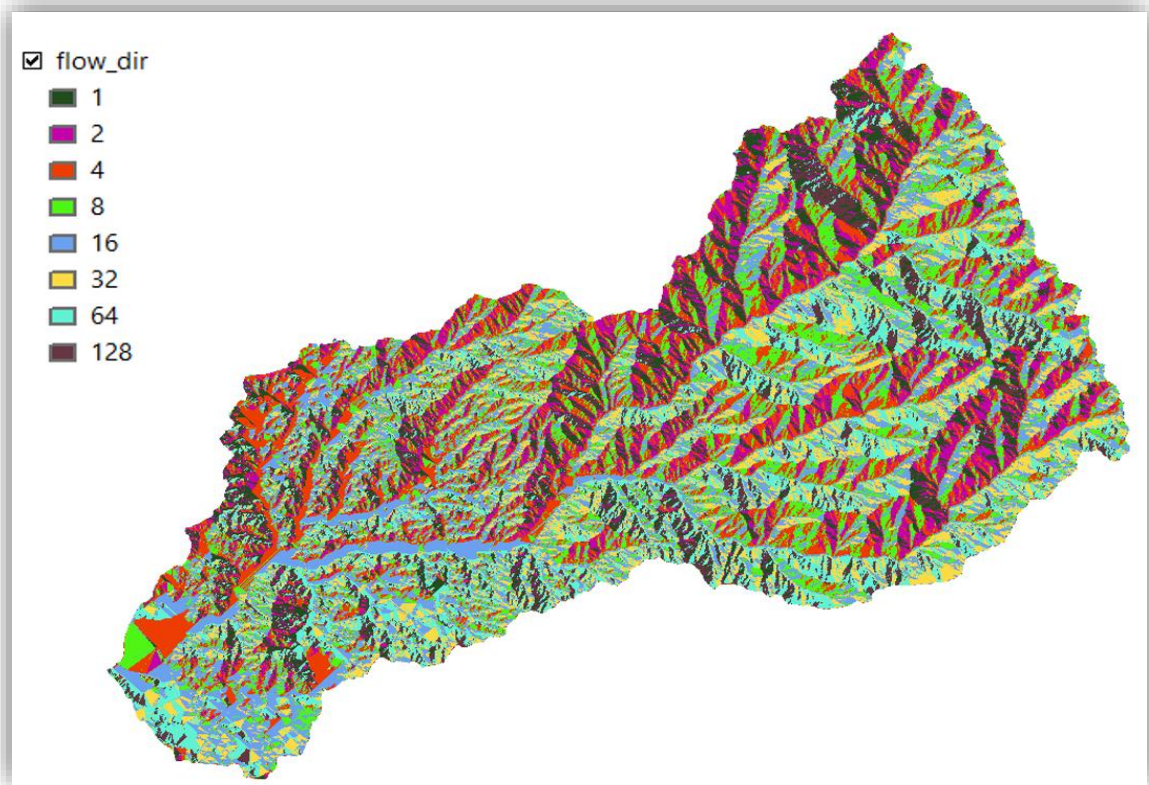
A: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

L: Longitud de la cuenca (km)

El procedimiento comenzó con la delimitación de las subcuencas de la zona de estudio. Para esto, se requirió del DEM corregido con la herramienta *Fill*, elaborado previamente para el mapa de pendientes y de las herramientas de Hidrología (*Hydrology*) del *software* ArcGIS. Como primer paso, se utilizó el ráster “Fill\_Hy”, para hallar la dirección de flujo de cada celda con la opción *Flow Direction*, que se encontró en la ruta **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Direction**, donde se ingresó el archivo “Fill\_Hy” y la dirección del archivo de salida (figura 34). El ráster generado, “Flow\_Dir”, se observa en la figura 35.

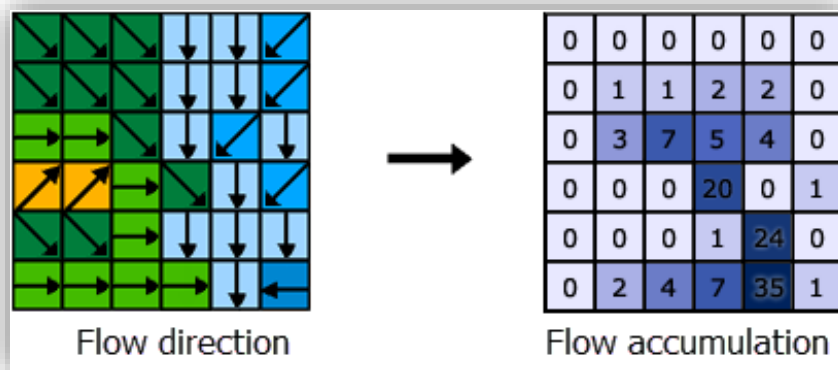


**Figura 34:** Ventana de *Flow Direction*

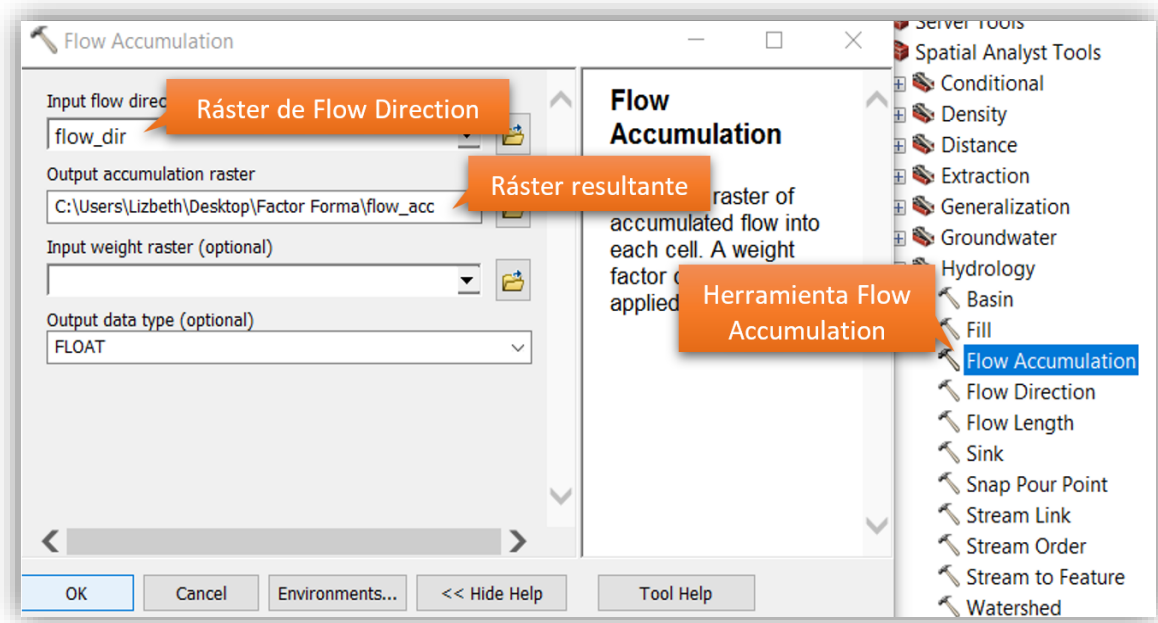


**Figura 35:** Ráster de *Flow Direction*

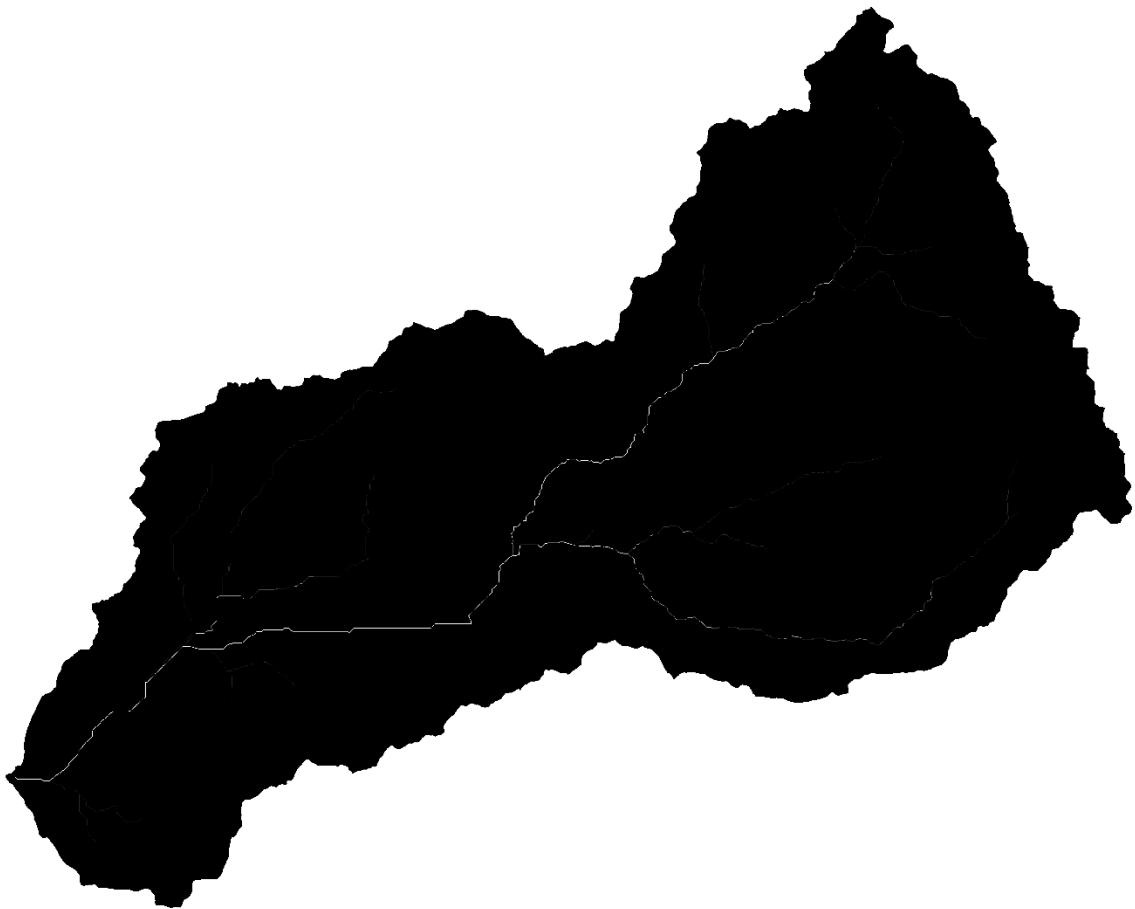
Luego, se hallaron las acumulaciones de flujo de cada celda con la función *Flow Accumulation* (figura 36), localizado en la ruta **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Accumulation**, en esta ventana se ingresaron el ráster de dirección de flujo y el nombre del archivo resultante, que fue “Flow\_Acc” (figura 37). El ráster que se obtuvo se muestra en la figura 38.



**Figura 36:** Determinación de acumulación de flujo (Fuente: Tomado de ESRI s.f.)

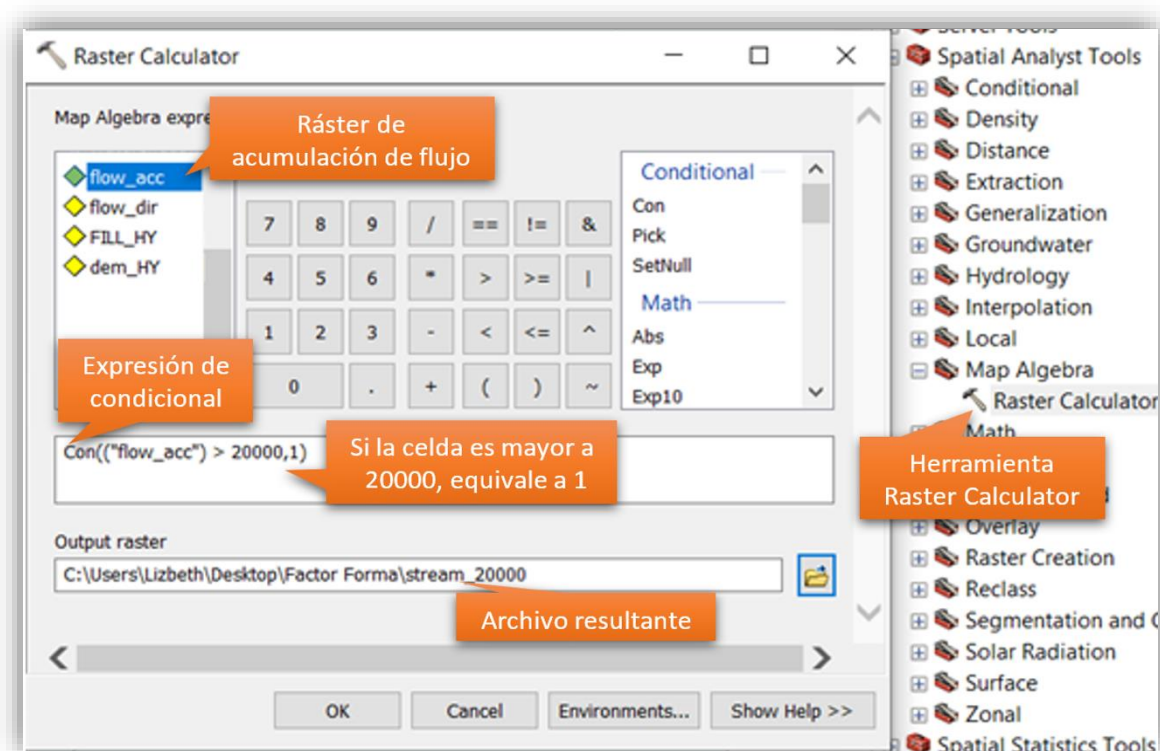


**Figura 37:** Ventana de *Flow Accumulation*

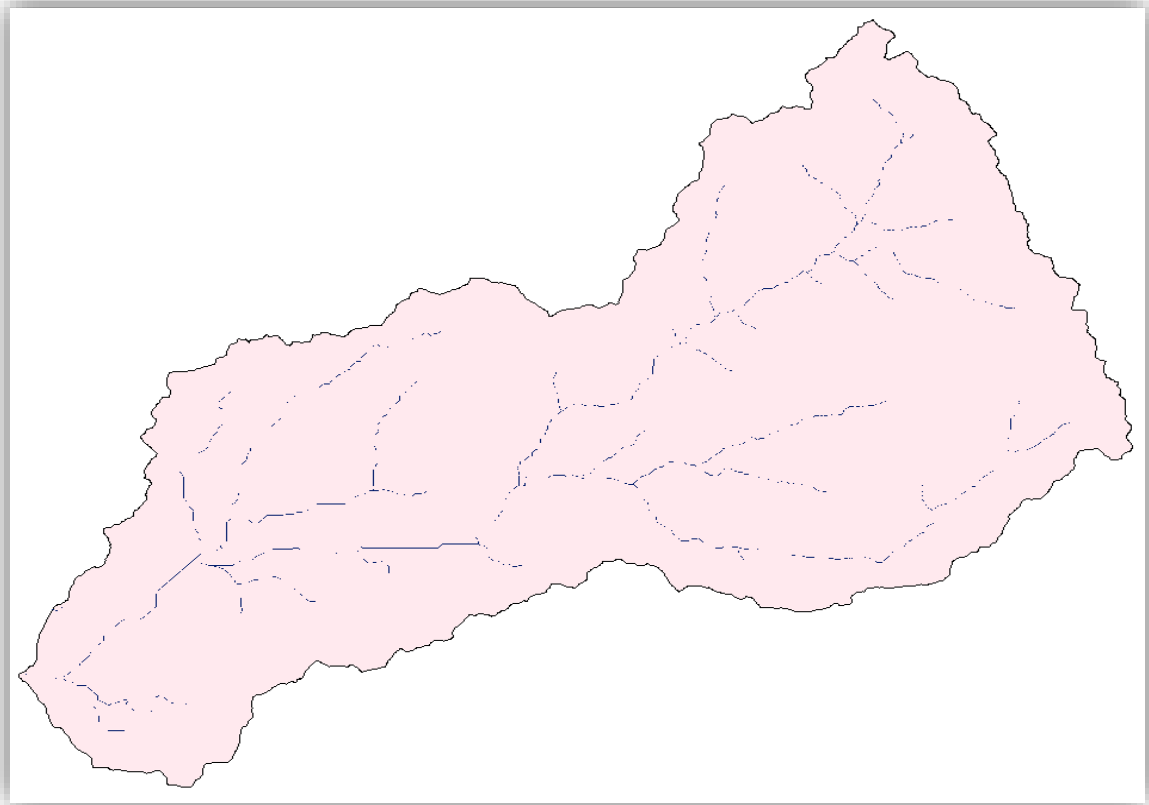


**Figura 38:** Ráster de *Flow Accumulation*

A continuación, se procedió con la identificación de las redes de drenaje, que se realizó mediante la Calculadora de Ráster (*Raster Calculator*), cuya función fue determinar la red de flujo utilizando una expresión condicional, donde las celdas que tuvieron una acumulación de flujo con valores mayores a 20,000 (valor adecuado para este estudio), equivalieron a uno y el resto de celdas que no cumplían con esta condición, se dio un valor de cero (figura 39). Esta herramienta se encontró en la dirección **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator**. El presente cálculo dio como resultado el ráster de la figura 40.

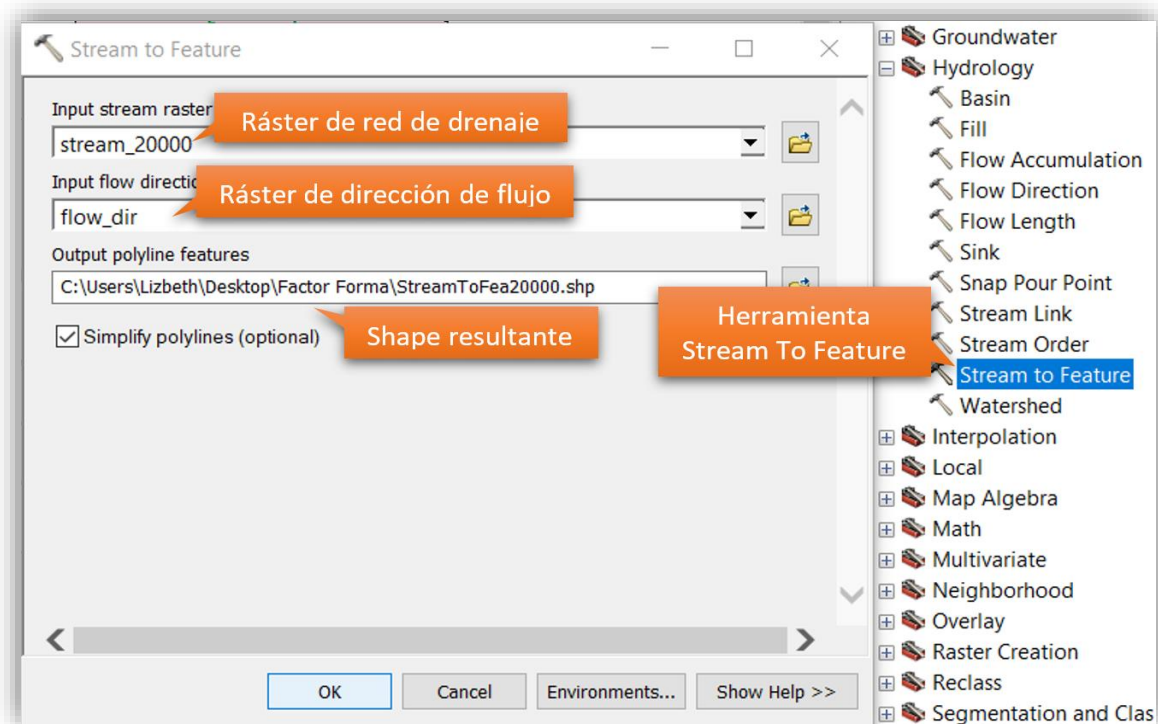


**Figura 39:** Ventana de *Raster Calculator*

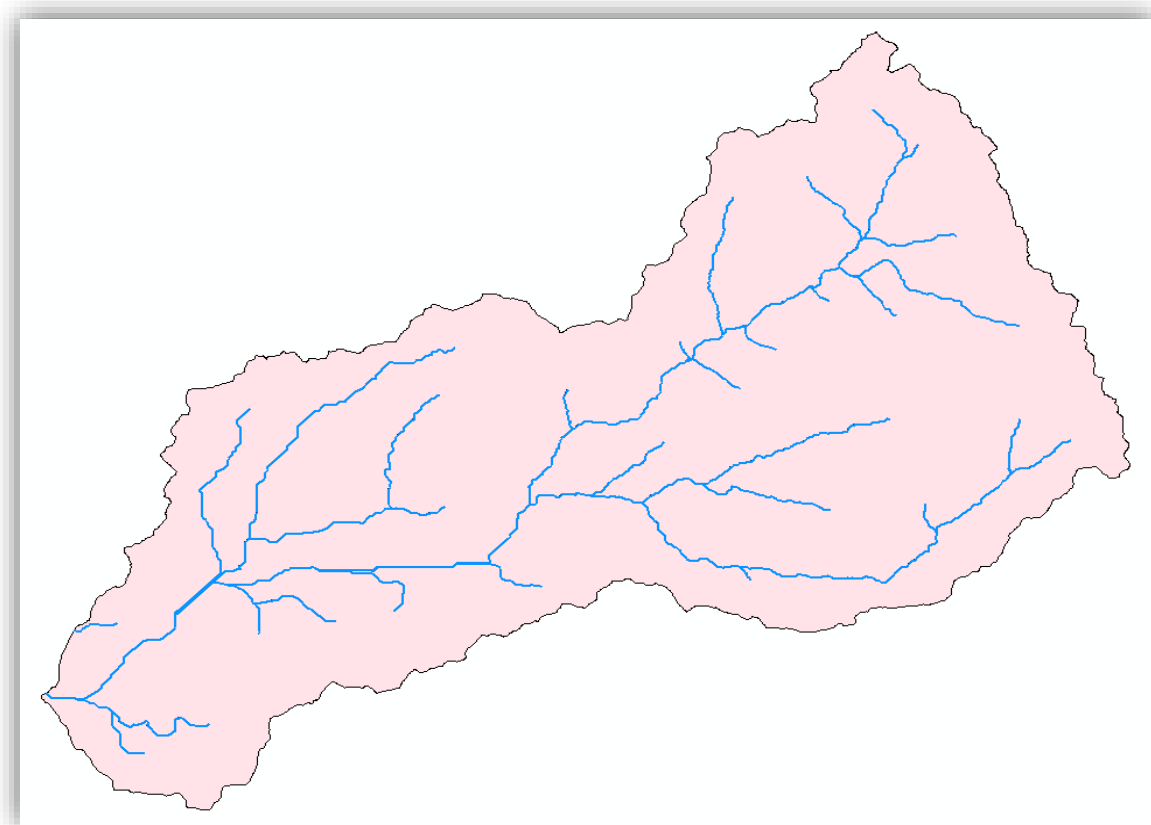


**Figura 40:** Ráster de Red de drenaje de la cuenca Huarney

Después, las redes de drenaje fueron transformadas de un formato ráster a un formato *shape*, para lo cual se usó la herramienta De Corriente a Entidad (*Stream to Feature*), que se encontró en la ruta **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Stream To Feature**. En esta ventana se añadieron los datos del ráster de redes de drenaje, calculados anteriormente; el ráster de dirección de flujo y la ubicación del *shape* de salida (figura 41). El archivo de polilínea de las redes de drenajes se puede ver en la figura 42.

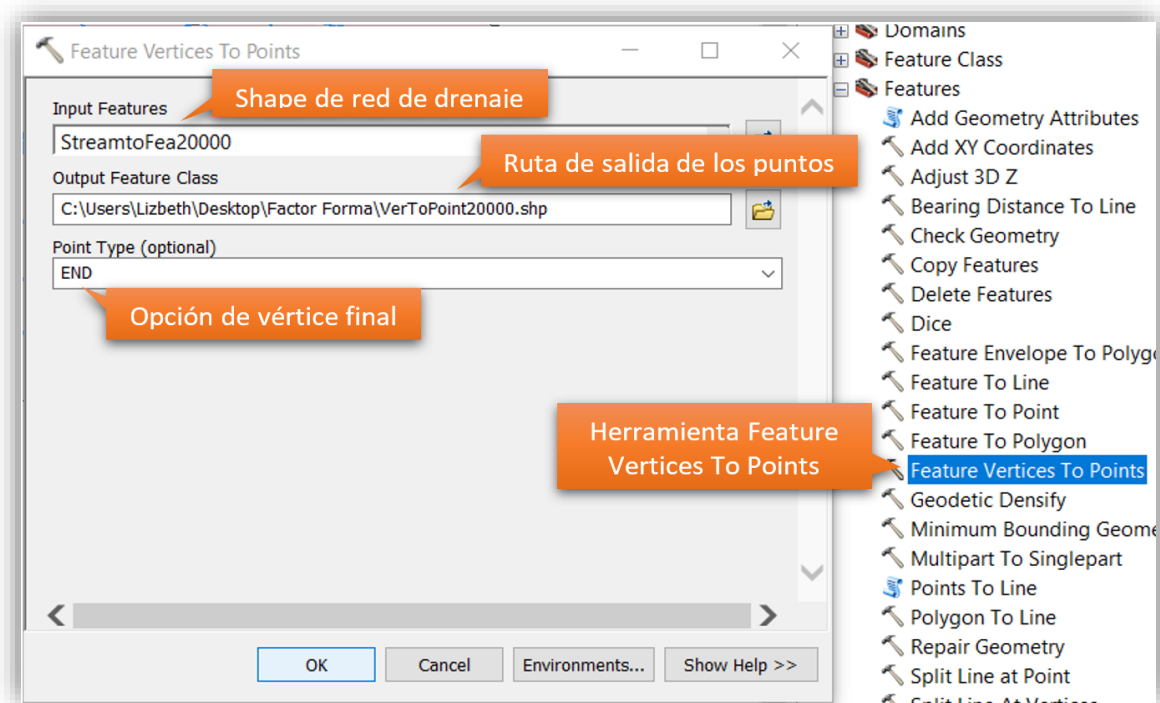


**Figura 41:** Ventana de *Stream To Feature*



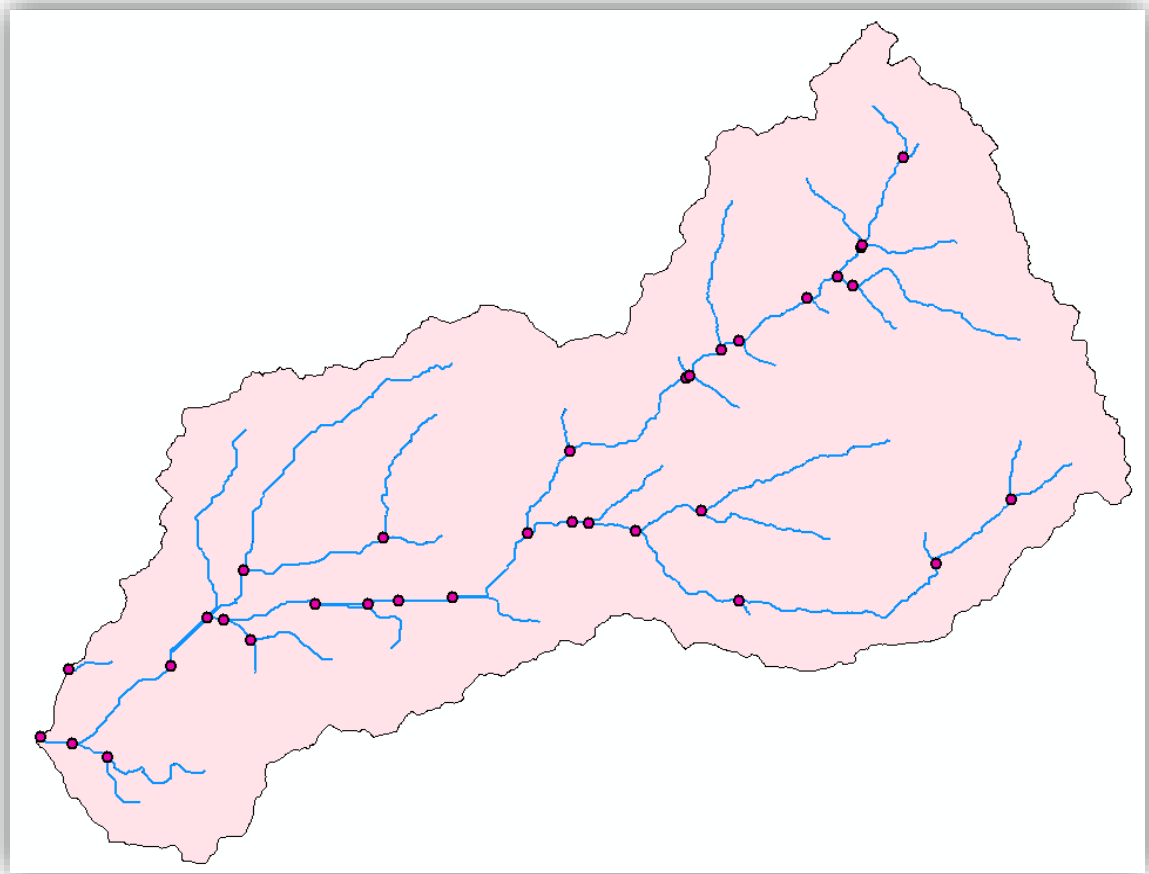
**Figura 42:** *Shape* de red de drenaje

Este archivo de polilínea de los arroyos sirvió para hallar los puntos de desfogue de las subcuencas de la zona de estudio. Por medio de la función De Vértices de Entidad a Puntos (*Feature Vertices To Points*), ubicado en **ArcToolbox > Data Management Tools > Features > Feature Vertices To Points**, se transformaron los vértices donde terminan las redes, en un nuevo archivo de puntos que representan los puntos de salida de las subcuencas. Para ello, se requirió del *shape* de red de drenaje, llamado “StreamToFea20000”, la ruta de salida de los puntos y la selección del tipo de vértice que generaran los puntos, que en este caso es el vértice final (figura 43). El resultado se puede ver en la figura 44.



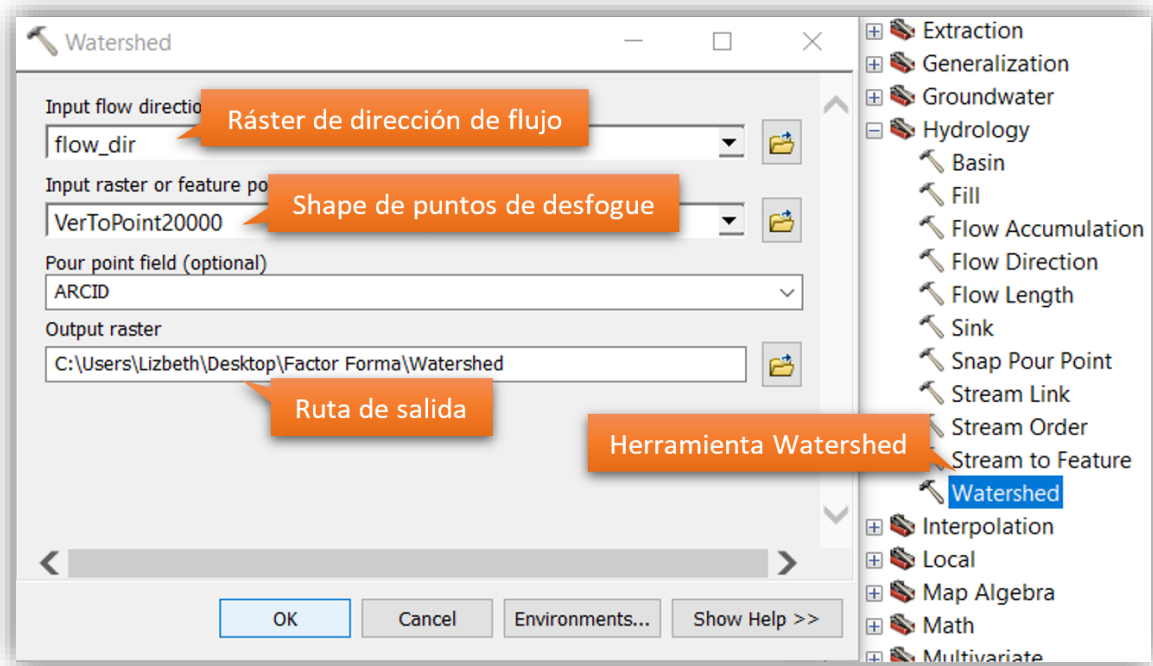
**Figura 43:** Ventana de *Feature Vertices To Points*



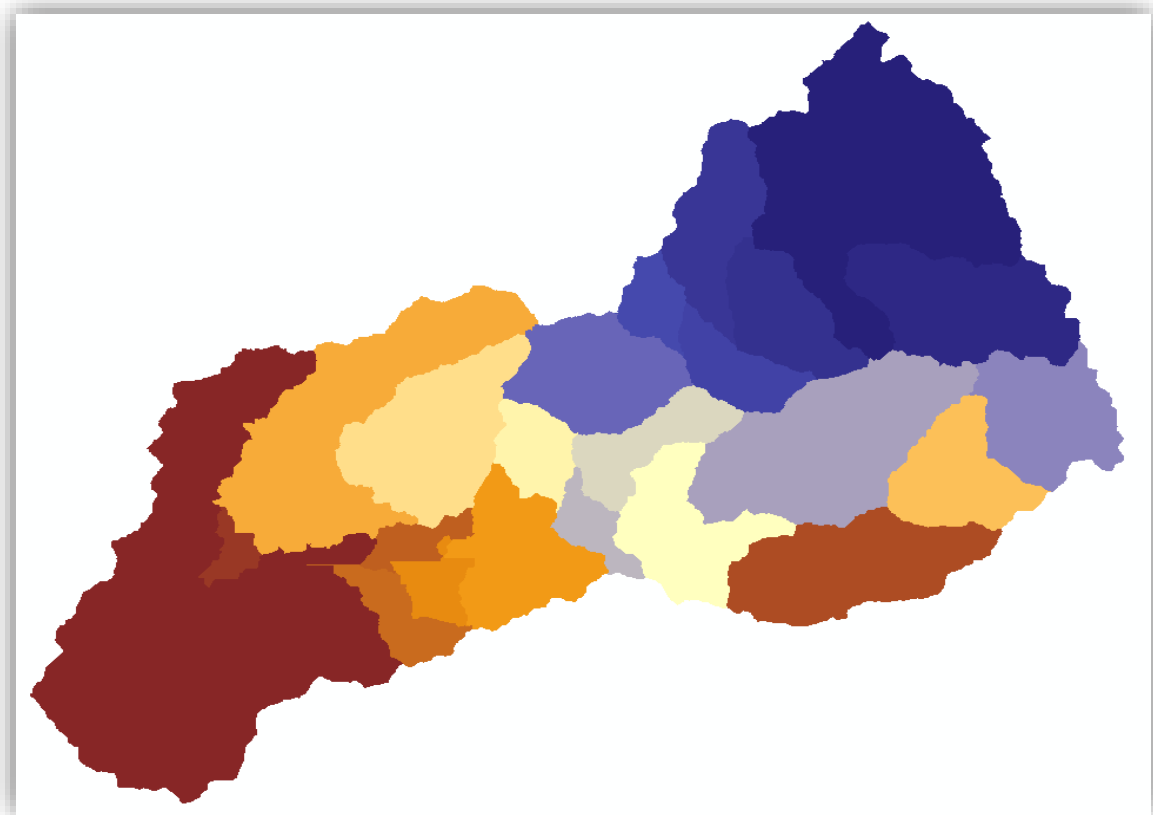


**Figura 44:** Puntos de desfogue

Como siguiente paso, se procedió con la delimitación de las subcuencas de la zona de estudio, para lo cual se utilizó la herramienta Cuenca Hidrográfica (*Watershed*), cuya ruta es **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Hydrology > Watershed**. Para ejecutar esta función, se añadieron el ráster de dirección de flujo, el archivo de los puntos de desfogue y la ubicación del archivo de salida (figura 45). Las subcuencas delimitadas se muestran en la figura 46.

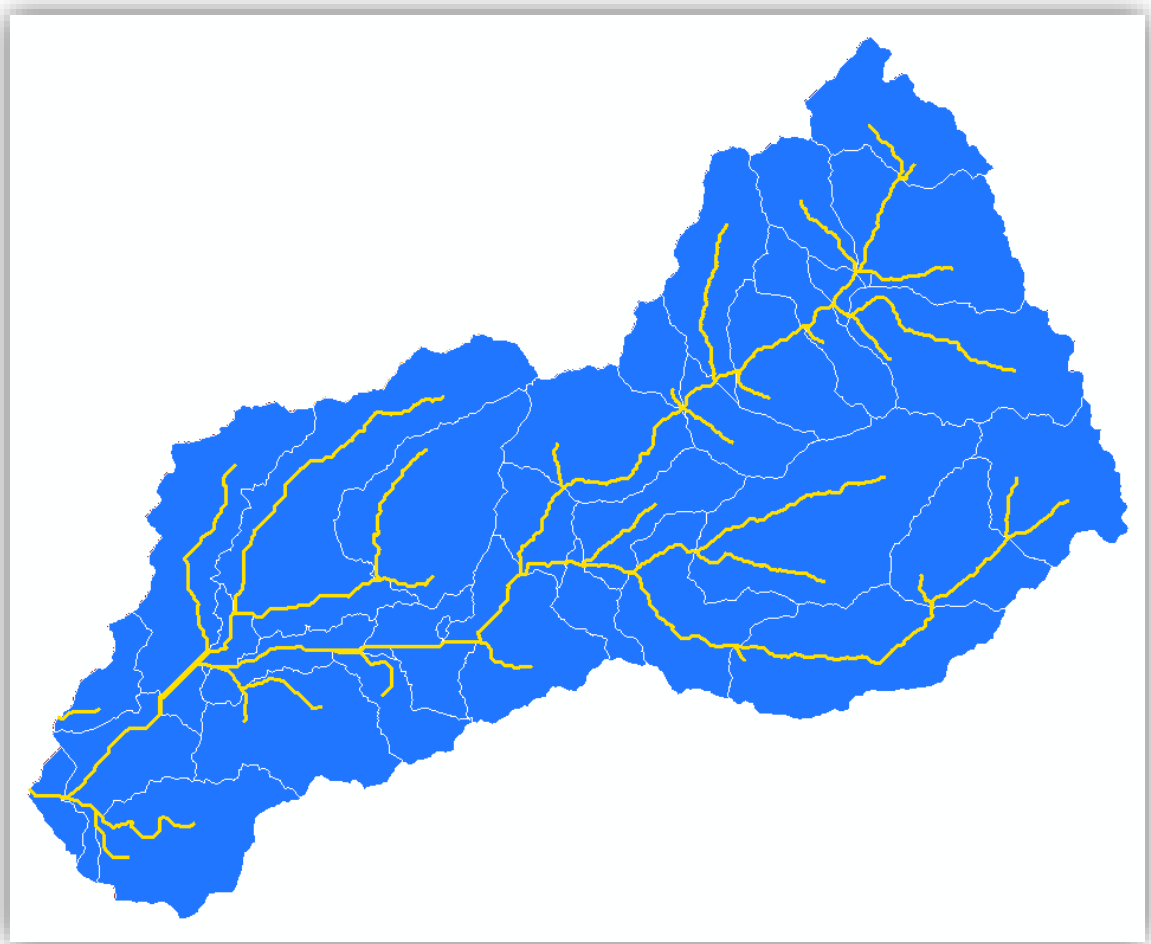


**Figura 45:** Ventana de *Watershed*



**Figura 46:** Ráster de las subcuencas de Huarney

Finalmente, se halló el parámetro de factor forma para cada subcuenca. Para realizar este cálculo, se tuvo que convertir el ráster de subcuencas en un archivo de formato *shape* (figura 47), con el fin de determinar las longitudes y áreas de las cuencas. Las longitudes (del punto de desfogue al punto más lejano de la línea divisoria de aguas), se hallaron con la herramienta Medir (*Measure*) de ArcGIS, y las áreas, con la función Calcular Geometría (*Calculate Geometry*), ubicado en la Tabla de Atributos del archivo *shape*; ambos datos se calcularon en km y km<sup>2</sup>, respectivamente.



**Figura 47:** *Shape* de las subcuencas de Huarney

Luego, el factor forma de cada unidad hidrográfica se encontró con la función Calculadora de Campo (*Field Calculator*), donde se ingresó la división del área entre la longitud al cuadrado (figura 48). A los valores resultantes de las subcuencas, se les asignaron la forma correspondiente de acuerdo a la Tabla 3.

**Tabla 3:** Forma de la cuenca según los valores de Factor Forma (Fuente: Tomado de Pérez, citado por Córdova 2016)

Factor de forma (valores aproximados)	Forma de la cuenca
<0.22	Muy alargada
0.22 a 0.30	Alargada
0.30 a 0.37	Ligeramente alargada
0.37 a 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 a 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 a 0.80	Ensanchada
0.80 a 1.20	Muy ensanchada
>1.20	Rodeando el desagüe

FID	Shape	GRIDCODE	AREA_KM2	LONG_KM	Factor Forma	Forma Cuenca
4	Polygon	14	72.865625	16.985317	0.252566	Alargada
12	Polygon	28	49.894335	13.360405	0.279519	Alargada
17	Polygon	38	186.287208	28.366702	0.231508	Alargada
11	Polygon	23	86.666077	11.49516	0.655872	Ensanchada
21	Polygon	30	80.875711	10.653516	0.712578	Ensanchada
1	Polygon	4	43.742606	11.189606	0.349362	Ligeramente Alargada
5	Polygon	18	25.903606	8.36624	0.370083	Ligeramente Alargada
14	Polygon	25	170.129478	22.310872	0.34178	Ligeramente Alargada
23	Polygon	47	116.801029	19.66073	0.302167	Ligeramente Alargada
26	Polygon	58	27.055137	9.258964	0.315591	Ligeramente Alargada
9	Polygon	17	40.146806	8.716095	0.528454	Ligeramente Ensanchada
13	Polygon	31	35.056916	8.119219	0.531796	Ligeramente Ensanchada
18	Polygon	45	19.796791	5.949537	0.559279	Ligeramente Ensanchada
24	Polygon	41	22.129653	6.14162	0.58669	Ligeramente Ensanchada
25	Polygon	40	83.040753	11.814847	0.594888	Ligeramente Ensanchada
29	Polygon	55	93.981835	12.501087	0.601379	Ligeramente Ensanchada
31	Polygon	61	57.522406	10.879121	0.486015	Ligeramente Ensanchada
32	Polygon	63	98.392019	14.632648	0.45953	Ligeramente Ensanchada
22	Polygon	51	29.777438	12.076584	0.204173	Muy Alargada
27	Polygon	56	126.213498	24.464505	0.210879	Muy Alargada
28	Polygon	44	33.035305	12.773216	0.202478	Muy Alargada
0	Polygon	1	71.408876	8.972426	0.887018	Muy Ensanchada
2	Polygon	3	106.826673	11.424522	0.818472	Muy Ensanchada
3	Polygon	7	9.343584	2.856677	1.144962	Muy Ensanchada
8	Polygon	13	64.34744	6.669874	1.446425	Muy Ensanchada
10	Polygon	21	88.864379	9.610781	0.962078	Muy Ensanchada
16	Polygon	36	71.215387	8.080595	1.090654	Muy Ensanchada
7	Polygon	11	116.796463	17.622798	0.37608	Ni Alargada Ni Ensanchada
15	Polygon	33	117.816991	17.371851	0.390405	Ni Alargada Ni Ensanchada
20	Polygon	49	12.722997	5.488383	0.422377	Ni Alargada Ni Ensanchada
6	Polygon	9	43.736361	2.963956	4.978507	Rodeando el desagüe
19	Polygon	26	23.447348	1.933718	6.270576	Rodeando el desagüe
30	Polygon	60	19.150252	2.63587	2.7563	Rodeando el desagüe

**Figura 48:** Resultados en la tabla de atributos

### g. Precipitación

El Mapa de Precipitaciones se desarrolló gracias a los datos de SENAMHI. Las estaciones climáticas de Malvas, Cotaparaco, Chamana y Huarney fueron las que se utilizaron, y el período de tiempo en que los datos fueron recolectados fue de 21 años (1990-2010). Estos valores fueron ordenados en una hoja Excel, sin embargo, debido a la falta de data de precipitaciones (PP) que se presentaron en algunos meses de las estaciones, se utilizó el método de Regresión Lineal para completar la información faltante (Tabla 4).

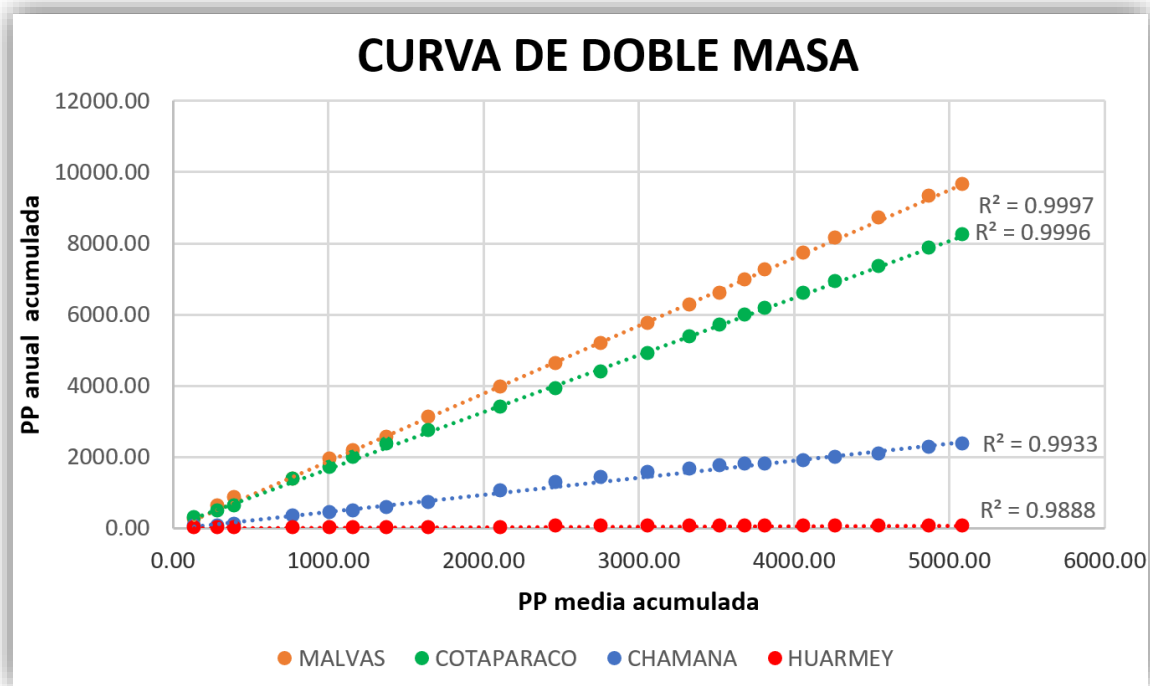
**Tabla 4:** Datos completos por método de Regresión Lineal

AÑO	PP de Estaciones (mm)				PP media anual (mm)
	MALVAS	COTAPARACO	CHAMANA	HUARMEY	
<b>1990</b>	233.80	269.70	46.30	1.28	137.77
<b>1991</b>	370.20	229.00	28.00	0.78	156.99
<b>1992</b>	238.30	142.70	30.10	0.83	102.98
<b>1993</b>	551.70	718.86	219.40	6.08	374.01
<b>1994</b>	518.80	337.50	100.90	2.80	240.00
<b>1995</b>	251.80	278.80	60.00	1.66	148.07
<b>1996</b>	393.80	366.00	105.60	2.93	217.08
<b>1997</b>	550.40	398.00	124.60	3.45	269.11
<b>1998</b>	862.50	671.70	339.70	9.42	470.83
<b>1999</b>	664.70	500.64	219.80	6.09	347.81
<b>2000</b>	567.10	486.20	128.54	2.70	296.14
<b>2001</b>	559.10	498.70	144.74	1.60	301.03
<b>2002</b>	517.44	455.30	103.90	1.00	269.41
<b>2003</b>	324.50	349.80	79.31	11.20	191.20
<b>2004</b>	343.80	259.86	52.70	1.46	164.45
<b>2005</b>	278.77	202.50	27.30	1.70	127.57
<b>2006</b>	510.40	407.47	74.50	0.20	248.14
<b>2007</b>	402.90	347.10	90.21	3.00	210.80
<b>2008</b>	562.80	410.60	119.38	0.90	273.42
<b>2009</b>	614.10	523.10	147.91	4.10	322.30
<b>2010</b>	333.50	405.37	115.77	2.20	214.21

Luego, con el fin de determinar si es que existen inconsistencias en los datos estimados, se realizó un análisis de curva de doble masa entre los valores acumulados de las precipitaciones anuales, con los promedios acumulados (Tabla 5). Esta comparación de datos, generó líneas rectas consistentes, las cuales indicaron una proporcionalidad entre los datos (figura 49). Sin embargo, en caso hubiera surgido inconsistencias en alguna estación, esta se habría eliminado.

**Tabla 5:** PP acumuladas

AÑO	PP acumuladas de Estaciones (mm)				PP media acumulada (mm)
	MALVAS	COTAPARACO	CHAMANA	HUARMEY	
<b>1990</b>	233.80	269.70	46.30	1.28	137.77
<b>1991</b>	604.00	498.70	74.30	2.06	294.77
<b>1992</b>	842.30	641.40	104.40	2.89	397.75
<b>1993</b>	1394.00	1360.26	323.80	8.98	771.76
<b>1994</b>	1912.80	1697.76	424.70	11.78	1011.76
<b>1995</b>	2164.60	1976.56	484.70	13.44	1159.82
<b>1996</b>	2558.40	2342.56	590.30	16.37	1376.91
<b>1997</b>	3108.80	2740.56	714.90	19.82	1646.02
<b>1998</b>	3971.30	3412.26	1054.60	29.24	2116.85
<b>1999</b>	4636.00	3912.90	1274.40	35.33	2464.66
<b>2000</b>	5203.10	4399.10	1402.94	38.03	2760.79
<b>2001</b>	5762.20	4897.80	1547.68	39.63	3061.83
<b>2002</b>	6279.64	5353.10	1651.58	40.63	3331.24
<b>2003</b>	6604.14	5702.90	1730.89	51.83	3522.44
<b>2004</b>	6947.94	5962.75	1783.59	53.30	3686.90
<b>2005</b>	7226.71	6165.25	1810.89	55.00	3814.46
<b>2006</b>	7737.11	6572.72	1885.39	55.20	4062.61
<b>2007</b>	8140.01	6919.82	1975.60	58.20	4273.41
<b>2008</b>	8702.81	7330.42	2094.98	59.10	4546.83
<b>2009</b>	9316.91	7853.52	2242.89	63.20	4869.13
<b>2010</b>	9650.41	8258.89	2358.66	65.40	5083.34

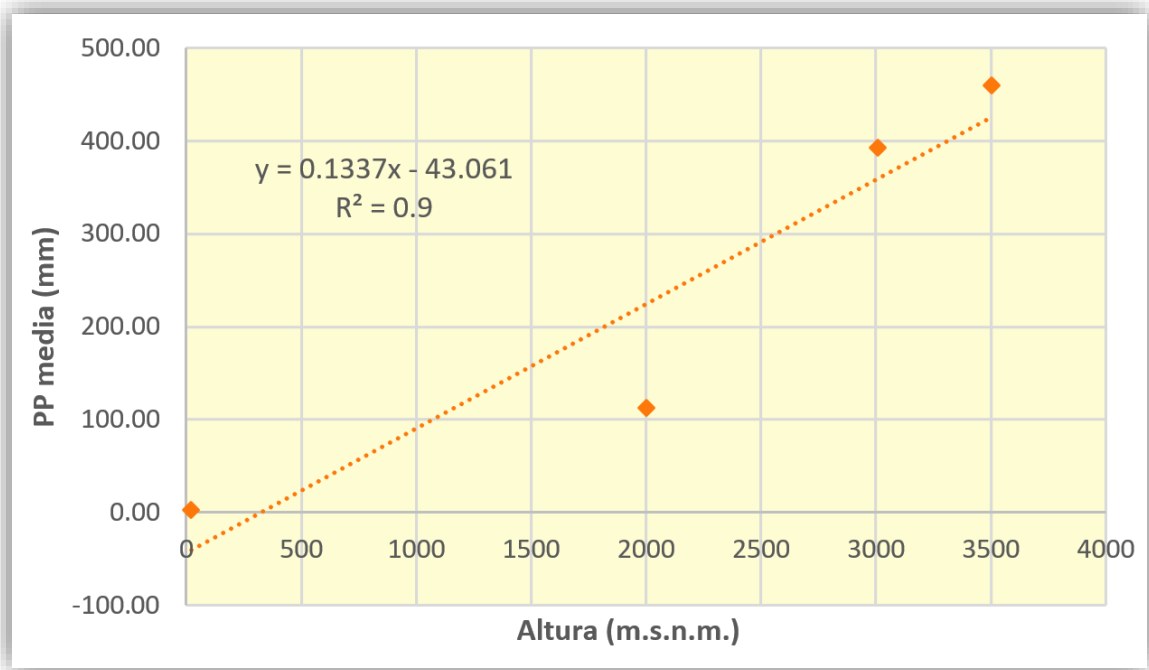


**Figura 49:** Curva de doble masa

Una vez que se comprobó la confiabilidad de los datos, se ordenaron las estaciones con la información de sus coordenadas, altura y precipitación anual media (Tabla 6). Después, con el fin de obtener más datos de precipitaciones en la zona de estudio, se crearon nuevos puntos en la cuenca. Para calcular el valor en estos nuevos puntos, se hizo una comparación entre altura y precipitación de las 4 estaciones (figura 50), la cual generó un  $R=0.9$ , que significó la validez de esta relación y permitió que se use la ecuación generada para hallar las nuevas precipitaciones, utilizando el valor de las alturas con que se cuentan.

**Tabla 6:** Datos completos de las estaciones

ESTACIONES	LATITUD	LONGITUD	ALTURA (m.s.n.m.)	PP media (mm)
MALVAS	-9.93°	-77.65°	3500	459.54
COTAPARACO	-9.98°	-77.58°	3008	393.28
CHAMANA	-10.25°	-77.57°	2000	112.32
HUARMEY	-10.08°	-78.17°	20	3.11



**Figura 50:** Relación Altura vs. PP media

Se agregaron 25 puntos adicionales a los 4 ya existentes. Se hallaron sus alturas gracias al DEM elaborado previamente y ya con estos datos, se calcularon los valores de precipitaciones con la ecuación señalada en la Figura 50. El resultado se puede observar en el Tabla 7.

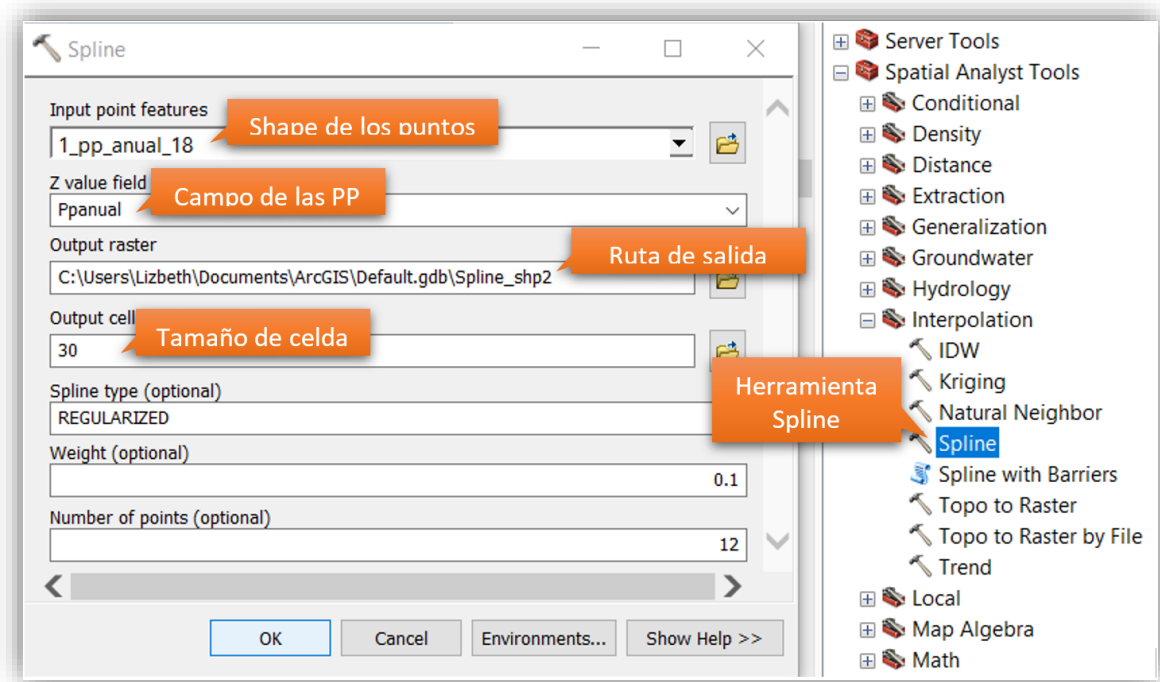
**Tabla 7:** Puntos con los nuevos datos de precipitaciones

<b>Id</b>	<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>	<b>Altura (m.s.n.m.)</b>	<b>PP media (mm)</b>
<b>1</b>	<b>209414.79</b>	<b>8900798.61</b>	<b>3500.00</b>	<b>459.54</b>
<b>2</b>	<b>216809.61</b>	<b>8895323.08</b>	<b>3008.00</b>	<b>393.28</b>
<b>3</b>	<b>218797.31</b>	<b>8865824.94</b>	<b>2000.00</b>	<b>112.32</b>
<b>4</b>	<b>152832.73</b>	<b>8883692.76</b>	<b>20.00</b>	<b>3.11</b>
<b>5</b>	167413.80	8880318.98	464.29	19.01
<b>6</b>	171394.66	8890314.06	380.42	7.80
<b>7</b>	175517.62	8884819.24	465.37	19.16
<b>8</b>	172351.52	8905813.11	600.00	37.16
<b>9</b>	176636.24	8899845.02	463.22	18.87



<b>10</b>	179982.53	8893552.42	450.98	17.24
<b>11</b>	184572.61	8888219.06	909.83	78.58
<b>12</b>	185474.93	8910669.73	2162.08	246.01
<b>13</b>	188836.05	8902480.13	1026.27	94.15
<b>14</b>	192182.69	8895870.90	1024.95	93.97
<b>15</b>	194407.91	8892096.84	1700.00	184.23
<b>16</b>	196606.05	8910289.25	2385.64	275.90
<b>17</b>	201237.23	8899739.37	1518.96	160.02
<b>18</b>	204605.76	8890127.39	2350.00	271.13
<b>19</b>	201094.25	8917279.25	3444.25	417.44
<b>20</b>	205559.96	8907675.76	3600.00	438.26
<b>21</b>	205575.61	8925374.29	4107.87	506.16
<b>22</b>	212602.22	8908837.79	4408.58	546.37
<b>23</b>	218130.05	8903192.42	4550.00	565.27
<b>24</b>	223657.39	8897388.63	4292.46	530.84
<b>25</b>	214024.99	8927494.26	3835.68	469.77
<b>26</b>	220242.47	8913795.03	4313.91	533.71
<b>27</b>	225013.32	8904508.96	4295.76	531.28
<b>28</b>	217215.54	8920250.24	4202.29	518.79
<b>29</b>	214476.02	8889732.90	3326.91	401.75

Finalmente, se hizo una interpolación de estos valores con la herramienta *Spline*, ubicada en la dirección **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Interpolation > Spline**, y en cuya ventana se agregó el archivo *shape* de los puntos; se seleccionó en el campo que contenía los valores Z, el campo de PP media anual; se indicó la ruta de salida del archivo ráster y el tamaño de celda, que en este estudio fue de 30 m. (figura 51).



**Figura 51:** Ventana de *Spline*

### 3.3.3. Fase de Campo

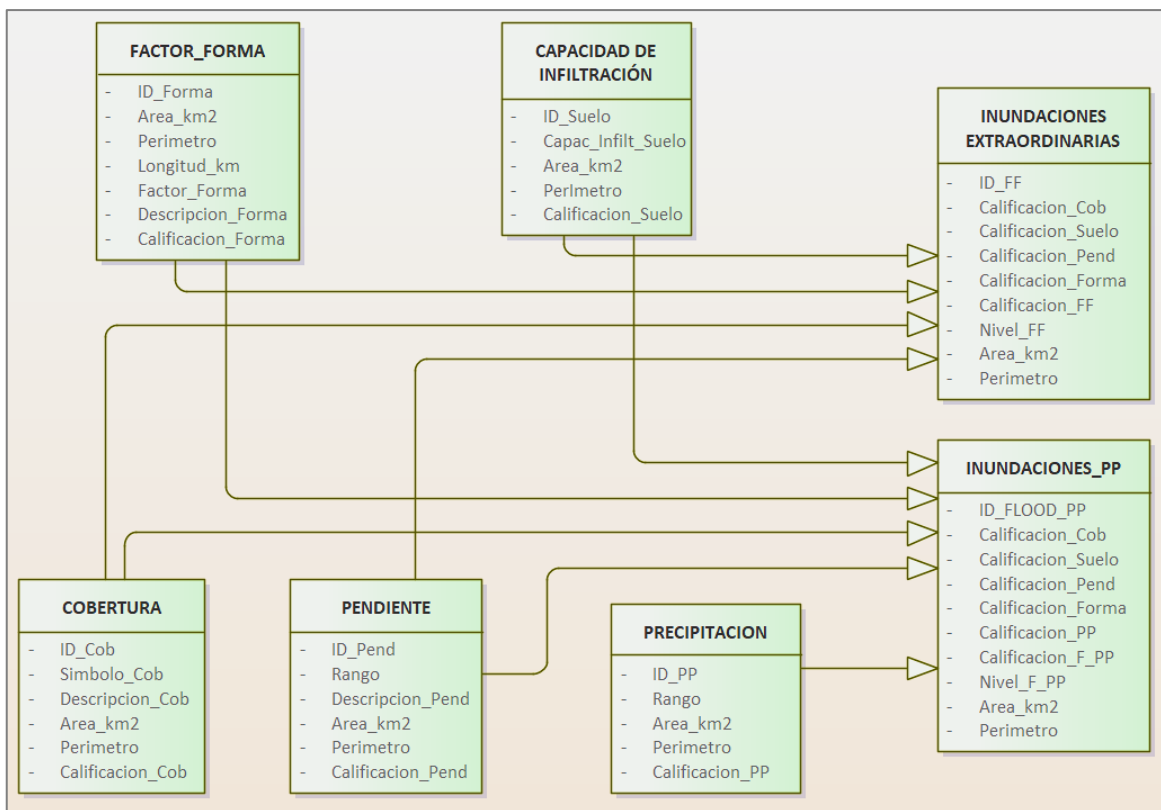
En la primera visita que se realizó, se efectuó la reunión con el director de la Agencia Agraria de Huarney, el Ing. Efraín Motta, a quien se le explicó el tema que trataba la tesis, así como los objetivos que esta buscaba. Como resultado de esta primera asamblea, se trazó un primer recorrido por la cuenca Huarney, para la identificación las características de las diferentes zonas que la conforman. Una vez que se estableció la ruta de viaje, se procedió con el reconocimiento de la cuenca, la zona urbana, las zonas agrícolas que la conforman, las áreas montañosas, etc.

La segunda visita que se realizó a la cuenca Huarney, fue luego de obtener los primeros modelos para realizar la validación de campo. Así mismo, se llevó a cabo la toma de muestras de los tipos de suelos que conformaban la cuenca, con el fin de obtener información de la textura y el porcentaje de materia orgánica; además que se realizaron pruebas de infiltración. Para esta segunda fase, también se contó con la ayuda del Ing. Motta, ya que se requirió del permiso de algunos propietarios, para poder ingresar a sus territorios y obtener dichas muestras.

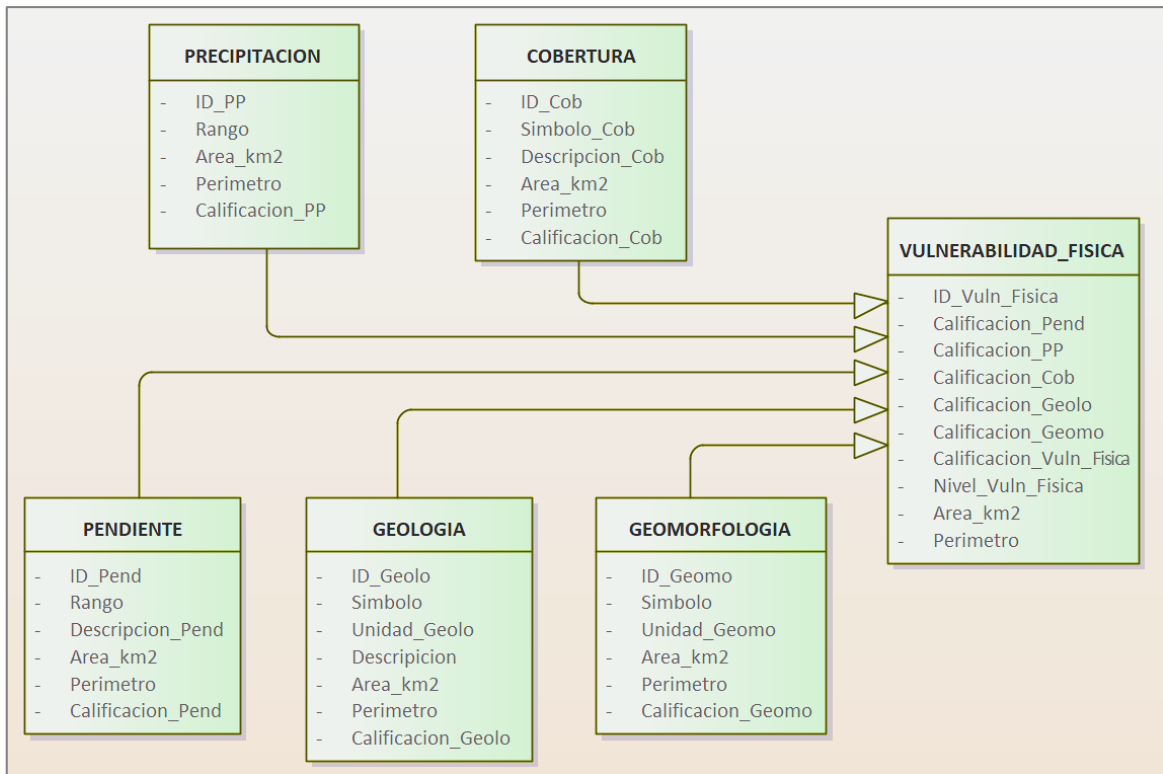
### 3.3.4. 2<sup>da</sup> fase de Geoprocesamiento

#### a. Construcción de Base de Datos Geospaciales

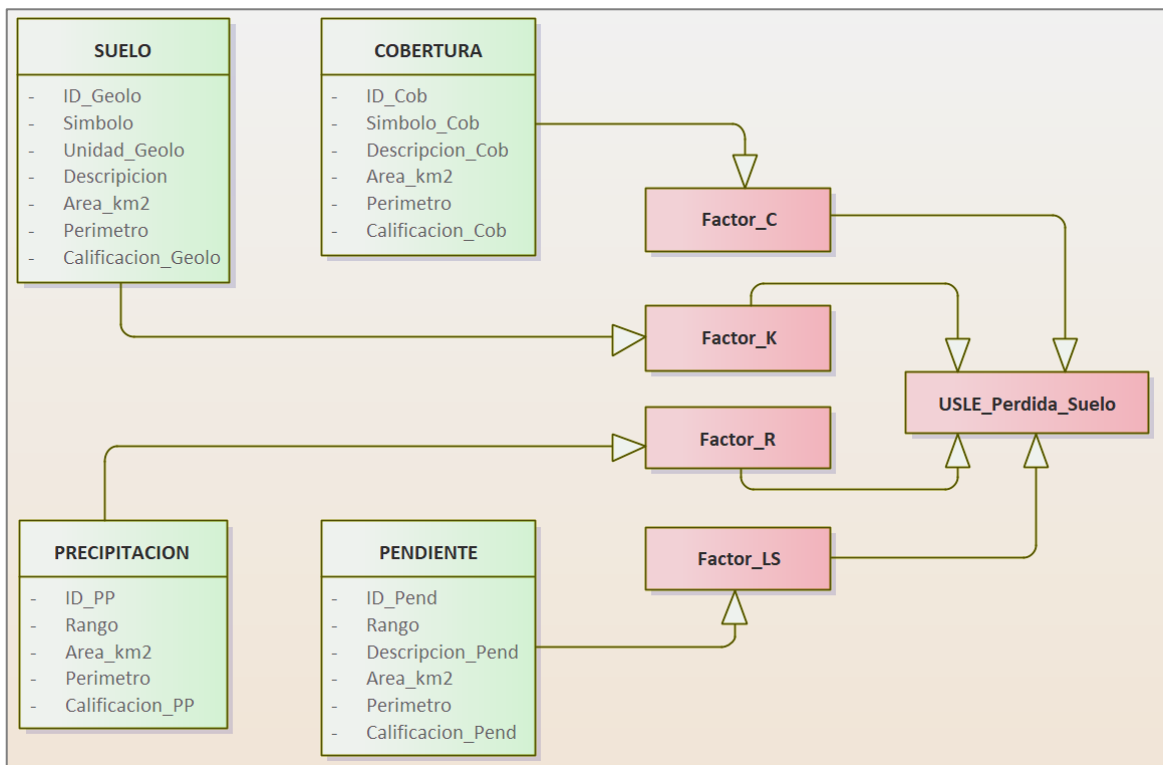
La base de datos del presente estudio fue diseñada gracias al *software* Enterprise Architect, con el cual se realizó el esquema lógico de las variables a utilizar para los modelos de inundaciones, vulnerabilidad y USLE, para luego construir la geodatabase en el *software* ArcGIS.



**Figura 52:** Esquema lógico de la base de datos de los modelos de inundaciones



**Figura 53:** Esquema lógico de la base de datos del modelo de vulnerabilidad



**Figura 54:** Esquema lógico de la base de datos del modelo USLE

## **b. Elaboración de los modelos geoespaciales de Inundaciones**

De acuerdo con Wahid et al. (2016), para la generación del Mapa de Índice Potencial de Inundaciones Extraordinarias, solo se requieren de cuatro capas temáticas, las cuales son: factor forma, pendiente, cobertura y capacidad de infiltración, y no se toma en cuenta la capa de precipitaciones, ya que el estudio se basa en precipitaciones inusuales, que no se registran normalmente en la zona.

Sin embargo, en la presente tesis se realizó un primer modelo, adaptado del estudio de Wahid et al., tomando en cuenta las cuatro capas mencionadas previamente y un segundo modelo, tomando en cuenta los datos de precipitaciones, esto con el fin de realizar una mejor identificación de las zonas vulnerables.

- **Mapa de Inundaciones Extraordinarias**

Para este modelo, no se tomó en cuenta la capa de precipitaciones y solo se usaron las variables de cobertura, capacidad de infiltración, factor forma; y el ráster de pendiente.

Entonces, para iniciar con este proceso se convirtieron las tres capas vectoriales al formato ráster ya que, para hallar el mapa de inundaciones extraordinarias, se requirió de la herramienta Superposición Ponderada (*Weighted Overlay*) de ArcGIS, la cual ejecuta esta función solo con archivos en formato ráster.

Por lo tanto, se procedió con la conversión de las capas vectoriales de cobertura, capacidad de infiltración y factor forma, a un formato ráster. Para ello se usó la herramienta Polígono a Ráster (*Polygon to Raster*), ubicado en la dirección **ArcToolbox > Conversion Tools > To Raster > Polygon to Raster**, donde se ingresaron los archivos vectoriales, se seleccionó el campo que se utilizó para asignar los valores del ráster, se añadieron las rutas de salida y se indicó el tamaño de celda, que en este caso para que la superposición funcione de forma correcta, todas las capas tuvieron un mismo tamaño de 30 m. (figura 55).

Así mismo, para que se efectúe este mismo procedimiento en las tres capas, se utilizó la aplicación *ModelBuilder*, donde se ingresaron los datos requeridos, que se explicaron

previamente para la conversión a un formato ráster y finalmente se dio clic a la opción correr (Run). En la figura 56 se muestra el modelo para este procesamiento.

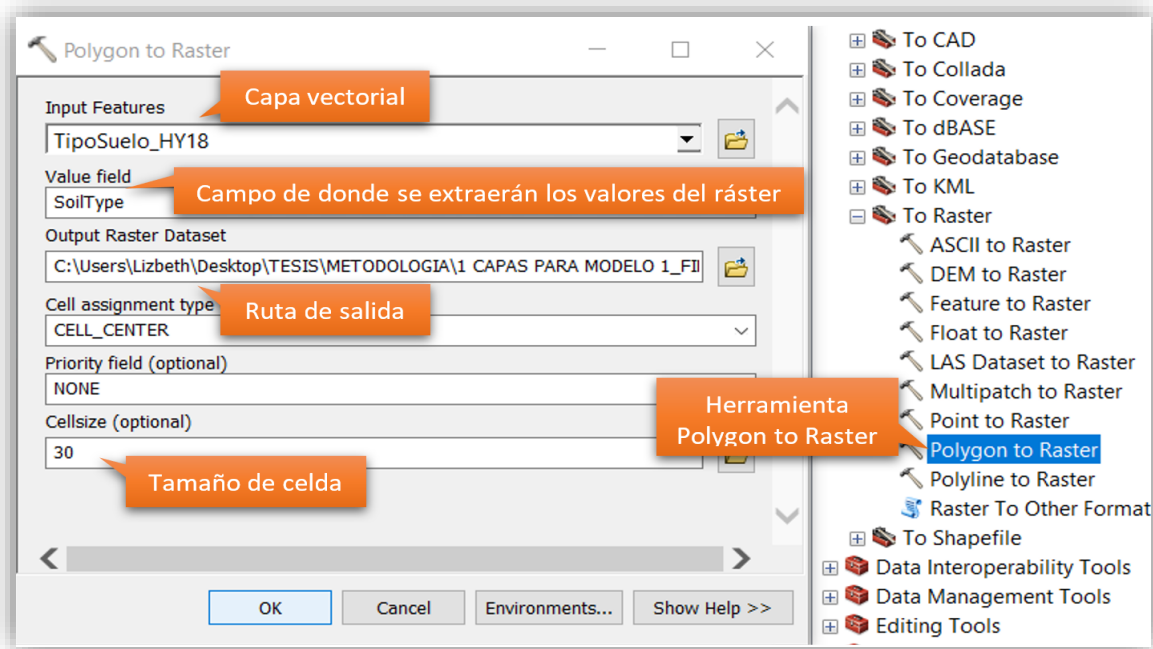


Figura 55: Ventana de *Polygon to Raster*

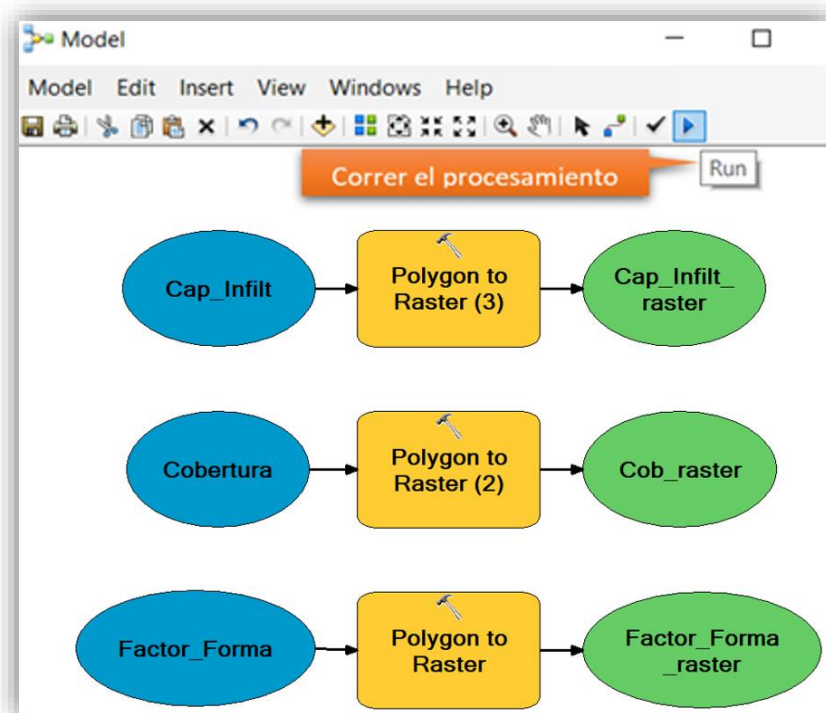


Figura 56: Uso de *ModelBuilder* para convertir un *shape* a ráster

Después, con la ayuda del *software* ArcGIS se reclasificaron estos valores según una escala de 1 a 10, de los cuales los valores que tenían menor impacto en la formación de inundaciones fueron los cercanos al uno, mientras que los que podían originar grandes escorrentías fueron los cercanos al 10 (Tabla 8).

**Tabla 8:** Pesos y niveles

Pesos	Nivel
1	Muy Bajo
2	
3	Bajo
4	
5	Moderado
6	
7	Alto
8	
9	Muy Alto
10	

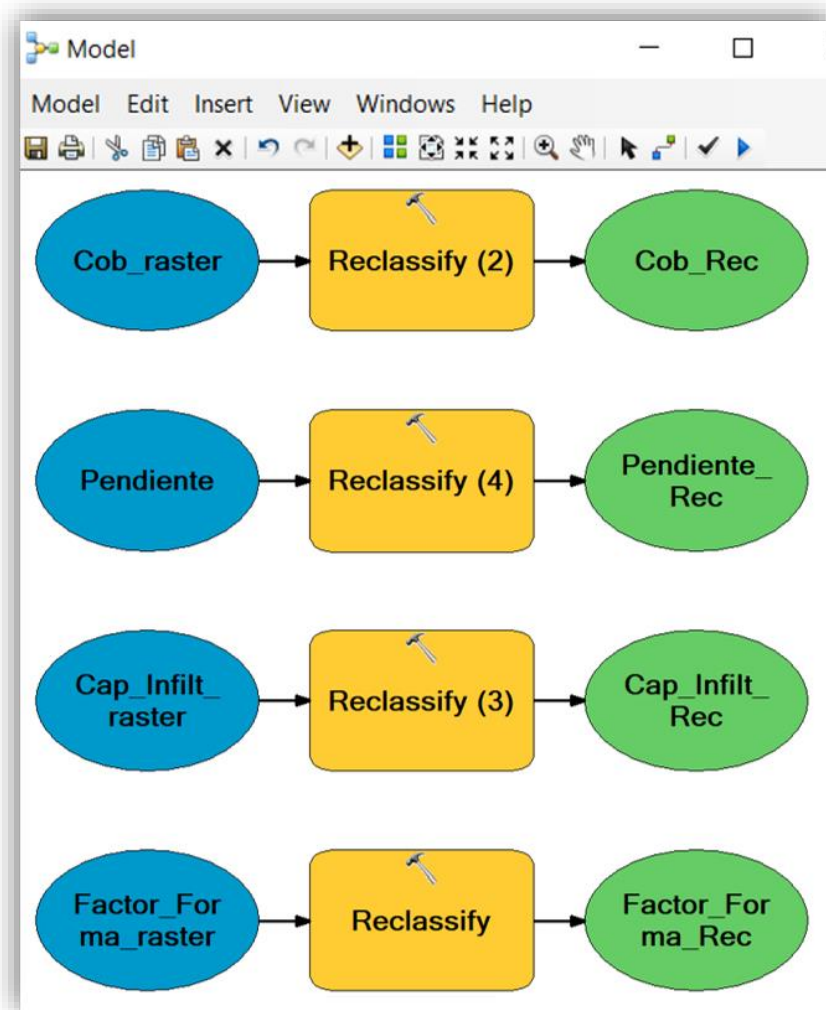
Gracias a esta tabla, se procedió con la reclasificación de las cuatro capas en formato ráster, que cabe recalcar contaban con un mismo tamaño de celda y se encontraban en el mismo sistema de coordenadas. Este proceso se realizó con la herramienta Reclasificar (*Reclassify*), ubicado en **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Reclass > Reclassify**. Para este procesamiento se utilizó la aplicación *ModelBuilder*, como se muestra en la figura 57.

En la tabla 9 se muestra las categorías de cada capa, así como los pesos y niveles otorgados a cada rango. En esta parte del procedimiento existe una variación con la metodología de Wahid et al., que se da en la clasificación de las pendientes. Para el desarrollo de esta tesis, a las pendientes más pronunciadas se les asignó un menor peso y a las pendientes leves uno mayor, ya que es en la zona llana donde las inundaciones se producen.

**Tabla 9:** Primera clasificación de los pesos y niveles de cada categoría

Capa	Categoría	Pesos	Nivel
<b>Pendiente</b>	> 60%	1	Muy Bajo
	40% - 60%	2	
	35% - 40%	3	Bajo
	30% - 35%	4	
	25% - 30%	5	Moderado
	20% - 25%	6	
	15% - 20%	7	Alto
	10% - 15%	8	
	5% - 10%	9	Muy Alto
	< 5%	10	
<b>Factor Forma</b>	Muy Alargada	1	Muy Bajo
	Alargada	2	
	Ligeramente alargada	3	Bajo
	Ni alargada ni ensanchada	5	Moderado
	Ligeramente ensanchada	7	Alto
	Ensanchada	8	
	Muy ensanchada	9	Muy Alto
	Rodeando el desagüe	10	
<b>Capacidad de infiltración</b>	A (alta infiltración)	1	Muy Bajo
	B (media infiltración)	5	Moderado
	C (baja infiltración)	10	Muy Alto
<b>Cobertura</b>	Matorrales	3	Bajo
	Agrícola	5	Moderado
	Montañas	7	Alto
	Llanura arenosa	9	Muy Alto
	Urbana	9	
	Laguna	10	
	Rio	10	
	Suelo desnudo	10	



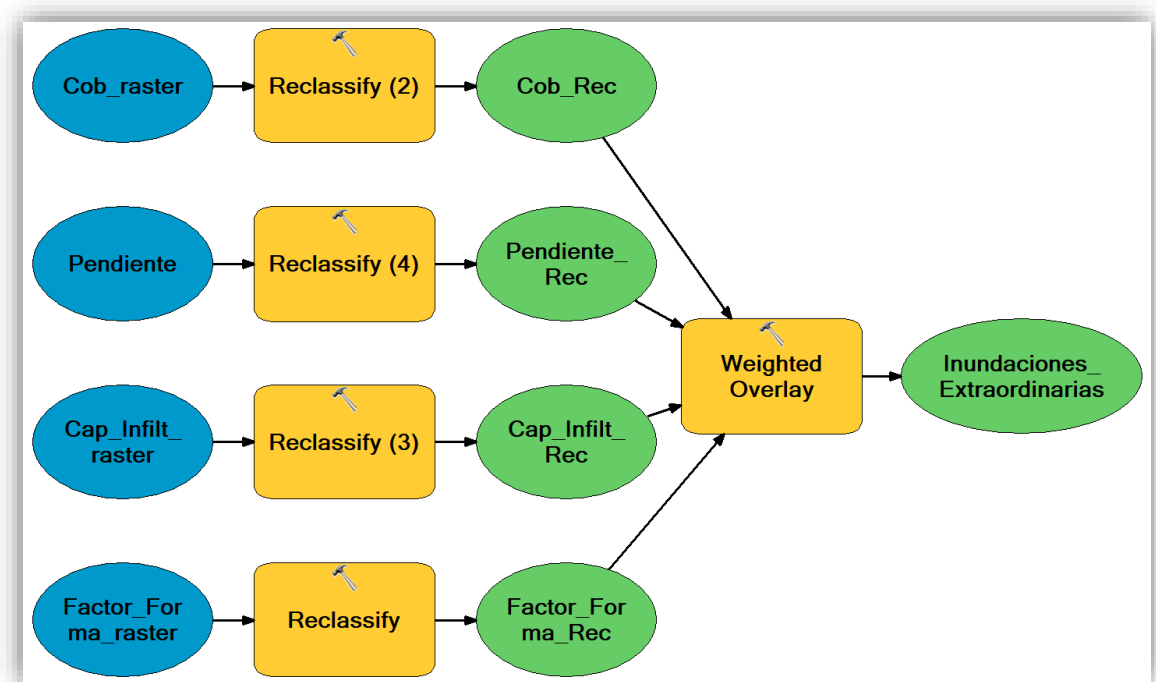


**Figura 57:** Uso de *ModelBuilder* para reclasificar las capas

Una vez que se obtuvieron los ráster con los valores definidos, se procedió con la superposición ponderada de capas, para lo cual se tomó en cuenta la Table de Ponderación de Valores (Tabla 10), y junto a la información de la Tabla 9, se ejecutó la aplicación *ModelBuilder*, donde se creó el flujo de trabajo del modelo del Mapa de Inundaciones Extraordinarias. En el entorno del *ModelBuilder* se agregaron los ráster y la función *Weighted Overlay*, cuya ruta fue **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Overlay > Weighted Overlay** para realizar el modelamiento geoespacial de las variables (figura 58).

**Tabla 10:** Primera Ponderación de Valores

Variable	Grado de Participación
Pendiente	50
Factor Forma	10
Capacidad de infiltración	30
Cobertura	10



**Figura 58:** Uso de *ModelBuilder* para la integración de variables

- **Mapa de Inundaciones, considerando PP**

Este segundo modelo se construyó utilizando el mismo procedimiento que el anterior, con la única diferencia que a la Tabla 9, de pesos y niveles de cada capa, se agregó la variable de precipitaciones, como se muestra en la Tabla 11. Así mismo, para la ponderación de los valores de las capas, se utilizó la Tabla 12, donde se considera el grado de la capa de precipitaciones.

**Tabla 11:** Segunda clasificación de los pesos y niveles de cada categoría

Capa	Categoría	Pesos	Nivel
<b>Pendiente</b>	> 60%	1	Muy Bajo
	40% - 60%	2	
	35% - 40%	3	Bajo
	30% - 35%	4	
	25% - 30%	5	Moderado
	20% - 25%	6	
	15% - 20%	7	Alto
	10% - 15%	8	
	5% - 10%	9	Muy Alto
	< 5%	10	
<b>Factor Forma</b>	Muy Alargada	1	Muy Bajo
	Alargada	2	
	Ligeramente alargada	3	Bajo
	Ni alargada ni ensanchada	5	Moderado
	Ligeramente ensanchada	7	Alto
	Ensanchada	8	
	Muy ensanchada	9	Muy Alto
	Rodeando el desagüe	10	
<b>Capacidad de infiltración</b>	A (alta infiltración)	1	Muy Bajo
	B (media infiltración)	5	Moderado
	C (baja infiltración)	10	Muy Alto
<b>Cobertura</b>	Matorrales	3	Bajo
	Agrícola	5	Moderado
	Montañas	7	Alto
	Llanura arenosa	9	Muy Alto
	Urbana	9	
	Laguna	10	
	Rio	10	
	Suelo desnudo	10	
<b>Precipitación</b>	0 – 150 mm	1	Muy Bajo
	150 – 300 mm	4	Bajo
	300 – 450 mm	7	Alto
	450 - 600 mm	10	Muy Alto

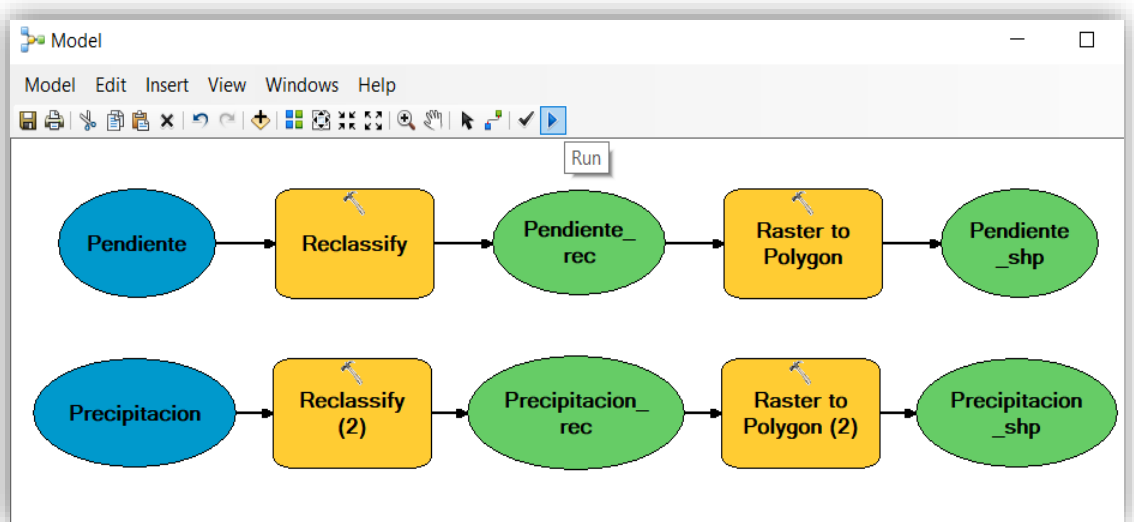
**Tabla 12:** Segunda Ponderación de Valores

Variable	Grado de Participación
Pendiente	50
Factor Forma	10
Capacidad de infiltración	20
Cobertura	10
Precipitación	10

**c. Modelo Geoespacial de Vulnerabilidad Física**

Así mismo, se elaboró un modelo para identificar las zonas vulnerables a los procesos erosivos debido a las precipitaciones. Por lo cual, se requirieron de las variables de cobertura, geología, geomorfología, pendientes y precipitaciones, para que sean intersecadas y obtener nuevos polígonos, a los que se les aplicaron una ecuación para obtener su nivel de vulnerabilidad.

Se inició este procedimiento con la reclasificación de los archivos ráster de pendientes y precipitaciones de acuerdo a las categorías presentadas en la Tabla 13, para después convertirlos a capas vectoriales con la herramienta *Raster to Polygon* (Figura 59).



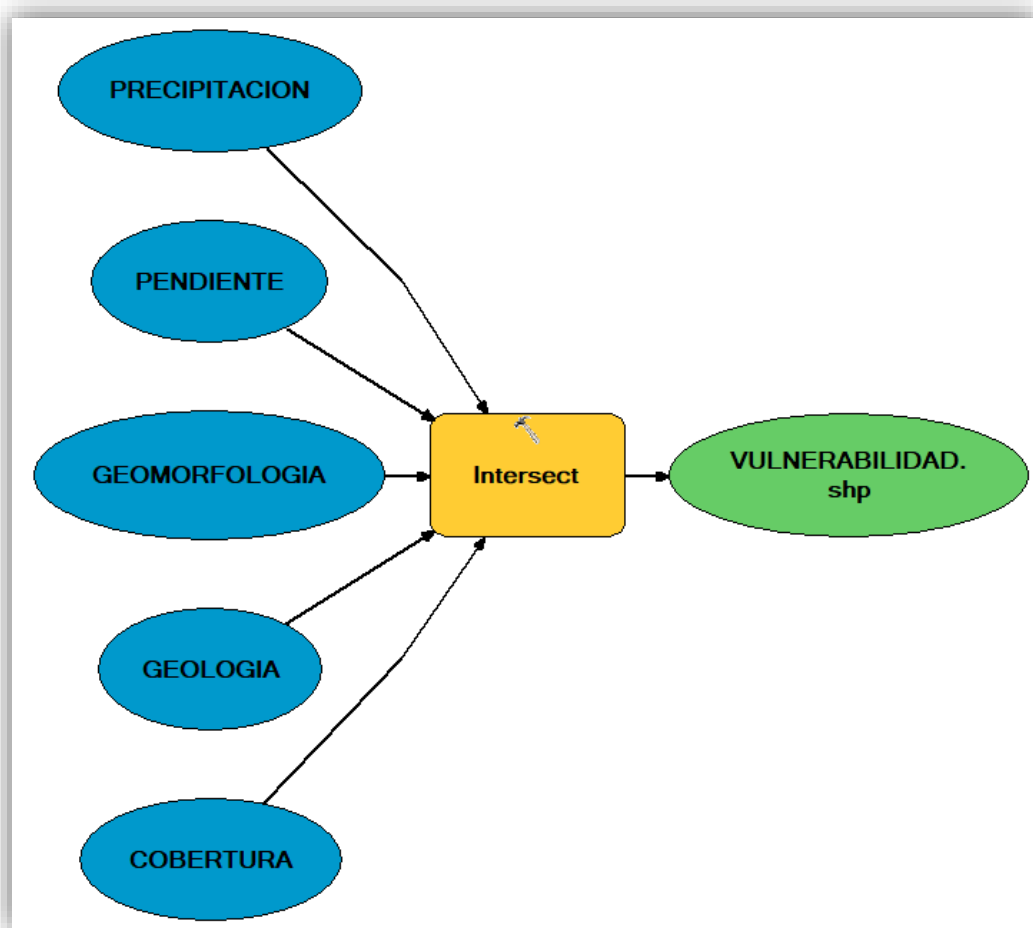
**Figura 59:** Conversión de los ráster a capas vectoriales en *ModelBuilder*

Una vez que se contaron con los cinco archivos en formato *shape*, se utilizó la función *dissolve* para sintetizar los datos. Luego con las cinco capas resultantes listas, en cada una de ellas se agregó un campo nuevo en la Tabla de Atributos con los pesos correspondientes según la Tabla 13 y seguidamente se procedió con la intersección de las capas con la herramienta *Intersect* en el entorno de *ModelBuilder* (Figura 60).

**Tabla 13:** Tercera clasificación de los pesos y niveles de cada categoría

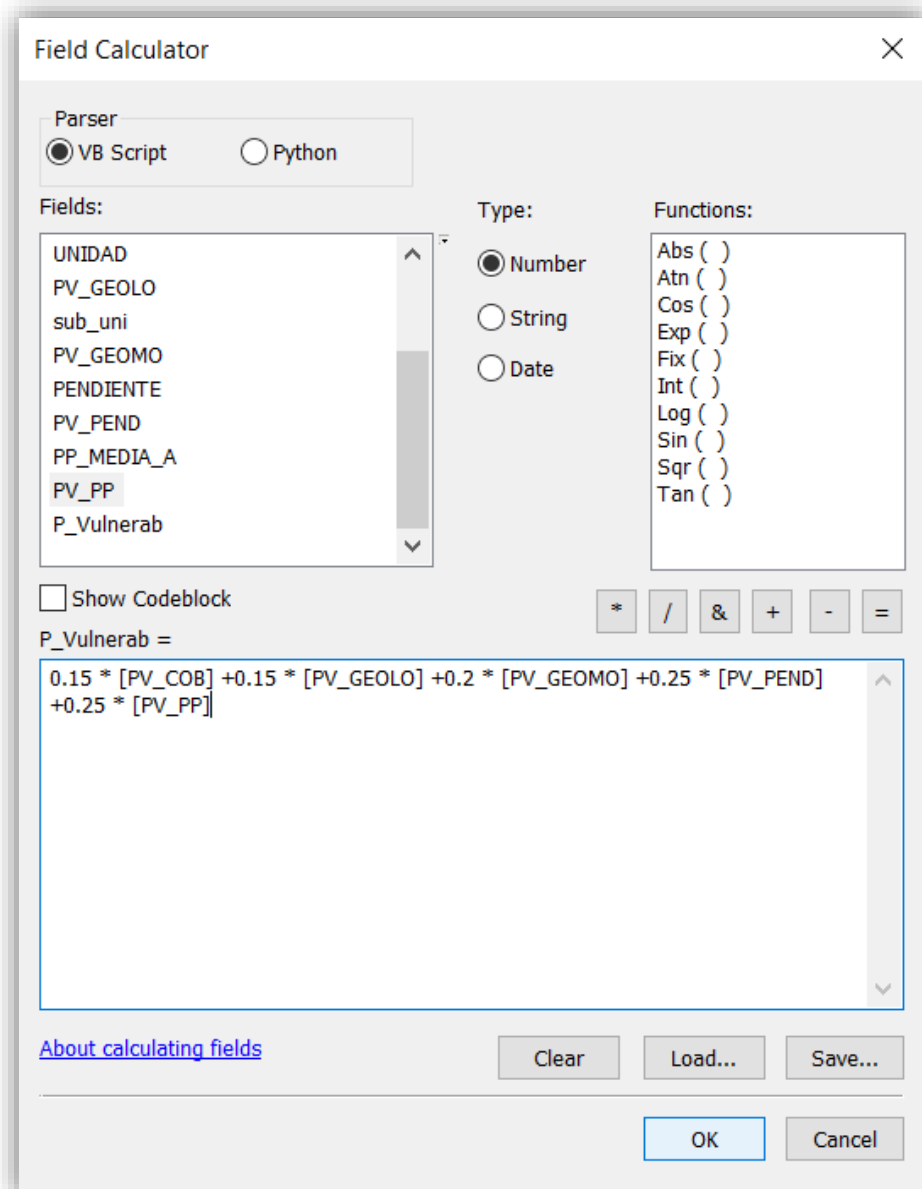
Capa	Categoría	Pesos	Nivel
<b>Pendiente</b>	< 5%	1	Estable
	5% - 10%	2	
	10% - 15%	3	Bajo
	15% - 20%	4	
	20% - 25%	5	Moderado
	25% - 30%	6	
	30% - 35%	7	Alto
	35% - 40%	8	
	40% - 60%	9	Muy Alto
	> 60%	10	
<b>Cobertura</b>	Matorrales	3	Bajo
	Agrícola	5	Moderado
	Montañas	7	Alto
	Llanura arenosa	9	Muy Alto
	Suelo desnudo	10	
	Laguna	10	
	Rio	10	
	Urbana	10	
<b>Geología</b>	Depósito aluvial	1	Estable
	Grupo Calipuy	2	
	Formación La Zorra	3	Bajo
	Formación Lupín	5	Moderado
	Formación Chimú	5	
	Batolito de la Costa	7	Alto
	Formación Junco	7	
	Formación Santa, Carhuaz	10	Muy Alto

<b>Geomorfología</b>	Mantos de arena	1	Muy Bajo
	Terraza aluvial	3	Bajo
	Colinas y lomadas	6	Moderado
	Montaña con pendientes suaves a moderadas	8	Alto
	Montaña con pendientes moderadas a fuertes	10	Muy Alto
<b>Precipitación</b>	0 – 150 mm	1	Estable
	150 – 300 mm	4	Bajo
	300 – 450 mm	7	Alto
	450 - 600 mm	10	Muy Alto



**Figura 60:** Intersección de las cinco capas en *ModelBuilder*

Finalmente, en el modelo obtenido se agregó un nuevo campo donde se ingresó la ecuación para hallar la vulnerabilidad de cada polígono, con la opción *Field Calculator* (Figura 61), y con los valores obtenidos se hallaron las regiones con los niveles de vulnerabilidad estable, bajo, moderado, alto y muy alto.



**Figura 61:** Cálculo de la Vulnerabilidad de la cuenca Huarmey

#### **d. Modelo Geoespacial para la identificación y cuantificación de la erosión del suelo con el método USLE**

La elaboración del mapa de erosión del suelo, se realizó de acuerdo a la fórmula de la USLE propuesta por Wischmeier y Smith en 1978.

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

Donde las variables son:

A: Cantidad de pérdida de suelo en una unidad de superficie (t/ha.año)

R: Factor de precipitación y escorrentía (MJ.mm/ha.h.año)

K: Factor de susceptibilidad del suelo a erosión (t.ha.h/ha.MJ.mm)

L: Factor de longitud de la pendiente

S: Factor de inclinación de la pendiente

C: Factor de la cobertura vegetal

P: Factor de prácticas de conservación

- **Factor de Precipitación (R)**

Para la elaboración de la capa del Factor R, se utilizó el archivo ráster del mapa de precipitaciones medias anuales, elaborado previamente, a la cual se aplicó la ecuación de Roose.

$$R = 1.73 \times 0.5 \times P$$

Donde:

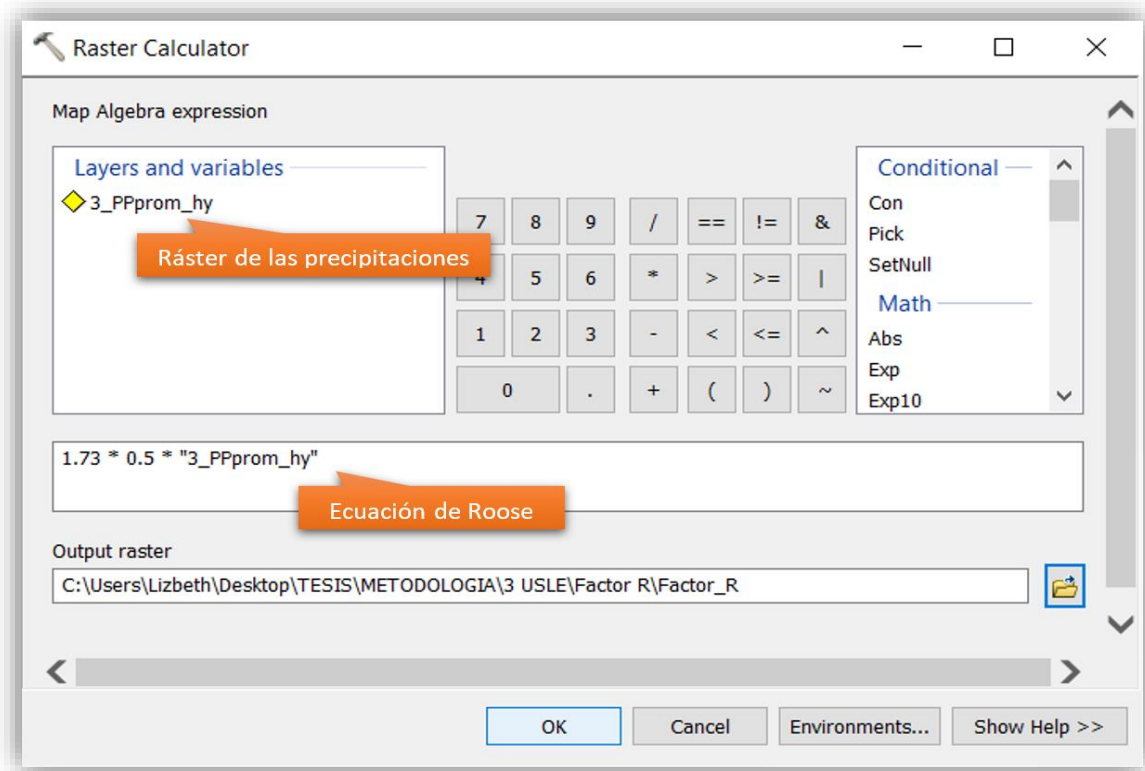
R = Factor de erosividad de la lluvia (MJ.mm/ha.h.año)

P = Precipitación media anual (mm)

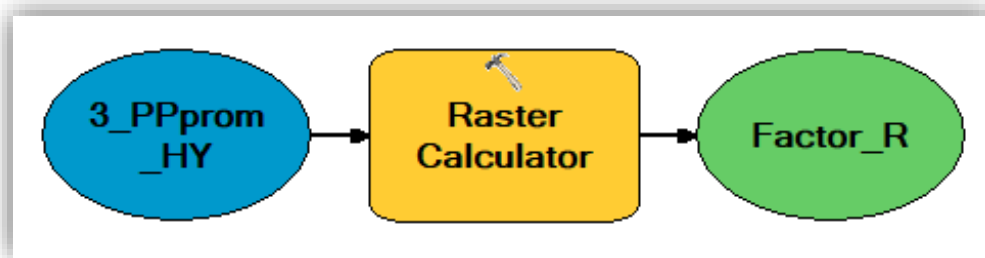
Para obtener el factor de erosividad de precipitación se utilizó la aplicación *ModelBuilder*, donde se ingresó la herramienta de calculadora ráster (*Raster Calculator*) de ArcGIS, cuya dirección es **ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator**,



para aplicar la ecuación de Roose (figura 62). Es importante mencionar que este ráster cuenta con un tamaño de celda de 30 m.



**Figura 62:** Uso de la calculadora ráster para aplicar la ecuación de Roose



**Figura 63:** Uso de *ModelBuilder* para calcular el Factor R

- **Factor de Susceptibilidad a erosión del Suelo (K)**

El Factor K se halló, mediante las fórmulas de Sharpley y Williams (1990).

$$K_{USLE} = f_{csand} \times f_{cl-si} \times f_{orgc} \times f_{hisand}$$

$$f_{csand} = \left( 0.2 + 0.3 \times \exp^{-0.256 \times m_s \left(1 - \frac{m_{silt}}{100}\right)} \right)$$

$$f_{cl-si} = \left( \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3}$$

$$f_{orgc} = \left( 1 - \frac{0.25 \times orgC}{orgC + \exp[3.72 - 2.95 \times orgC]} \right)$$

$$f_{hisand} = \left( 1 - \frac{0.7 \times \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100}\right) + \exp[-5.51 + 22.9 \times \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)]} \right)$$

Siendo:

$K_{USLE}$ : Factor de Susceptibilidad a erosión del Suelo

$m_s$ : Porcentaje de arena

$m_{silt}$ : Porcentaje de limo

$m_c$ : Porcentaje de arcilla

$orgC$ : Porcentaje de materia orgánica

Para la elaboración del mapa del Factor K, se utilizó la capa de Geología, elaborada previamente y se recolectaron muestras de suelo de diferentes puntos de la cuenca para conocer las características que poseían cada unidad.

Se llevaron a cabo visitas de campo a las zonas clasificadas y se tomaron muestras de suelo a 45 cm. de cada una de ellas, para esta actividad se contó con la ayuda de los ingenieros de la Agencia Agraria de Huarmey, como se muestra en las siguientes fotografías.



**Figura 64:** Toma de muestras en la unidad Batolito de la Costa



**Figura 65:** Toma de muestras en la unidad Depósito Aluvial



**Figura 66:** Toma de muestras en la unidad Formación Chimú



**Figura 67:** Toma de muestras en la unidad Formación Junco



**Figura 68:** Toma de muestras en la unidad Formación La Zorra



**Figura 69:** Toma de muestras en la unidad Formación Lupín



**Figura 70:** Toma de muestras en la unidad Formación Santa, Carhuaz



**Figura 71:** Toma de muestras en el Grupo Calipuy

Una vez recopiladas las muestras, estas fueron enviadas al Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), para el cálculo de los porcentajes de arena, arcilla, limo y materia orgánica (Anexo 11).

Los resultados de los porcentajes de arena, arcilla, limo y materia orgánica se ingresaron a una hoja Excel, y se realizó el cálculo del Factor K. La tabla de valores de “K” para cada unidad geológica de la cuenca se muestra en la Tabla 14.

Luego, se ingresaron los valores de “K” a la Tabla de Atributos del archivo en *shape* de las unidades geológicas de la zona de estudio.

**Tabla 14:** Valores del Factor K

Unidades de Suelo	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Materia Orgánica (%)	K
Batolito de la Costa	57	26	17	1.32	0.145
Depósito Aluvial	93	2	5	0.02	0.063
Formación Chimú	66	16	18	4.97	0.117
Formación Junco	47	34	19	0.54	0.172
Formación La Zorra	79	12	9	0.15	0.134
Formación Lupín	79	12	9	0.15	0.134
Formación Santa, Carhuaz	74	16	10	3.45	0.117
Grupo Calipuy	44	28	28	1.75	0.127

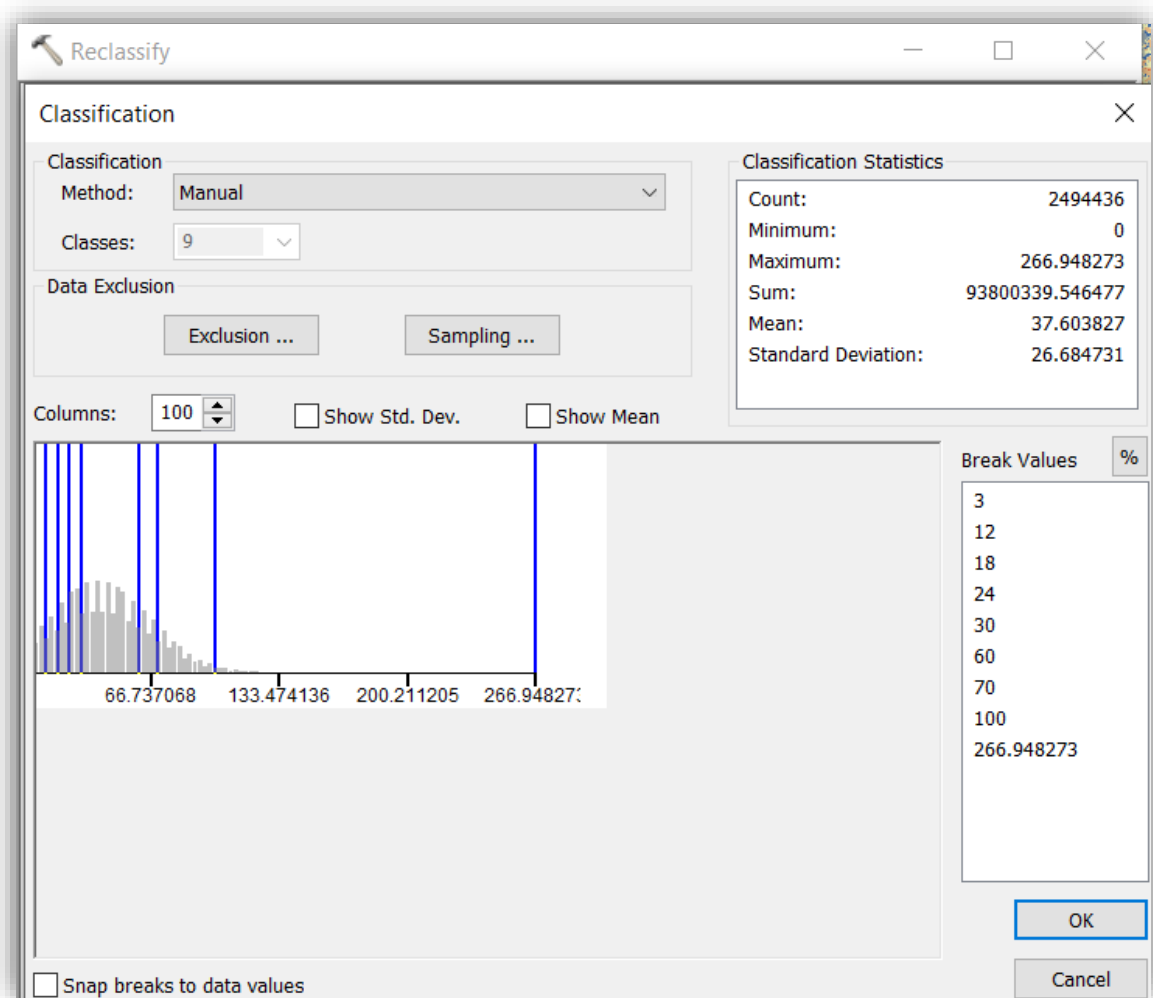
Después, se utilizó la herramienta *Polygon to Raster* en el espacio de *ModelBuilder*, donde se especificaron que los valores de campo (*Value Field*) para obtener el ráster son los del Factor K, hallados en la Tabla 14, así mismo se ingresó la ruta de salida y el tamaño de celda de 30 m. (utilizado en todos los ráster de esta tesis).



**Figura 72:** Uso de *ModelBuilder* para hallar el Factor K

- **Factor Topográfico (LS)**

Para hallar este factor, se utilizó la capa de pendientes en porcentajes y se reclasificaron los valores, con la función *Reclassify*, de acuerdo a los rangos de la tabla elaborada por la Facultad de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid (Figura 73). Luego, el ráster reclasificado fue convertido a un archivo *shape* con la herramienta *Raster to Polygon* y después se utilizó la función *Dissolve* para sintetizar los datos.



**Figura 73:** Reclasificación de las pendientes



En la tabla de atributos de la capa resultante, se añadió un nuevo campo donde se ingresaron los valores de LS de acuerdo al grupo de pendientes (Figura 74). Por último, se convirtió la capa vectorial a ráster nuevamente, con un tamaño de celda de 30 m., pero a diferencia del primer ráster con los valores de las pendientes, en este último se tomaron en cuenta los valores de LS en *Value Field*.

FID	Shape *	GRIDCODE	FACTOR_LS
0	Polygon	1	0.3
1	Polygon	2	1.5
2	Polygon	3	3.4
3	Polygon	4	5.6
4	Polygon	5	8.7
5	Polygon	6	14.6
6	Polygon	7	20.2
7	Polygon	8	25.2
8	Polygon	9	28.5

**Figura 74:** Adición del Campo LS en la Tabla de Atributos

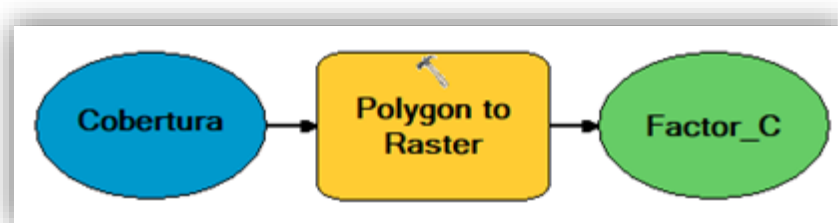
- **Factor de Cobertura Vegetal (C)**

Para hallar el Factor C se requirió del uso del Mapa de Cobertura de la cuenca, generado en la sección de Construcción de Base de Datos Geoespaciales, para reclasificar las clases originales del cero a uno. Estos nuevos valores representaron el nivel en que cada tipo de cobertura afecta en la tasa de erosión. Para las áreas con una mayor cobertura vegetal, se les asignaron valores de C cercanos a cero, y para las zonas con superficie desprotegida, valores cercanos a uno. Los valores que fueron asignados a cada clase se muestran en la Tabla 15.

**Tabla 15:** Valores del Factor C

Clases	Factor C
<i>Agrícola</i>	0.3
<i>Laguna</i>	1
<i>Llanura arenosa</i>	1
<i>Matorrales</i>	0.2
<i>Montañas</i>	0.7
<i>Rio</i>	1
<i>Suelo desnudo</i>	1
<i>Urbana</i>	0.8

Estos valores se agregaron en la Tabla de Atributos del archivo en formato *shape* de la cobertura de la cuenca y luego, se procedió con la conversión a formato ráster (30 m.) de este archivo, tomando en cuenta los valores del Factor C, en la aplicación *ModelBuilder* (Figura 75).



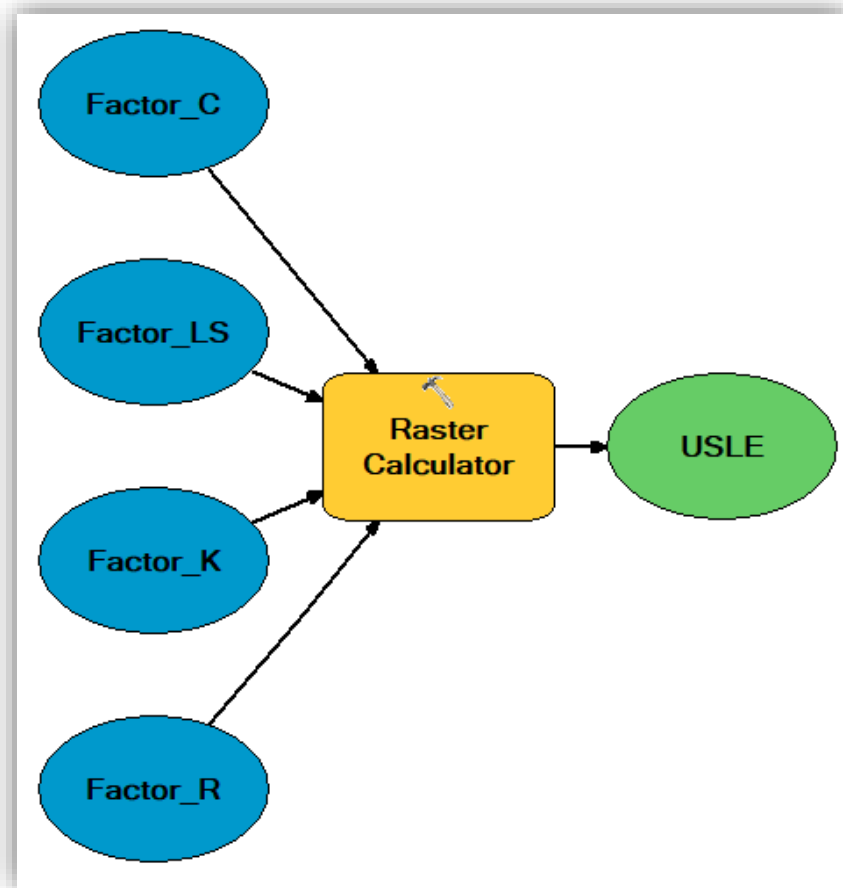
**Figura 75:** Uso de *ModelBuilder* para hallar el Factor C

- **Factor de Prácticas de Conservación (P)**

Este factor representa la actividad de protección contra la erosión debida a fuertes escorrentías, sin embargo, debido a que estas prácticas no se presentan en el área de estudio, se otorgó el valor de uno en la ecuación.

- **Identificación y cuantificación de la erosión hídrica (USLE)**

Finalmente, una vez obtenido los factores R, K, LS y C, que requería la ecuación USLE, con un mismo tamaño de celda de 30 m., se procedió con el modelamiento geoespacial para la integración de variables, mediante la multiplicación de estos parámetros con la función *Raster Calculator* (figura 76).



**Figura 76:** Modelamiento geoespacial para hallar la ecuación USLE

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. 1<sup>ra</sup> FASE DE GEOPROCESAMIENTO**

Como resultado del primer geoprocesamiento de los datos de la cuenca se obtuvo la siguiente información temática.

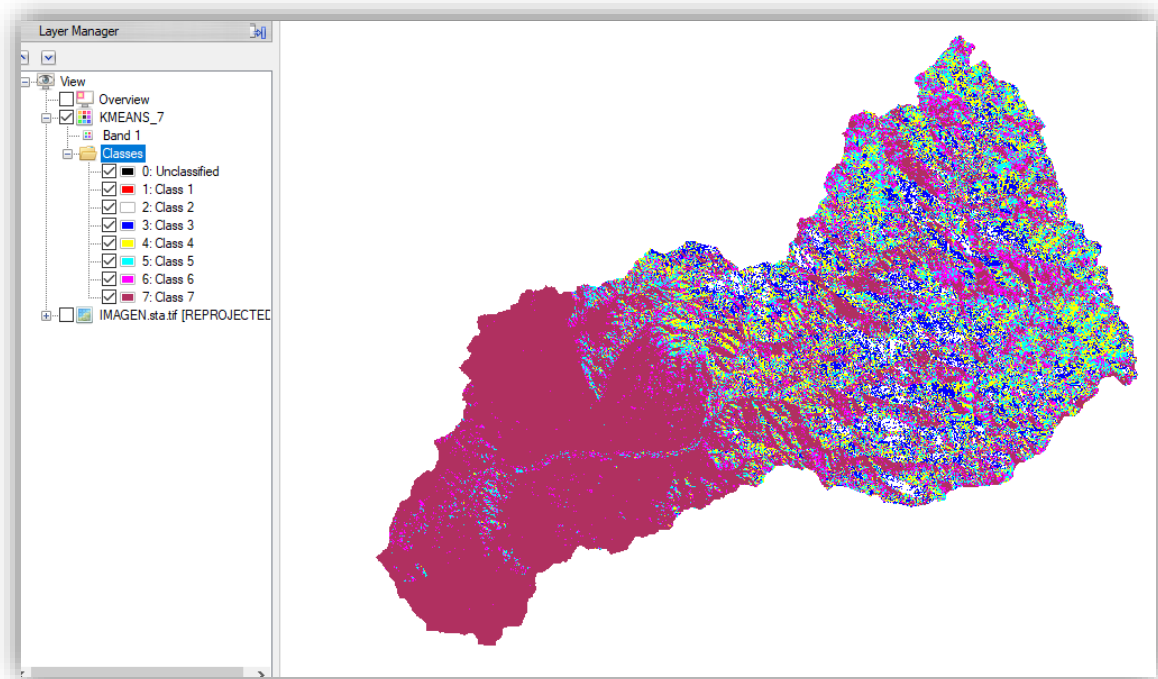
#### **4.1.1. Cobertura Vegetal**

El resultado de la clasificación no supervisada se mostró en la Figura 77, sin embargo, este primer mapa no cuenta con una división clara de los siete tipos de cobertura. Luego, se efectuó la clasificación supervisada, que contó con 11 clases de cobertura (Figura 78), a la cual se le hicieron correcciones utilizando el programa Google Earth Pro y la información obtenida de las visitas de campo.

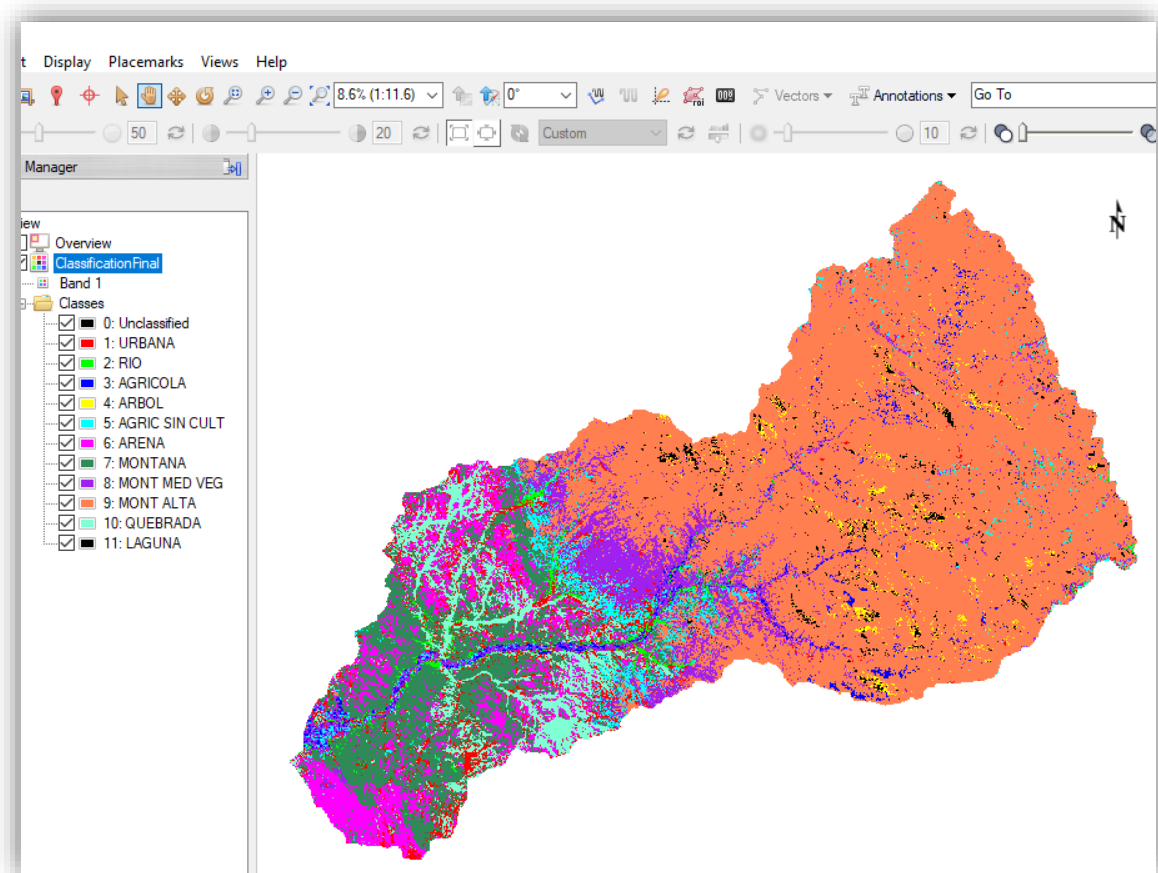
Como resultado de la clasificación final de la cuenca Huarmey, se obtuvieron ocho tipos de cobertura. La clase que abarcó una mayor área, fue la de Matorrales, cuya superficie fue de 1410.25 km<sup>2</sup>, lo que equivalió al 62.82 por ciento del área total y se ubicó desde la parte media a alta de la cuenca, en la zona andina. En la zona media a baja de la cuenca se encontraron las Montañas, cuya área fue la segunda más grande, con 476.22 km<sup>2</sup>, que representó el 21.21 por ciento de la superficie de la cuenca. Por otro lado, en la cuenca baja se halló la clase de Llanura Arenosa, con 119.18 km<sup>2</sup>, que comprendió el 5.31 por ciento del área de estudio. Las áreas agrícolas se encontraron a lo largo de toda la cuenca y contaron con una superficie de 128.08 km<sup>2</sup>, lo que significó el 5.71 por ciento del área total. Las zonas de Suelo Desnudo tuvieron un área de 101.53 km<sup>2</sup>, lo que representó el 4.52 por ciento. Finalmente, el resto de tipos de cobertura abarcaron menos del uno por ciento del área total.

**Tabla 16:** Resultados del mapa de cobertura

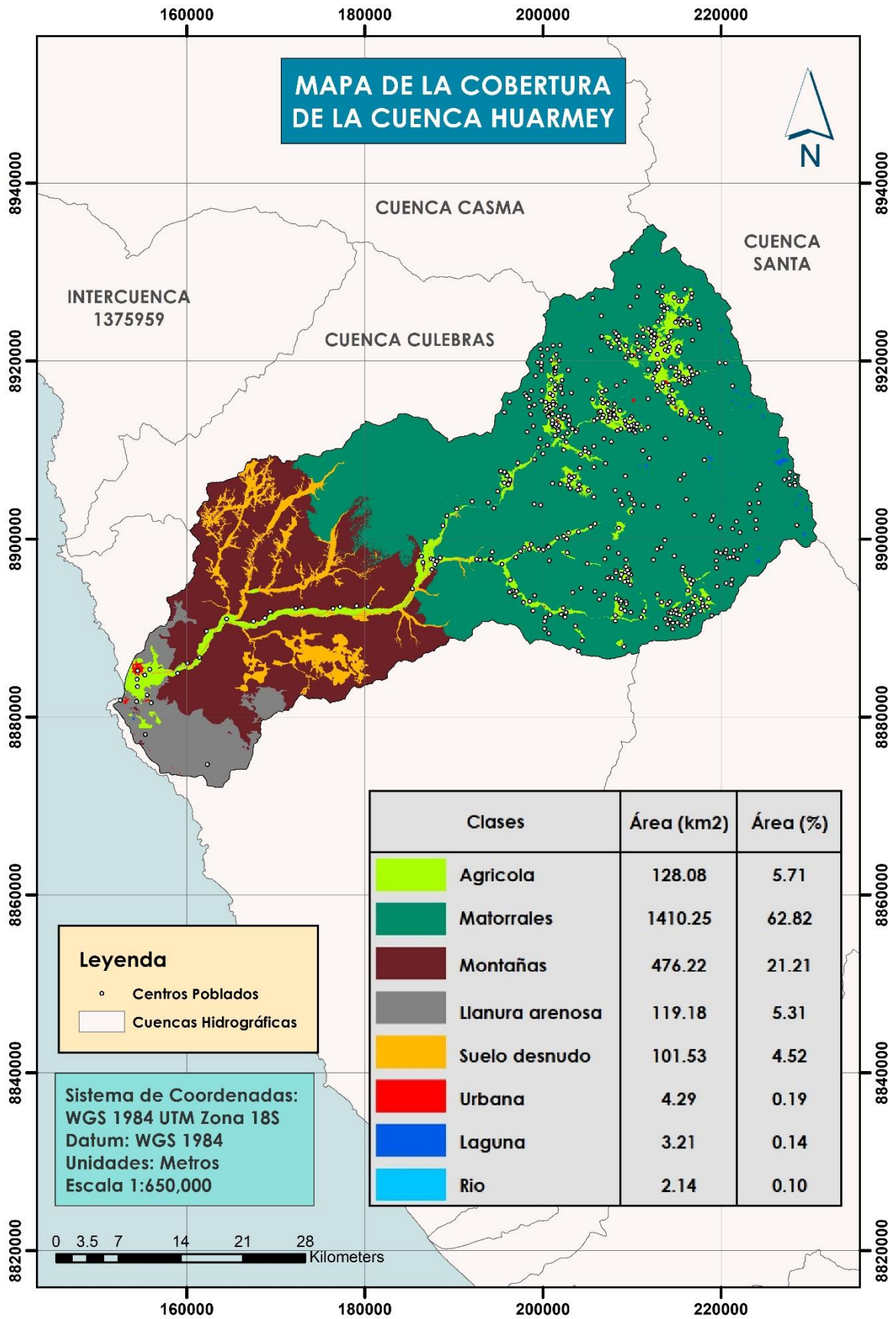
Clases	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
<i>Agrícola</i>	128.08	5.71
<i>Laguna</i>	3.21	0.14
<i>Llanura arenosa</i>	119.18	5.31
<i>Matorrales</i>	1410.25	62.82
<i>Montañas</i>	476.22	21.21
<i>Río</i>	2.14	0.10
<i>Suelo desnudo</i>	101.53	4.52
<i>Urbana</i>	4.29	0.19



**Figura 77:** Clasificación no supervisada de la cuenca Huarmey



**Figura 78** Clasificación supervisada de la cuenca Huarmey



**Figura 79:** Mapa de cobertura de la cuenca Huarney

#### 4.1.2. Pendiente

Se obtuvo un mapa de pendientes en porcentajes, el cual mostró que el rango de 40 a 60 por ciento, representaron a los terrenos escarpados, y son los que poseen mayor área en la cuenca, contando con 520.28 km<sup>2</sup>, lo que significó un 25.40 por ciento del área total. La segunda zona con mayor área, fue la que presentaba pendientes de 20 a 40 por ciento, con un área de 565.99 km<sup>2</sup>, equivalente al 25.21 por ciento del total de la superficie. Las pendientes mayores al 60 por ciento, fue la tercera región más grande, cuyo terreno era extremadamente empinado y abarcó una superficie de 476.96 km<sup>2</sup>, que representó el 21.25 por ciento de la zona de estudio. El rango de pendientes menores a 5 por ciento presentó un área de 360.05 km<sup>2</sup>, abarcando el 16.04 por ciento del área total. Por último, los rangos restantes de 5 a 10 por ciento y de 10 a 20 por ciento, ocuparon áreas menores al 10 por ciento de la cuenca.

**Tabla 17:** Resultados del mapa de pendientes en porcentaje

Rangos	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
< 5%	360.05	16.04
5% - 10%	77.63	3.46
10% - 20%	193.99	8.64
20% - 40%	565.99	25.21
40% - 60%	570.28	25.40
> 60%	476.96	21.25



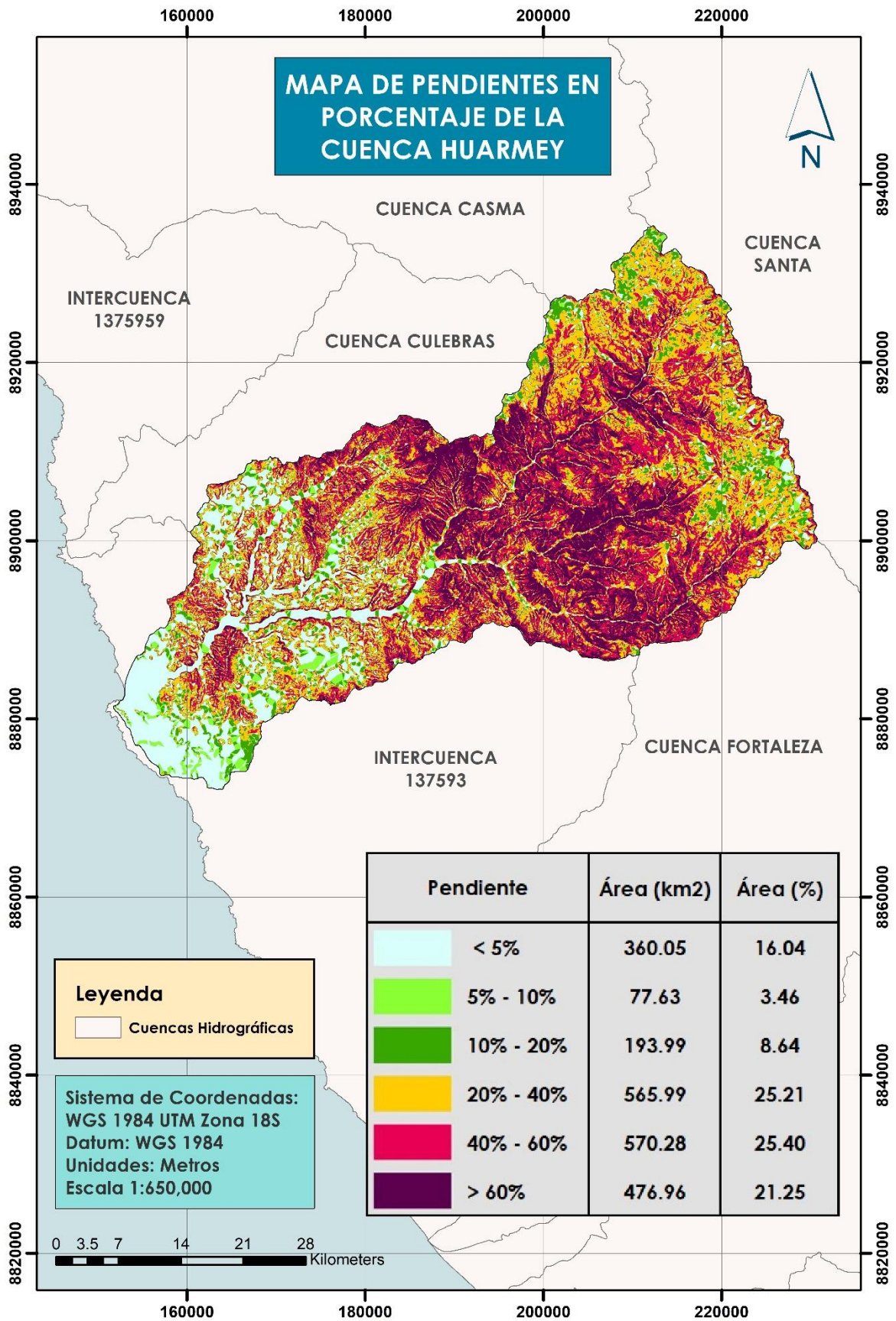


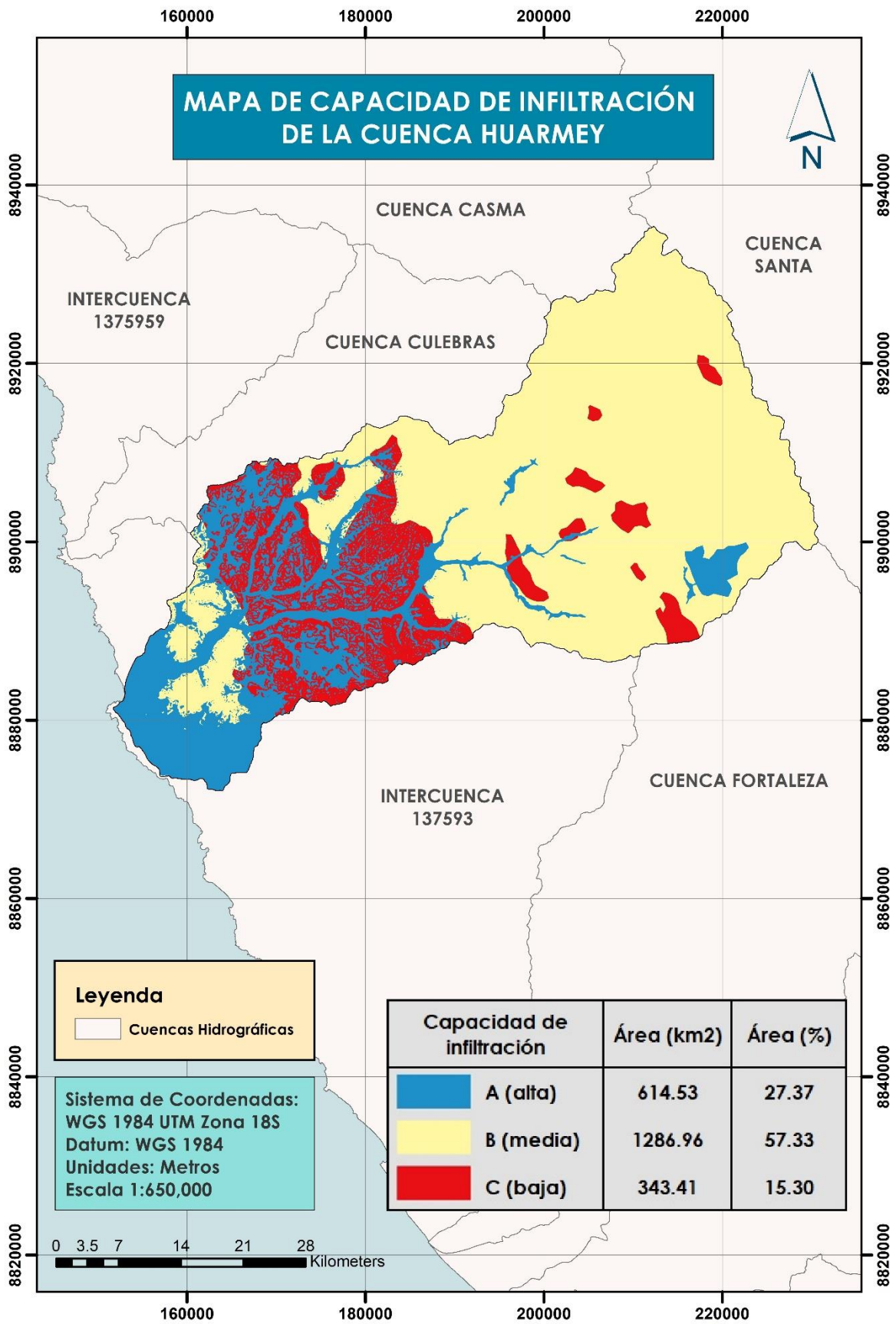
Figura 80: Mapa de pendientes en porcentaje de la cuenca Huarney

### 4.1.3. Capacidad de Infiltración

Esta capa se realizó gracias al Mapa de Hidrogeología Nacional del INGEMMET, donde resultaron tres tipos de suelo dentro de la cuenca Huarmey, que se muestra en la figura 81. En la tabla 18 se puede observar, que el suelo tipo A, cuya capacidad de infiltración es alta, abarcó un área de 614.53 km<sup>2</sup>, correspondiente al 27.37 por ciento de la superficie total de la cuenca, y que se halla en la parte baja de la unidad hidrográfica. Los suelos de tipo B, cuentan con un nivel medio de permeabilidad, y fue la zona que contó con la mayor área, 1286.96 km<sup>2</sup>, lo que significó el 57.33 por ciento y se puede observar principalmente en la parte alta de la cuenca. Por último, los suelos de tipo C, presentaron una capacidad de infiltración baja y presentó un área de 343.41 km<sup>2</sup>, que representó el 15.30 por ciento del total y se encontraron en la parte media de la cuenca, a los lados del valle.

**Tabla 18:** Resultados del mapa de capacidad de infiltración

Capacidad de infiltración	Tipo de suelo	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Alta	A	614.53	27.37
Media	B	1286.96	57.33
Baja	C	343.41	15.30



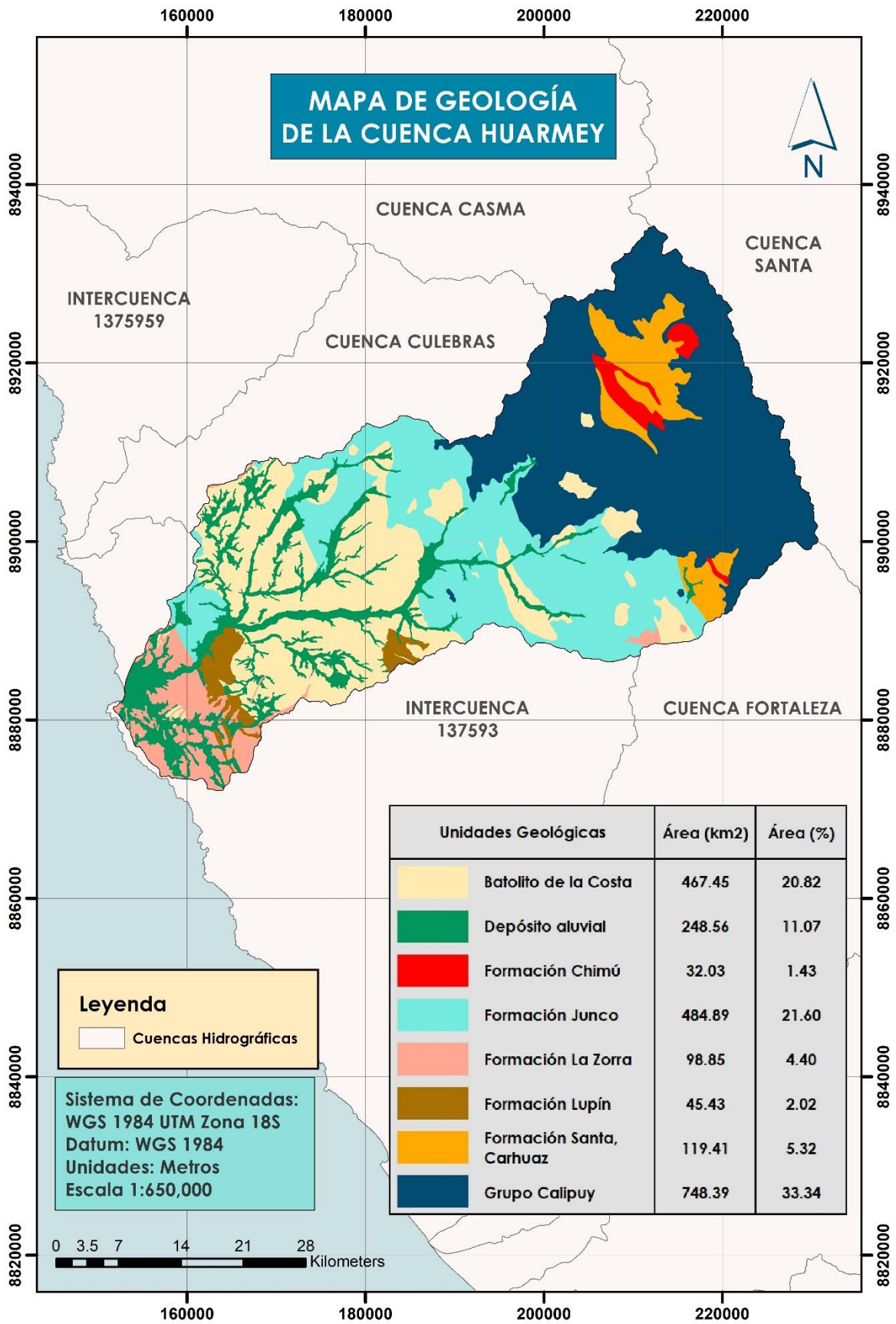
**Figura 81:** Mapa de Capacidad de Infiltración de la cuenca Huarney

#### 4.1.4. Geología

Ochos unidades geológicas conformaron la cuenca Huarmey, siendo el Grupo Calipuy, localizado en la parte más alta de la cuenca y compuesto principalmente por lavas andesíticas y piroclastos, el que abarcó la mayor área, con 748.39 km<sup>2</sup> que representó el 33.34 por ciento del total. La segunda unidad más grande fue la Formación Junco, característico por la presencia de lavas almohadilladas, con un área de 484.89 km<sup>2</sup>, que significó el 21.60 por ciento de la superficie de la cuenca. La tercera unidad que predominó fue el Batolito de la Costa, constituido por colinas y montañas de monzogranito en la zona media de la cuenca, cuya superficie fue de 467.45 km<sup>2</sup>, equivalente al 20.82 por ciento. Los depósitos aluviales, que se encontraron a lo largo del valle y en las zonas de suelo desnudo, ocuparon 248.56 km<sup>2</sup>, comprendiendo el 11.07 por ciento del área total, siendo la cuarta unidad más sobresaliente. Las cuatro formaciones geológicas restantes solo ocuparon menos del 6 por ciento del área de la cuenca cada una.

**Tabla 19:** Resultados del mapa de geología

Unidades Geológicas	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Batolito de la Costa	467.45	20.82
Depósito aluvial	248.56	11.07
Formación Chimú	32.03	1.43
Formación Junco	484.89	21.60
Formación La Zorra	98.85	4.40
Formación Lupín	45.43	2.02
Formación Santa, Carhuaz	119.41	5.32
Grupo Calipuy	748.39	33.34



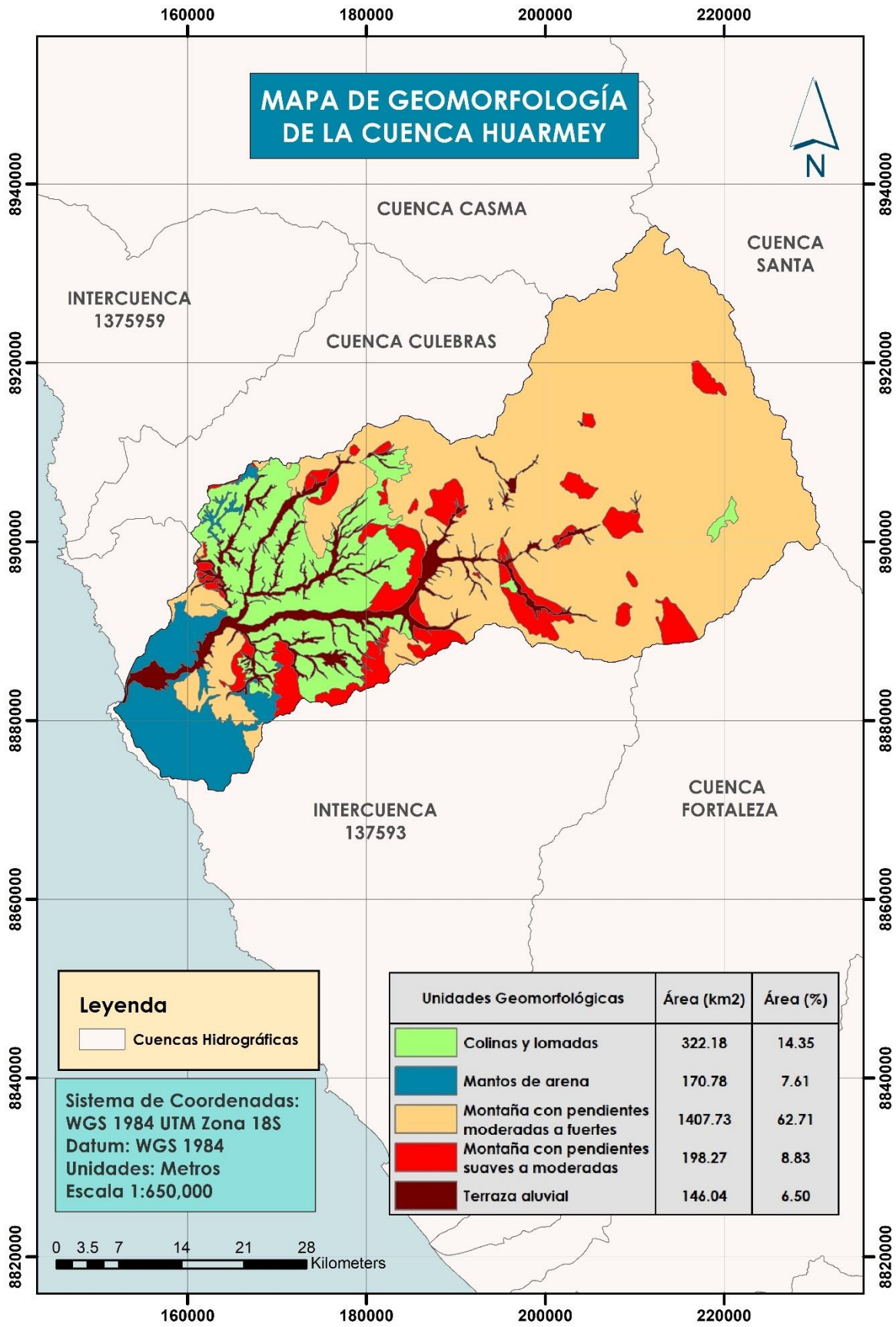
**Figura 82:** Mapa de Geología de la cuenca Huarney

#### 4.1.5. Geomorfología

Se identificaron cinco unidades geomorfológicas en la zona de estudio, de las cuales la que predominó fueron las Montañas con pendientes moderadas a fuertes, ubicada en la zona media a alta de la cuenca y que abarcó un área de 1407.73 km<sup>2</sup>, significando el 62.71 por ciento de la superficie total. Las Colinas y lomadas, fue la segunda unidad más grande, que se encontró principalmente en la zona media de la cuenca, con una superficie de 322.18 km<sup>2</sup>, que representó el 14.35 por ciento del total. Así mismo, las Montaña con pendientes suaves a moderadas contaron con un área de 198.27 km<sup>2</sup>, equivalente al 8.86 por ciento. Los mantos de arena ubicados en la región costera tuvieron un área de 170.78 km<sup>2</sup>, ocupando el 7.61 por ciento del área total. Finalmente, la Terraza Aluvial localizada en la zona de los valles y quebradas, presentaron una superficie de 146.04 km<sup>2</sup>, que significó el 6.50 por ciento del total de la cuenca.

**Tabla 20:** Resultados del mapa de geomorfología

Unidades Geomorfológicas	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Colinas y lomadas	322.18	14.35
Mantos de arena	170.78	7.61
Montañas con pendientes suaves a moderadas	198.27	8.83
Montañas con pendientes moderadas a fuertes	1407.73	62.71
Terraza aluvial	146.04	6.50



**Figura 83:** Mapa de Geomorfología de la cuenca Huarney

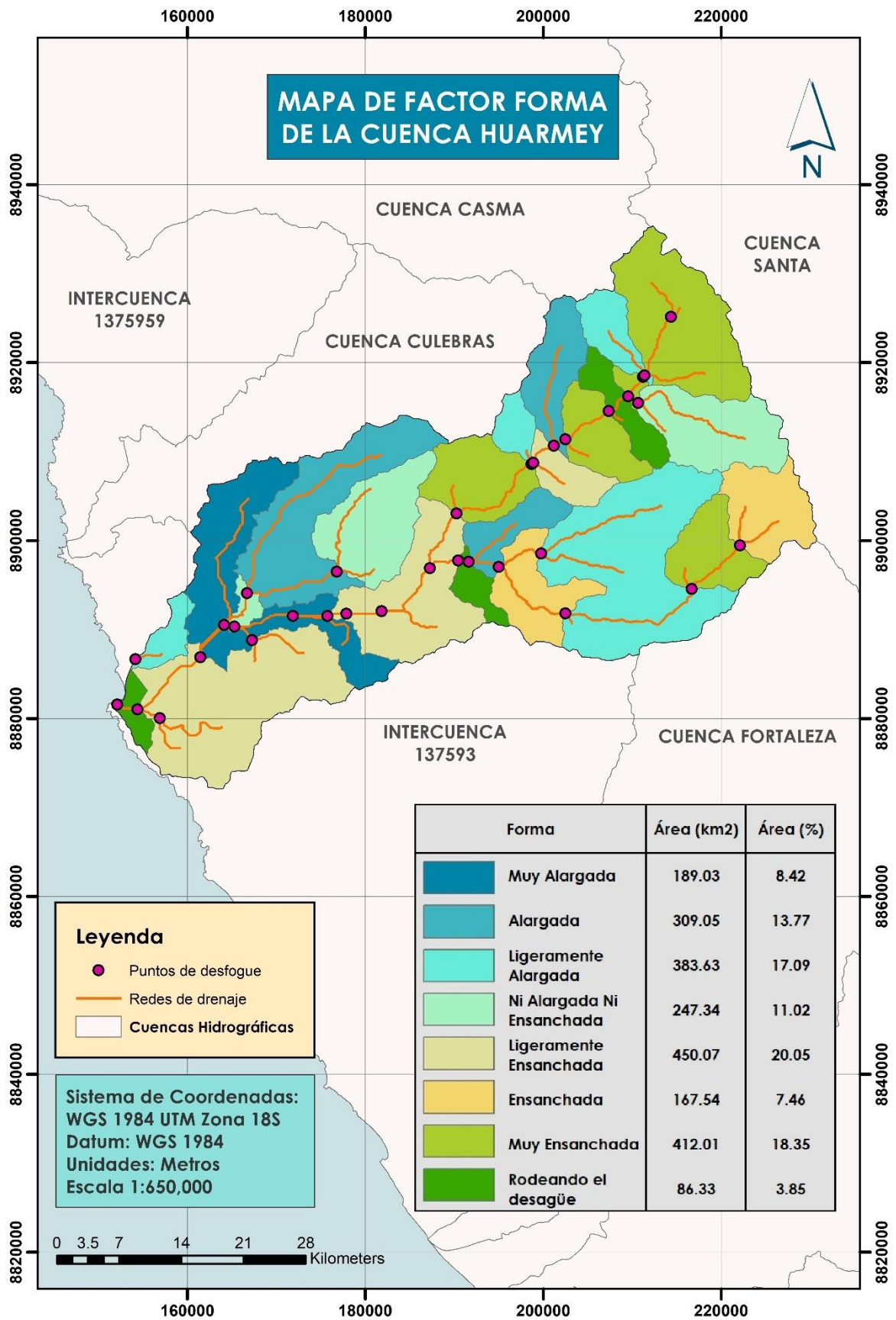
#### 4.1.6. Factor Forma

Se llevó a cabo la clasificación de los valores del factor forma de las cuencas, basado en la Tabla 3, de acuerdo a Pérez, citado por Córdova (2016). Por lo tanto, se obtuvo ocho tipos de formas en toda la cuenca, como se muestra en la Tabla 21. La forma que más predominó entre las cuencas, fue la del tipo Ligeramente Ensanchada, la cual ocupó un área de 450.07 km<sup>2</sup>, siendo éste el 20.05 por ciento del área total. Las cuencas con forma Muy Ensanchada, tuvieron un área de 412.01 km<sup>2</sup>, lo que significó el 18.35 por ciento. El tercer tipo de cuencas con mayor área, fueron las de la forma Ligeramente Alargada, cuya superficie fue de 383.63 km<sup>2</sup>, equivalente al 17.09 por ciento. Las cuencas de forma Alargada, contaron con 309.05 km<sup>2</sup> de área, que significó el 13.77 por ciento. Las cuencas clasificadas como Ni Alargadas Ni Ensanchadas, tuvieron una superficie de 247.34 km<sup>2</sup>, ocupando el 11.02 por ciento del total de la cuenca. Los tres tipos de forma restante, Muy Alargada, Ensanchada y Rodeando el desagüe, alcanzaron áreas menores al 10 por ciento del total cada una, la primera con 189.03 km<sup>2</sup> (8.42 por ciento), la segunda con 167.54 km<sup>2</sup> (7.46 por ciento) y la última con 86.33 km<sup>2</sup> (3.85 por ciento).

**Tabla 21:** Resultados del mapa de factor forma

Forma	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Muy Alargada	189.03	8.42
Alargada	309.05	13.77
Ligeramente Alargada	383.63	17.09
Ni Alargada Ni Ensanchada	247.34	11.02
Ligeramente Ensanchada	450.07	20.05
Ensanchada	167.54	7.46
Muy Ensanchada	412.01	18.35
Rodeando el desagüe	86.33	3.85





**Figura 84:** Mapa de factor forma de la cuenca Huarney

#### 4.1.7. Precipitación

Las precipitaciones que se obtuvieron en este mapa fueron obtenidas como un promedio anual (mm/año). Como se muestra en figura 85, el 44.99 por ciento de la superficie de la cuenca, o 1009.98 km<sup>2</sup>, presenta lluvias entre el rango de 0 a 150 mm/año, las cuales se manifiestan en la zona media y baja de la cuenca. Las precipitaciones van aumentando, a medida que la altura aumenta también, es por ello que el siguiente rango de 150 a 300 mm/año, se encuentra en la zona media de la cuenca, ocupando 268.48 km<sup>2</sup>, equivalente al 11.96 por ciento del total. La parte media a alta de la unidad hidrográfica presenta un rango de precipitaciones del 300 a 450 mm/año, con una superficie de 306.32 km<sup>2</sup>, que significó el 13.64 por ciento. En la parte más alta de la cuenca, se ubicó el rango de 450 a 600 mm/año, siendo esta zona la segunda con mayor área, la cual fue de 600.21 km<sup>2</sup>, ocupando el 29.41 por ciento del total de la cuenca.

**Tabla 22:** Resultados del mapa de precipitaciones

PP media anual (mm/año)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
0 - 150	1009.98	44.99
150 - 300	268.48	11.96
300 - 450	306.32	13.64
450 - 600	660.21	29.41

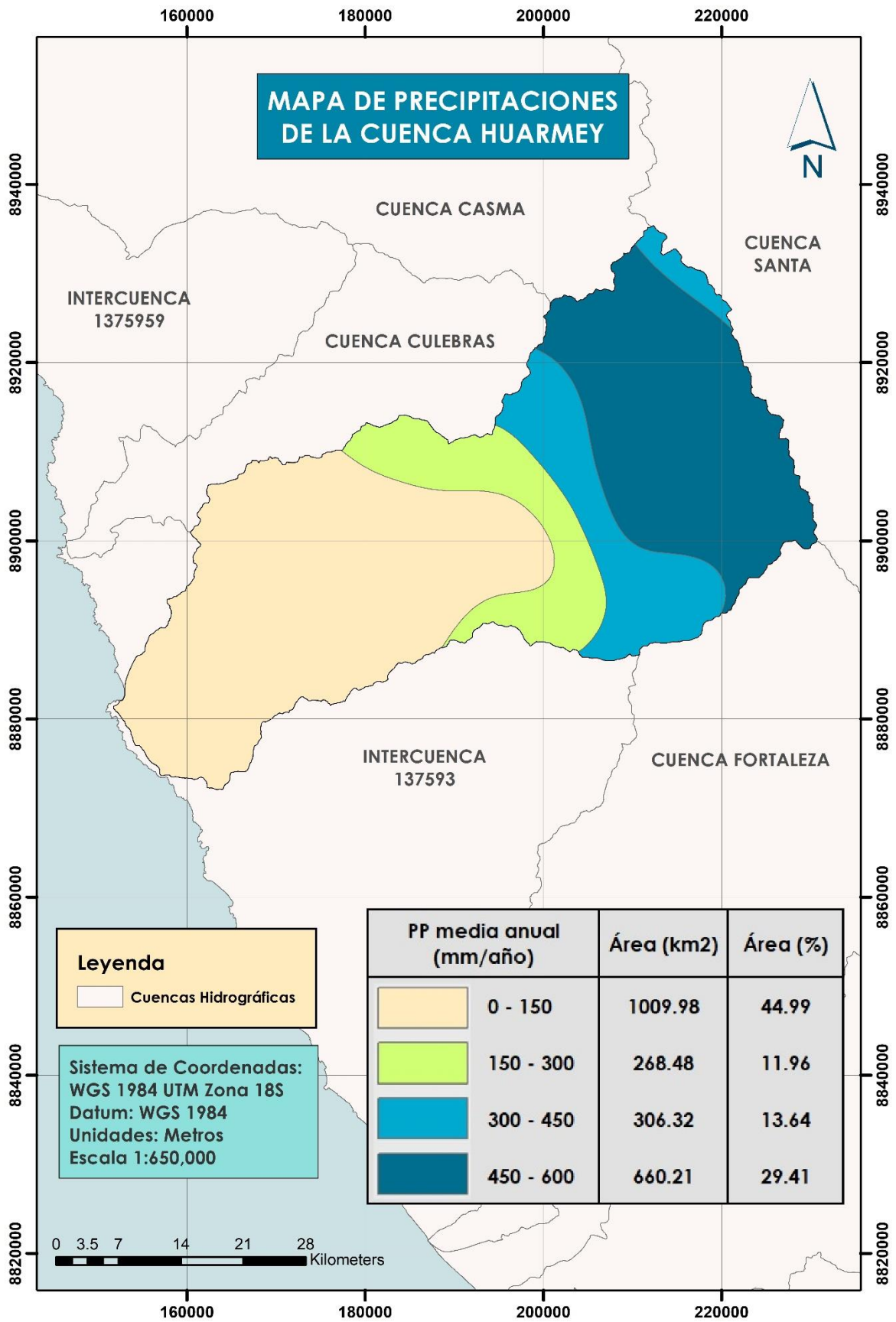


Figura 85: Mapa de precipitaciones de la cuenca Huarney

## 4.2. 2<sup>da</sup> FASE DE GEOPROCESAMIENTO

### 4.2.1. Mapa de Inundaciones Extraordinarias

Luego de realizar la superposición ponderada de las capas de Cobertura, Pendiente, Capacidad de Infiltración y Factor Forma se obtuvo el Mapa de Inundaciones Extraordinarias (figura 86), donde se muestran los niveles de amenaza ante fuertes precipitaciones imprevistas. Los resultados indicaron que el área de la cuenca que presentó un nivel muy bajo de amenaza fue de 67.79 km<sup>2</sup>, el cual representó el 3.02 por ciento de la superficie total. La zona que contó con un nivel bajo de vulnerabilidad ante estas inundaciones, fue la que contó con la mayor área, la cual fue de 1025.28 km<sup>2</sup>, lo que significó el 45.67 por ciento de la cuenca. El sector de la cuenca con un moderado nivel de amenaza, contó con 804.22 km<sup>2</sup> de área, abarcando el 35.82 por ciento del total, siendo esta zona la segunda más grande. La región de la cuenca con un alto nivel de vulnerabilidad ante este fenómeno, se ubicó principalmente en la zona del valle y en la parte baja cerca a la costa, y tuvo un área de 345.90 km<sup>2</sup>, comprendiendo el 15.41 por ciento. Por último, la zona con un nivel muy alto de amenaza presentó una superficie de 1.71 km<sup>2</sup>, representando solo el 0.08 por ciento de la superficie.

Así mismo, se puede observar que los puntos donde se registraron inundaciones en el año 2017 por el fenómeno del Niño Costero, coinciden con la zona con un nivel alto y muy alto de susceptibilidad ante inundaciones extraordinarias.

**Tabla 23:** Resultados del mapa de inundaciones extraordinarias

Nivel	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
<b>Muy Alto</b>	1.71	0.08
<b>Alto</b>	345.90	15.41
<b>Moderado</b>	804.22	35.82
<b>Bajo</b>	1025.28	45.67
<b>Muy Bajo</b>	67.79	3.02

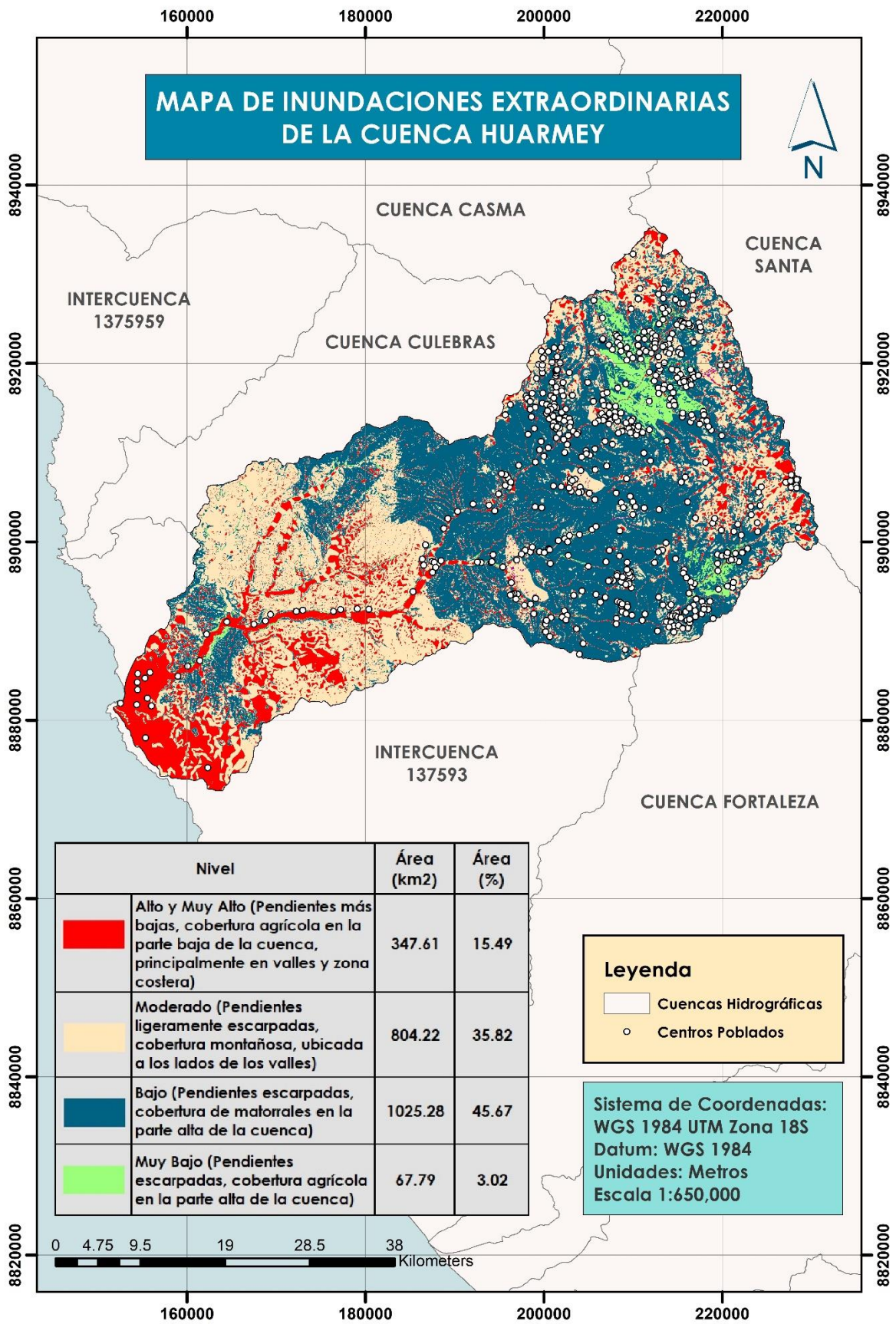
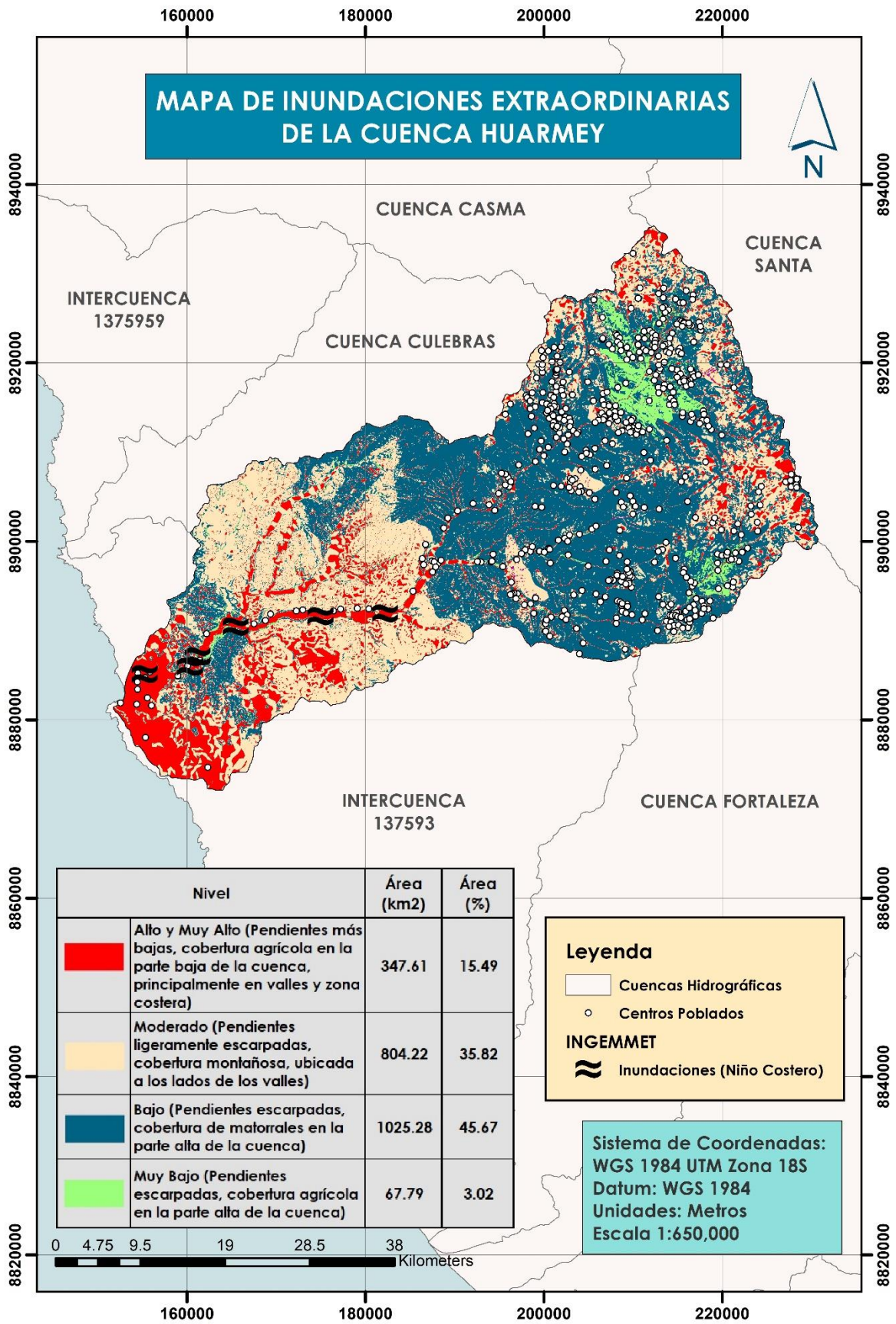


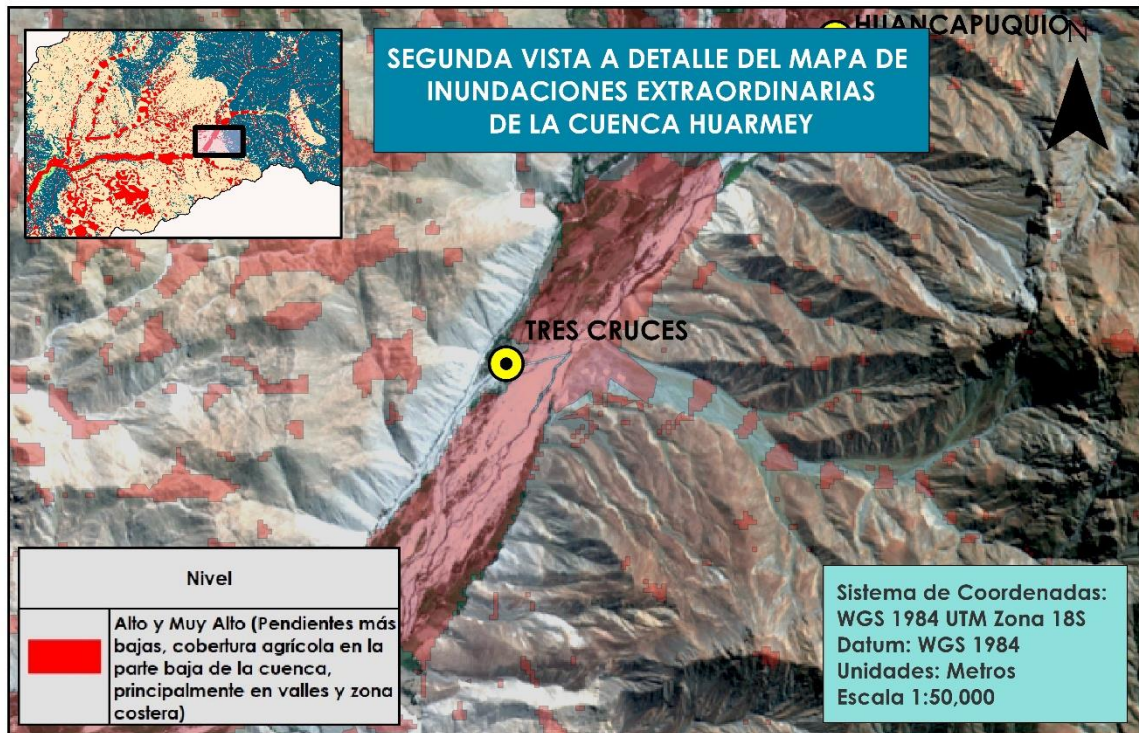
Figura 86: Mapa de inundaciones extraordinarias de la cuenca Huarney



**Figura 87:** Mapa de inundaciones extraordinarias de la cuenca Huarney y puntos donde se produjeron inundaciones durante el Niño Costero, según INGEMMET



**Figura 88:** Primera vista a detalle del Mapa de inundaciones extraordinarias



**Figura 89:** Segunda vista a detalle del Mapa de inundaciones extraordinarias

#### 4.2.2. Mapa de Inundaciones, considerando PP

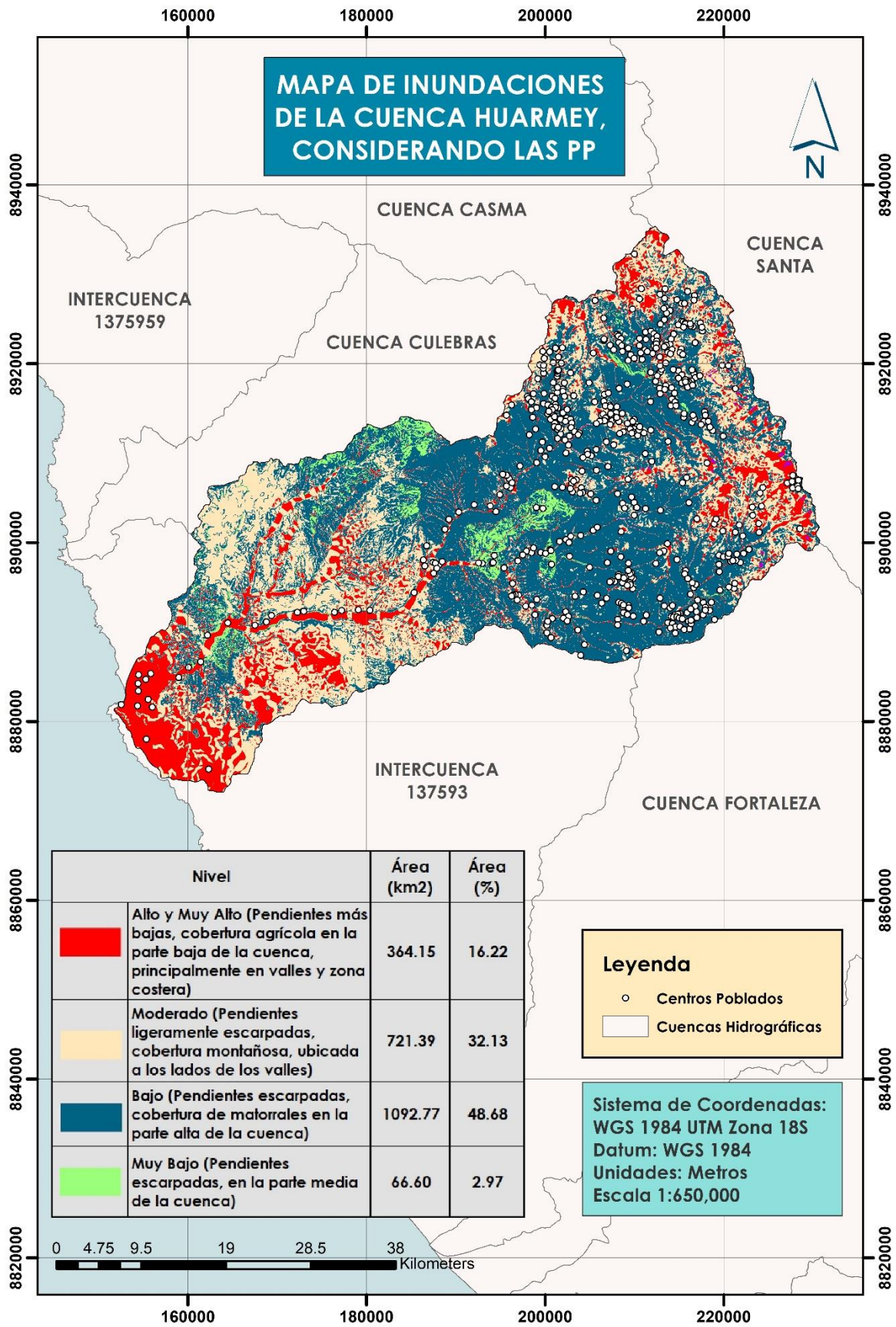
Este segundo modelo (figura 90), fue creado con la superposición de las capas de Precipitaciones, Cobertura, Pendiente, Capacidad de Infiltración y Factor Forma. Existen solo algunas variaciones en los niveles de vulnerabilidad ante inundaciones, respecto al primer modelo, a causa de la consideración de las precipitaciones en este mapa.

La zona con un muy bajo nivel de amenaza presentó un área de 66.60 km<sup>2</sup>, equivalente al 2.97 por ciento del total. Al igual que en el modelo anterior, el sector con mayor superficie fue el de nivel bajo, la cual contó con un área de 1092.77 km<sup>2</sup>, que representó el 46.68 por ciento de la cuenca. La región de la cuenca con un nivel moderado de amenaza ante inundaciones abarcó 721.39 km<sup>2</sup>, que significó el 32.13 por ciento. La superficie de la zona con un nivel alto de vulnerabilidad, fue de 360.53 km<sup>2</sup>, que representó el 16.06 por ciento de la cuenca, y tal como sucedió en el primer mapa de inundaciones, se localizó en el valle de la cuenca, y en la parte baja cerca a la costa, solo se observaron diferencias en la parte más alta de la cuenca, donde se incrementaron las regiones de alto nivel de vulnerabilidad debido a las fuertes precipitaciones que se producen anualmente. Las zonas con un nivel muy alto de amenaza, fueron las más pequeñas con un área de 3.62 km<sup>2</sup>, equivalente al 0.16 por ciento del total.

**Tabla 24:** Resultados del mapa de inundaciones, considerando PP

Nivel	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
<b>Muy Alto</b>	3.62	0.16
<b>Alto</b>	360.53	16.06
<b>Moderado</b>	721.39	32.13
<b>Bajo</b>	1092.77	48.68
<b>Muy Bajo</b>	66.60	2.97





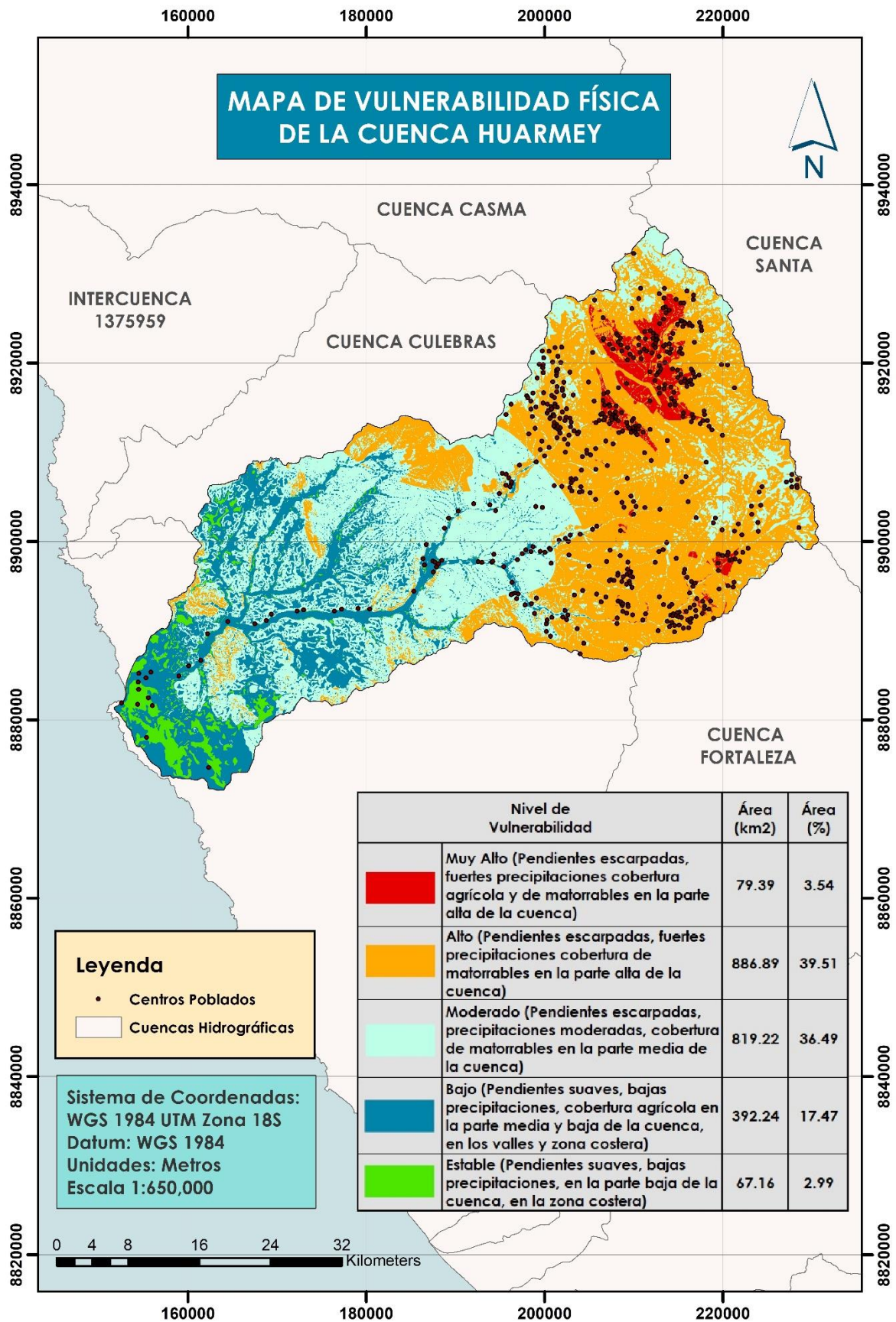
**Figura 90:** Mapa de inundaciones de la cuenca Huarmey, considerando la capa de Precipitaciones

### 4.2.3. Mapa de Vulnerabilidad Física

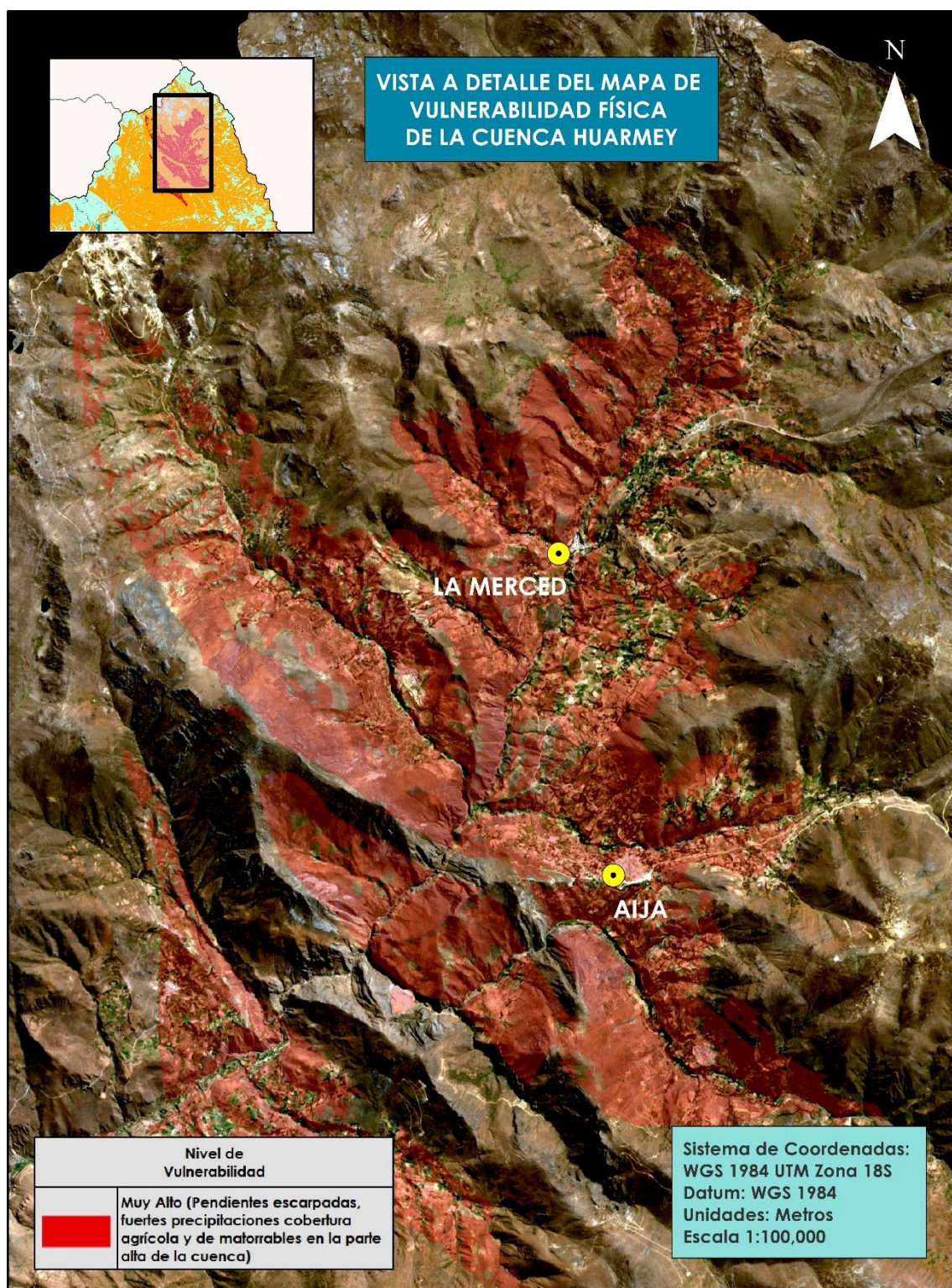
Este mapa se creó con el fin de hallar las zonas más vulnerables de la cuenca, para realizar una comparación con el modelo USLE y comprobar que las zonas más peligrosas concuerden. Los sectores con un nivel muy alto de vulnerabilidad se presentan en la zona más alta de la cuenca debido a las pendientes escarpadas de la región y la presencia de fuertes lluvias, abarcando un área de 79.39 km<sup>2</sup>, equivalente al 3.54 por ciento. Por otro lado, las zonas con un nivel alto de vulnerabilidad contó con una superficie de 886.89 km<sup>2</sup>, representando el 39.51 por ciento del área total, que abarca la misma zona que el rango de 50 a 200 t/ha.año de pérdida de suelo en el modelo USLE, en la parte alta de la cuenca. Las zonas con nivel estable y bajo mantuvieron una relación con los menores rango de pérdida de suelo en el mapa USLE, del mismo modo sucede con el nivel moderado, y estos rangos se encuentra en la parte media y baja de la cuenca, donde las pendientes y precipitaciones son menores.

**Tabla 25:** Resultados del mapa de vulnerabilidad física de la cuenca Huarney

Nivel de Vulnerabilidad	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
<b>Muy Alto</b>	79.39	3.54
<b>Alto</b>	886.89	39.51
<b>Moderado</b>	819.22	36.49
<b>Bajo</b>	392.24	17.47
<b>Estable</b>	67.16	2.99



**Figura 91:** Mapa de Vulnerabilidad Física de la cuenca Huarvey



**Figura 92:** Vista a detalle del Mapa de Vulnerabilidad Física

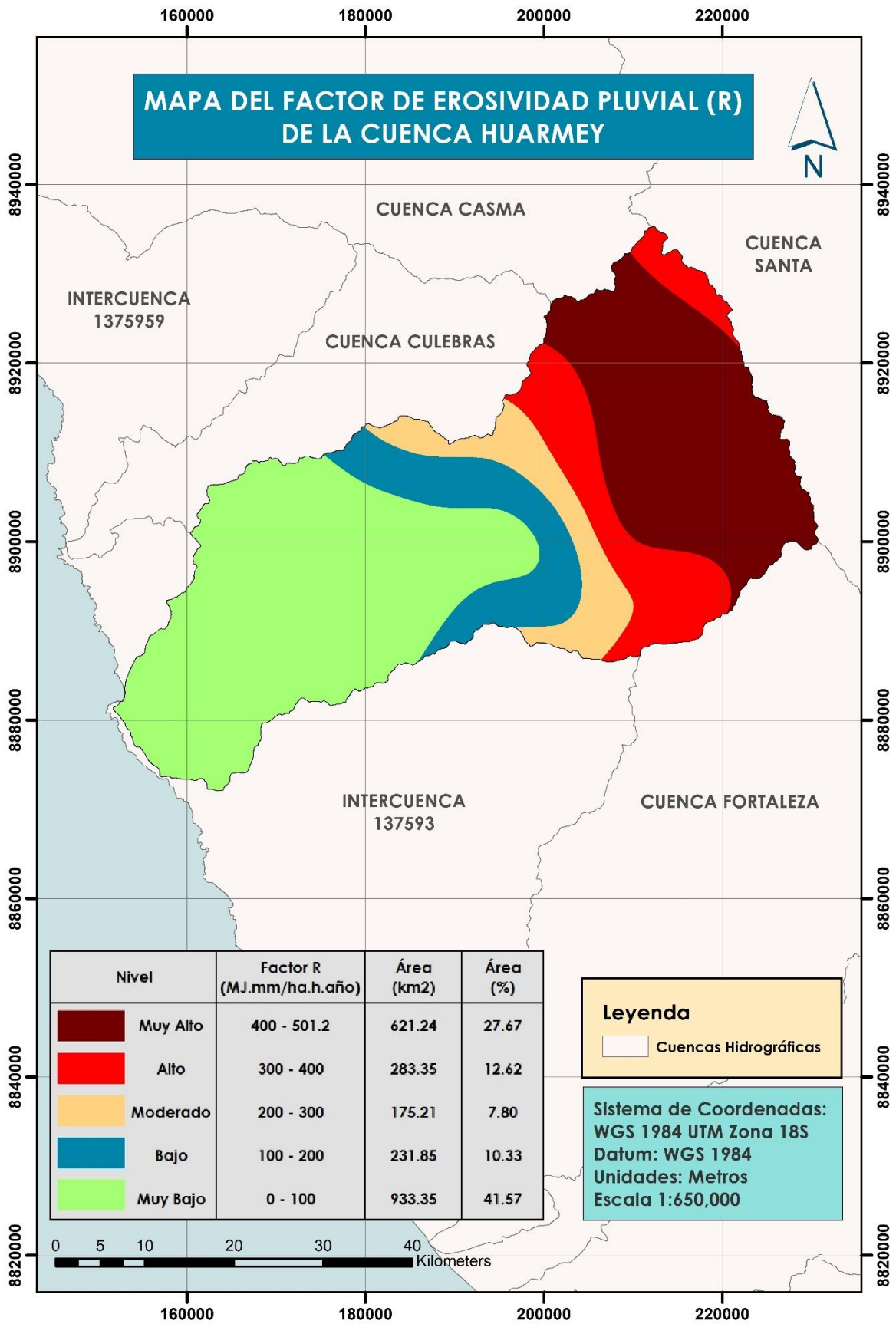
#### 4.2.4. Modelo Geoespacial para la identificación y cuantificación de la erosión del suelo con el método USLE

##### a. Factor de Precipitación (R)

Los valores del Factor R, se clasificaron en cinco rangos con un intervalo de 100, los cuales al igual que en el mapa de precipitaciones, se observa que van aumentando a medida que la altura se incrementa. De este modo, la cuenca baja presentó el rango de 0 a 100, lo cual abarcó la mayor parte de la zona, con un área de 933.35 km<sup>2</sup>, que representó el 41.57 por ciento del total de la superficie. Por otro lado, la segunda zona con mayor área, fue la que se encontró en el rango de 400 a 501.22, la cual contó con un área de 621.24 km<sup>2</sup>, que significó el 27.67 por ciento de la cuenca, y se encontró en la parte alta de ésta. El tercer rango con mayor cobertura fue el de 300 a 400, que abarcó un área de 283.35 km<sup>2</sup>, equivalente al 12.62 por ciento del total, y se encontró en la parte media y alta de la cuenca, donde la altura va disminuyendo. El rango de 100 a 200 tuvo un área de 231.85 km<sup>2</sup>, cubriendo un 10.33 por ciento de la cuenca. El rango con menor área fue el de 200 a 300, el cual abarcó una superficie de 175.21 km<sup>2</sup>, que representó el 7.80 por ciento del total del área.

**Tabla 26:** Resultados del mapa de Factor R

Factor R (MJ.mm/ha.h.año)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
0 - 100	933.35	41.57
100 - 200	231.85	10.33
200 - 300	175.21	7.80
300 - 400	283.35	12.62
400 - 501.22	621.24	27.67



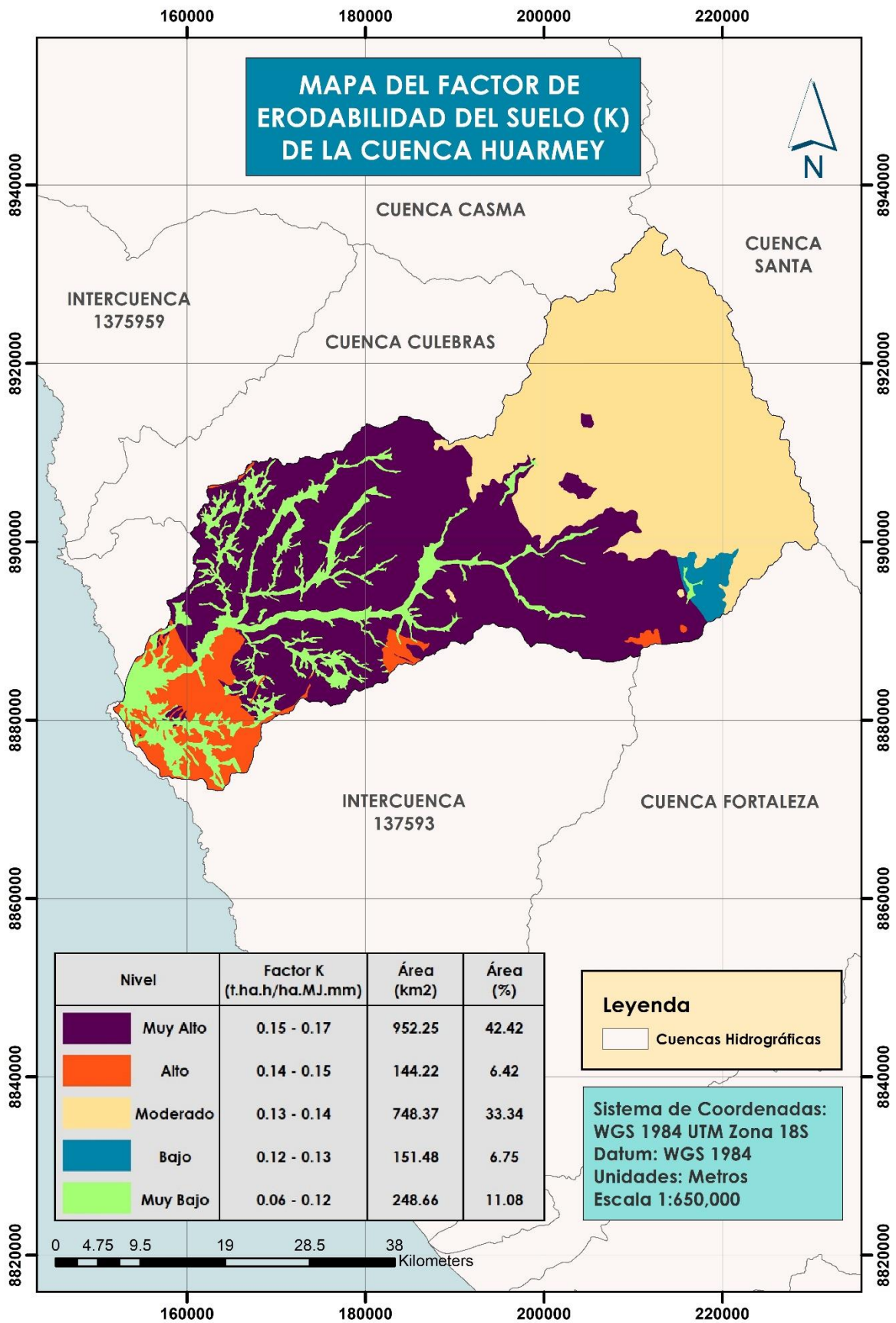
**Figura 93:** Mapa del Factor R de la cuenca Huarney

### b. Factor de Susceptibilidad a erosión del Suelo (K)

Los valores del Factor K se clasificaron en cinco rangos, como se muestra en la Tabla 27. El rango de 0.15 a 0.17, que fueron los mayores valores de K, abarcaron un área de 952.25 km<sup>2</sup>, equivalente al 42.42 por ciento y se encontró en la parte media y baja de la cuenca. El siguiente sector más grande, fue el de 0.13 a 0.14, cuya superficie fue de 748.37 km<sup>2</sup>, representando el 33.34 por ciento del área, localizándose en la zona más alta de la cuenca. La categoría con los valores de 0.06 a 0.12 contó con un área de 248.66 km<sup>2</sup>, y abarcó el 11.08 por ciento de la cuenca, en la región de los valles y suelo desnudos. Así mismo, en la cuenca alta se encontró el rango de 0.12 a 0.13, que abarcó 151.48 km<sup>2</sup>, o el 6.75 por ciento de la cuenca. La región más pequeña fue la de la categoría de 0.14 a 0.15, con una superficie de 144.22 km<sup>2</sup>, equivalente al 6.42 por ciento del total.

**Tabla 27:** Resultados del mapa de Factor K

Factor K (t.ha.h/ha.MJ.mm)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
0.06 - 0.12	248.66	11.08
0.12 - 0.13	151.48	6.75
0.13 - 0.14	748.37	33.34
0.14 - 0.15	144.22	6.42
0.15 - 0.17	952.25	42.42



**Figura 94:** Mapa del Factor K de la cuenca Huarney

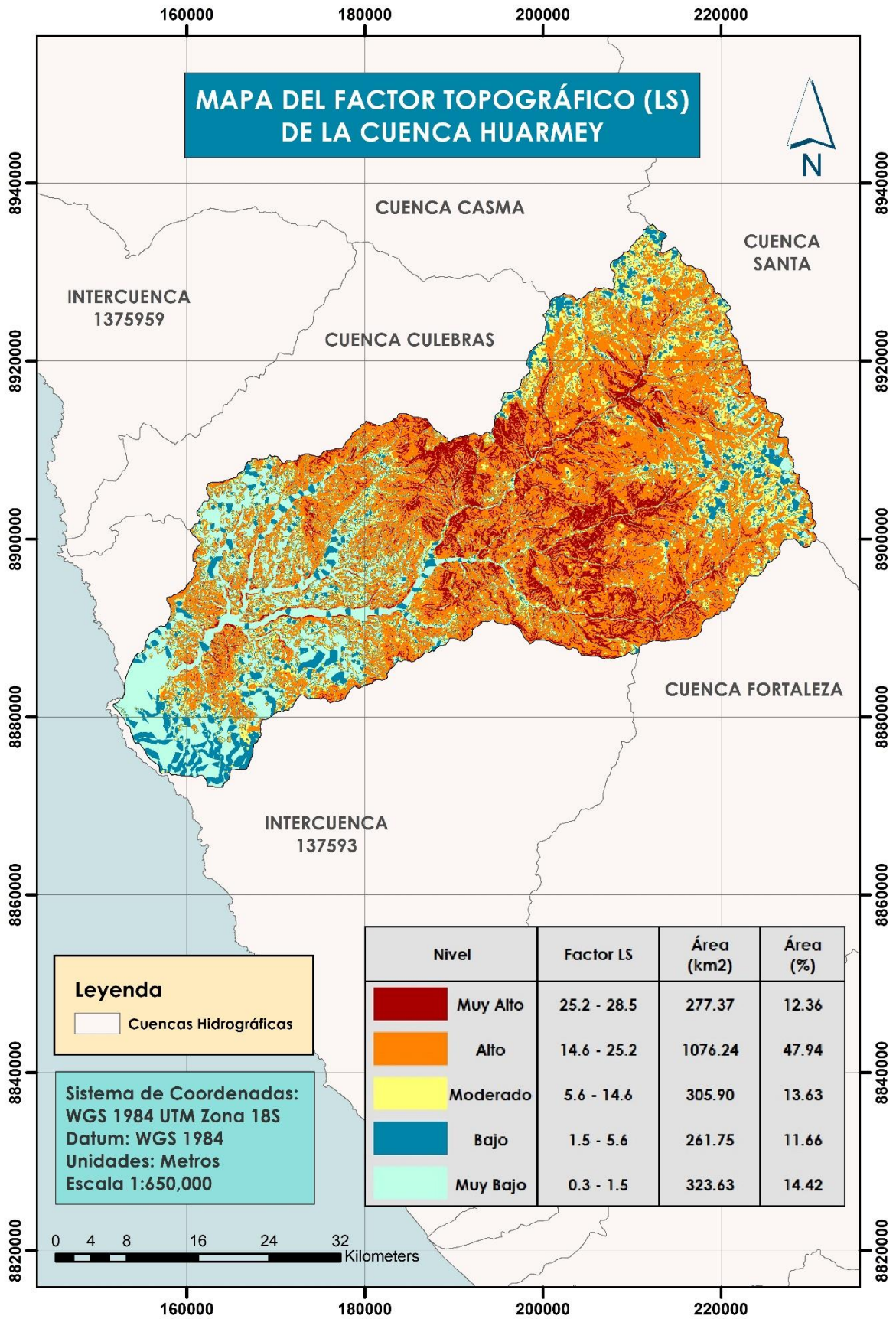


### c. Factor Topográfico (LS)

Los resultados obtenidos se presentaron en la Tabla 28. El rango que contó con una mayor área fue la de 14.60 a 25.20, ocupando 1076.24 km<sup>2</sup>, que representó el 47.94 por ciento del total del área y correspondieron a las altas pendientes de la zona de estudio. La segunda zona con mayor superficie, fue la que contó con los menores valores de LS, 0.30 a 1.50, con un área de 323.63 km<sup>2</sup>, abarcando 14.42 por ciento de la cuenca, localizado en la zona llana de la cuenca. El tercer rango con mayor área, fue la de 5.60 a 14.60, y contó con un área de 305.90 km<sup>2</sup>, equivalente al 13.63 por ciento. Las pendientes con mayor inclinación dieron como resultado los valores de 25.2 a 28.5 y abarcaron un área de 277.37 km<sup>2</sup>, ocupando el 12.36 por ciento del área total. Finalmente, el rango de 1.50 a 5.60 tuvo la menor área, con 261.75 km<sup>2</sup>, equivalente al 11.66 por ciento.

**Tabla 28:** Resultados del mapa de Factor LS

Factor LS	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
0.3 - 1.5	323.63	14.42
1.5 - 5.6	261.75	11.66
5.6 - 14.6	305.90	13.63
14.6 - 25.2	1076.24	47.94
25.2 - 28.5	277.37	12.36



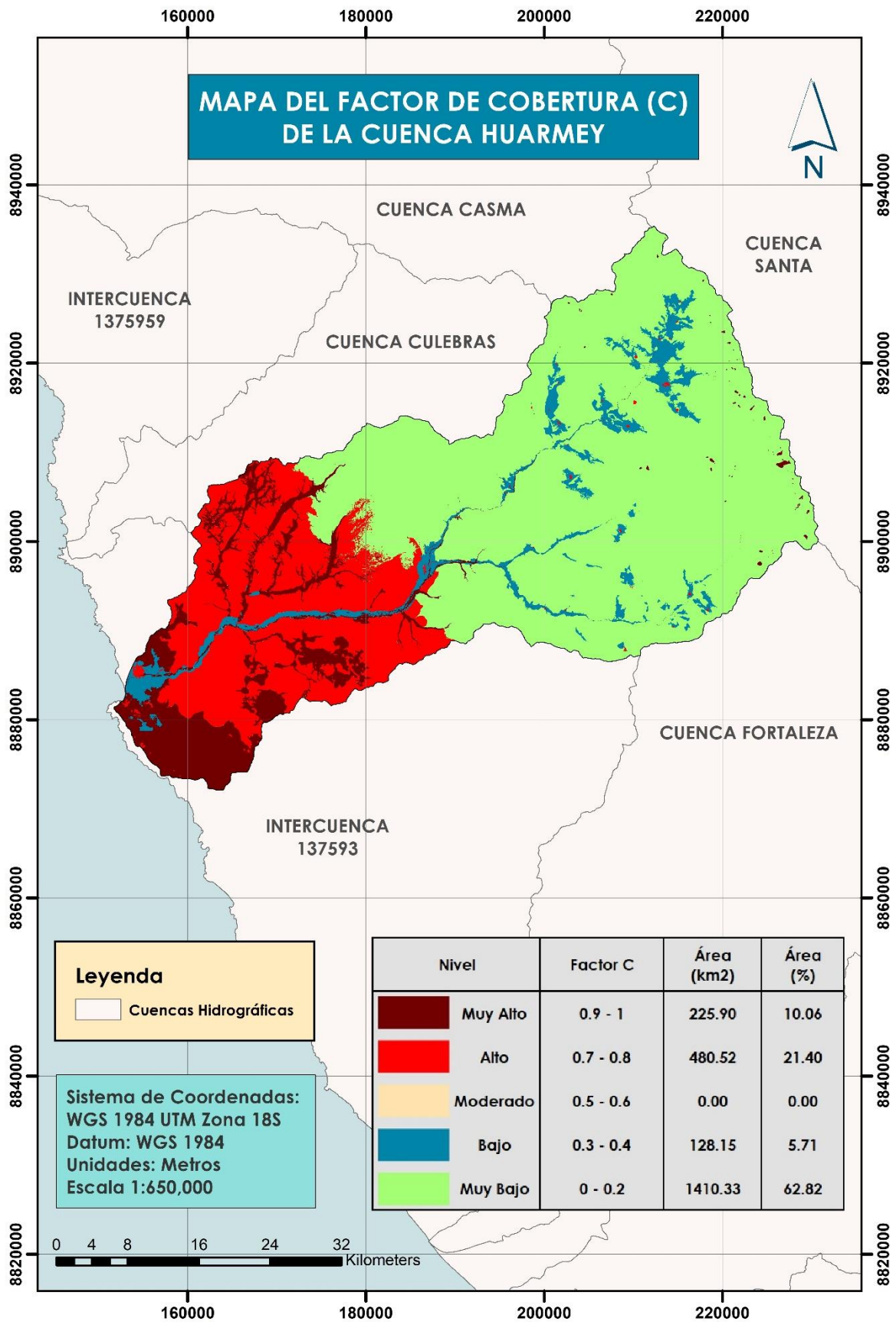
**Figura 95:** Mapa del Factor LS de la cuenca Huarney

#### d. Factor de Cobertura Vegetal (C)

Los resultados obtenidos en el mapa de cobertura (Figura 79), se le asignaron valores de C que estuvieron dentro del rango de cero a uno. Debido a que los Matorrales ocuparon la mayor parte de la cuenca, su valor correspondiente de C de 0.20 fue la más grande, abarcando un área de 1410.33 km<sup>2</sup>, que representó el 62.82 por ciento de la superficie total. Los valores de C de 0.7 a 0.8, que pertenecieron a la zona de Montañas de la parte media de la cuenca y la zona urbana, presentó un área de 480.52 km<sup>2</sup>, equivalente al 21.40 por ciento de la cuenca. Los valores de C de 0.9 a 1, se presentaron en la superficie sin cobertura vegetal, y contó una superficie de 225.90 km<sup>2</sup>, que significó el 10.06 por ciento, siendo la tercera zona más grande. Los demás valores contaron con superficies menores al 10 por ciento.

**Tabla 29:** Resultados del mapa de Factor C

Factor C	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
0 - 0.2	1410.33	62.82
0.3 - 0.4	128.15	5.71
0.5 - 0.6	0.00	0.00
0.7 - 0.8	480.52	21.40
0.9 - 1	225.90	10.06



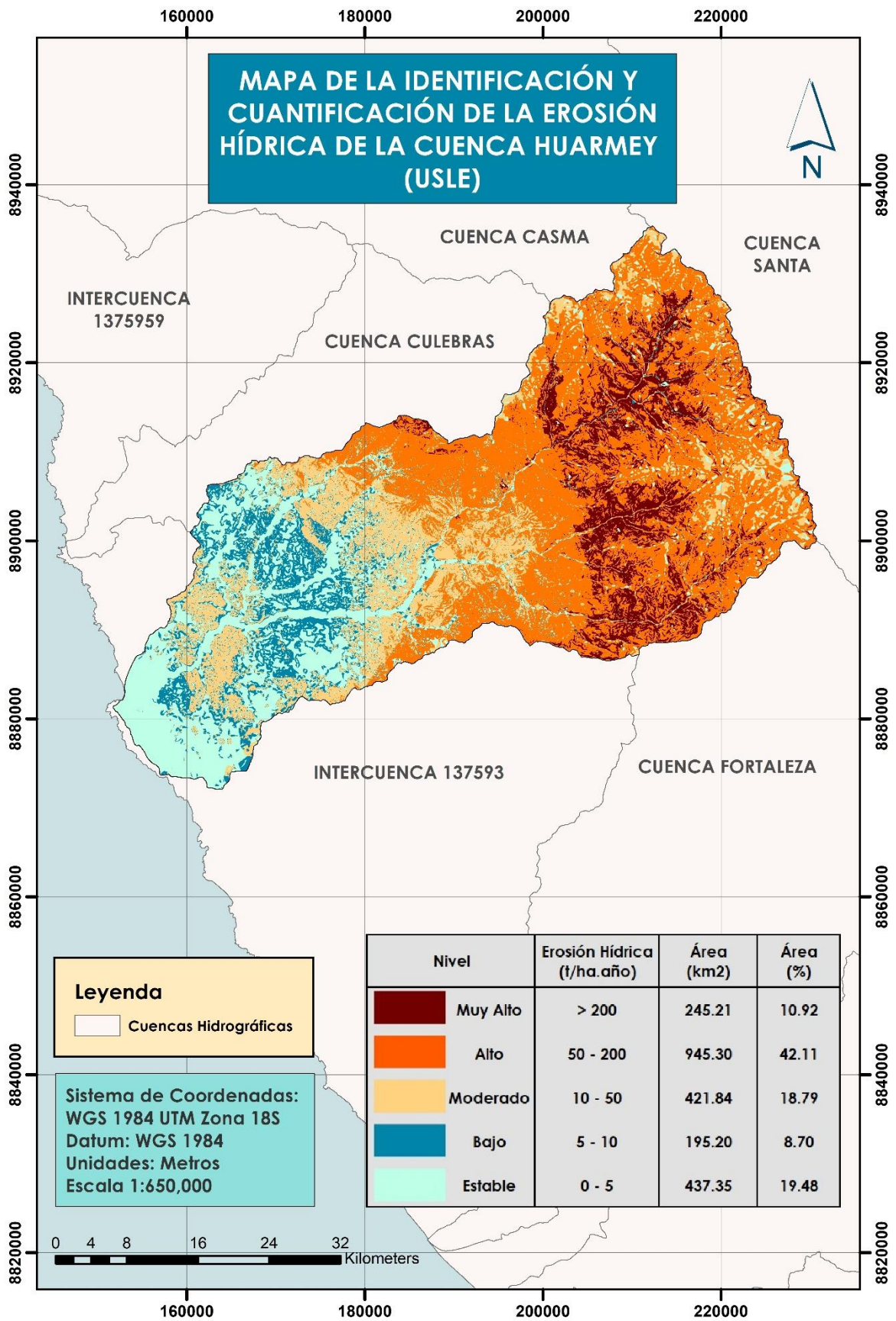
**Figura 96:** Mapa del Factor C de la cuenca Huarney

#### e. Mapa de Identificación y Cuantificación de la Erosión Hídrica (USLE)

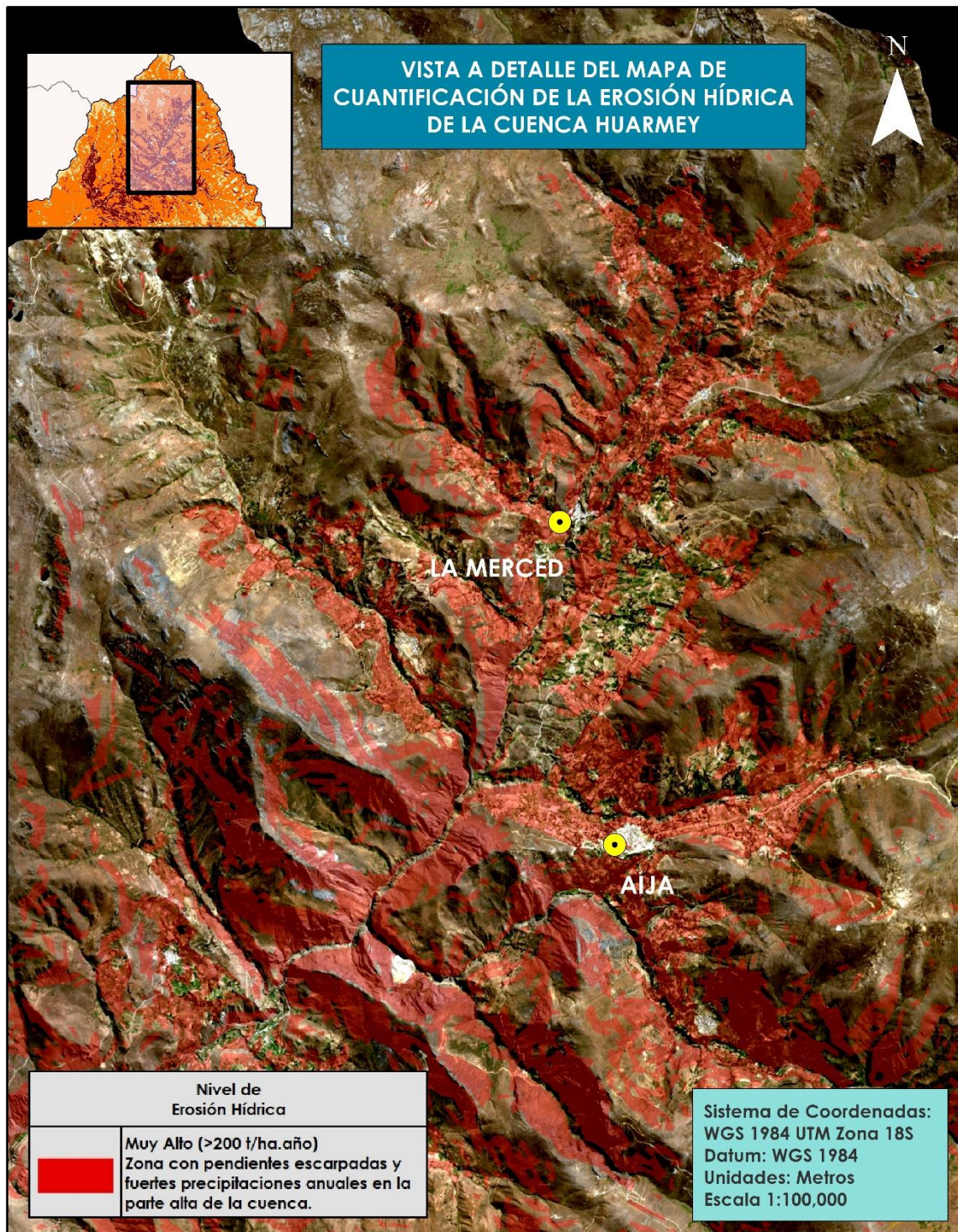
Como se muestra en la Figura 97, la zona donde se registraron las mayores pérdidas de suelo por erosión hídrica, de más de 200 t/ha.año, fue en la parte alta de la cuenca, debido a que en este sector se producen las mayores precipitaciones y existen pendientes altas, y contó con un área de 245.21 km<sup>2</sup>, equivalente al 10.92 por ciento del total de la cuenca. Por otro lado, la región con mayor área fue la del rango de 50 a 200 t/ha.año, que abarcó un área de 945.30 km<sup>2</sup>, abarcando el 42.11 por ciento del total, y presentó estos valores ya que es en esta zona donde se presentan precipitaciones significativas y cuenta con pendientes elevadas. La región con erosiones de 0 a 5 t/ha.año y de 5 a 10 t/ha.año fue la más segura y cuya superficie fue de 632.55 km<sup>2</sup>, representando el 28.18 por ciento.

**Tabla 30:** Resultados del mapa de cuantificación de la erosión hídrica de la cuenca  
Huarmey

Erosión Hídrica (t/ha.año)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
0 - 5	437.35	19.48
5 - 10	195.20	8.70
10 - 50	421.84	18.79
50 - 200	945.30	42.11
> 200	245.21	10.92



**Figura 97:** Mapa de la Identificación y Cuantificación de la Erosión Hídrica de la cuenca Huarney (USLE)



**Figura 98:** Vista a detalle del Mapa de la Identificación y Cuantificación de la Erosión Hídrica de la cuenca Huarmey (USLE)

## V. CONCLUSIONES

- De acuerdo al objetivo general de la presente investigación se logró identificar las zonas vulnerables a inundaciones y procesos de erosión; así como cuantificar la cantidad la pérdida de suelo por erosión, mediante la aplicación del sistema de información geográfica (SIG), generando los modelos de inundaciones extraordinarias, inundaciones, vulnerabilidad física y USLE.
- Se elaboró una Base de Datos Geoespacial con siete variables temáticas, las cuales fueron utilizadas para elaborar los modelos de inundaciones, inundaciones extraordinarias y vulnerabilidad física; así como para cuantificar la pérdida de suelos en la cuenca Huarney.
- El Mapa de Inundaciones Extraordinarias fue el primer modelo geoespacial que se elaboró, y cuyo principal factor que influyó en la formación de inundaciones fue la información temática de pendientes. Este modelo mostró cinco niveles de riesgo a inundaciones, muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto. Las zonas con nivel muy bajo se encuentran en la parte más alta de la cuenca, abarcando un área de 67.8 km<sup>2</sup>, donde las pendientes son escarpadas y existe mayor cobertura vegetal; las de nivel bajo se ubican en la zona de los matorrales en la parte media a alta de la cuenca, con un área de 1025.3 km<sup>2</sup>; y la de nivel moderado contó con un área de 804.2 km<sup>2</sup> principalmente en la zona de las colinas de la parte media de la cuenca. La zona que presentó un nivel alto de riesgo por inundaciones extraordinarias, se ubicó en la parte media y baja de la cuenca, donde se ubican los valles, el suelo desnudo y la llanura arenosa, ocupando un área de 345.9 km<sup>2</sup>, esto debido principalmente a la presencia de pendientes muy suaves y a una escasa cobertura vegetal, existente solo en las zonas agrícolas. Así mismo, gracias al mapa que muestra los puntos donde se produjeron las inundaciones en el año 2017 a causa del Fenómeno del Niño Costero (Figura 87), se observó que la localización de estos eventos coincide con las zonas con un nivel alto de riesgo por inundaciones del Mapa de Inundaciones Extraordinarias.



- El Mapa de Inundaciones resultó del segundo modelamiento geoespacial, que de igual forma fue la variable pendiente la que tuvo una mayor influencia en la formación de inundaciones. En este modelo la zona de vulnerabilidad alta, no presentó variaciones significativas respecto al primer mapa, solo se presentó un incremento en su área, llegando a ser de 360.5 km<sup>2</sup>, esto debido principalmente a que en la parte alta de la cuenca aumentó la superficie por la incorporación de los datos de precipitaciones, que son significativas en esta zona.
- El Mapa de Vulnerabilidad Física fue el tercer modelo elaborado, cuyos principales factores que influyeron fueron las pendientes y las precipitaciones. Así mismo, presentó cinco niveles de vulnerabilidad que fueron estable, bajo, moderado, alto y muy alto. La zona de vulnerabilidad estable se presentó en la parte más baja de la cuenca, en la llanura arenosa donde las pendientes son muy bajas y las precipitaciones escasas, con un área de 67.2 km<sup>2</sup>; la de vulnerabilidad baja contó con un área de 392.2 km<sup>2</sup>, principalmente en la zona de los valles donde las pendientes y las precipitaciones son bajas; y la de nivel moderado se ubicó en la parte media de la cuenca donde las pendientes son escarpadas y las precipitaciones moderadas, con una superficie de 819.2 km<sup>2</sup>. Las regiones con los niveles de vulnerabilidad alta y muy alta, presentaron áreas de 886.9 km<sup>2</sup> y 79.4 km<sup>2</sup> respectivamente, y se localizaron en la zona de los matorrales y montañas, donde se producen fuertes precipitaciones y las pendientes van de moderada a altas, en centros poblados como La Merced, Aija, Huacllan y Malvas.
- El Mapa de la Identificación y Cuantificación de la Erosión Hídrica de la Cuenca Huarmey, según el método USLE, integró los factores de precipitaciones, topografía, cobertura y suelo. Este fue el último modelo geoespacial que se elaboró, en donde la cantidad de suelo perdido por erosión se clasificó en cinco niveles, las cuales fueron estable, bajo, moderado, alto y muy alto. La zona clasificada con un nivel estable, que presentó el rango de 0 a 5 t/ha.año, abarcó un área de 437.4 km<sup>2</sup> y se localizó en la zona de los valles y la llanura costera, donde las pendientes son suaves y las precipitaciones escasas; la de nivel bajo, con un rango de 5 a 10 t/ha.año, contó con un área de 195.2 km<sup>2</sup> y se ubicó en la parte media de la cuenca al lado de los valles, donde las pendientes son moderadas y las precipitaciones mínimas; y la de nivel moderado, cuyo rango fue de 10 a 50 t/ha.año, tuvo un área de 421.8 km<sup>2</sup> y se presentó

en la parte media de la cuenca, donde se encuentran las colinas con pendientes moderadas a leves y las precipitaciones que se producen son mínimas. Las zonas con un nivel alto y muy alto de erosión, con un rango de 50 a 200 t/ha.año y de 200 t/ha.año a más, presentaron áreas de 945.3 km<sup>2</sup> y 245.2 km<sup>2</sup> respectivamente, y se localizaron en la zona de los matorrales y montañas, cuyas pendientes van de moderadas a escarpadas y se registran fuertes precipitaciones, en centros poblados como La Merced, Aija, Huacllan y Malvas.

## VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda considerar los resultados obtenidos en la presente investigación respecto a la localización de las zonas vulnerables a inundaciones y procesos de erosión para los planes de desarrollo en la cuenca Huarmey, por parte de las entidades públicas y privadas.
- La Base de Datos Geoespacial es importante para la identificación de zonas vulnerables en la cuenca, razón por la cual se recomienda mantener actualizada la data, para que los modelos se optimicen y puedan ser utilizados para la elaboración de planes, programas, proyectos y actividades en la cuenca del río Huarmey.
- En base a la experiencia, se aconseja la aplicación de tecnologías de los Sistemas de Información Geográfica y la Teledetección, para obtener otros modelos que muestren zonas susceptibles a diferentes desastres, y puedan ser utilizados en la elaboración de planes, programas, proyectos y actividades en las cuencas hidrográficas
- La cobertura vegetal es un factor importante para reducir la erosión de una zona, es por ello que se recomienda como práctica de conservación, implementar la agroforestación en las partes altas de la cuenca, ya que con ello se podría proteger al suelo de la erosión gracias a las raíces profundas y la caída de las hojas, así mismo esto produce que se mejore la capacidad de infiltración del suelo. Cabe resaltar que como medidas de mantenimiento se deben prohibir las quemas en la zona, así como evitar el pastoreo libre en los primeros tres años.
- Así mismo, se recomienda utilizar la información de la presente investigación para desarrollar actividades como la cosecha de aguas de lluvia y la implementación de surcos en contorno, zanjas de infiltración, terrazas, entre otros; en la parte alta y media de la cuenca para que se pueda captar este recurso hídrico en los meses de fuertes

precipitaciones y sea utilizado en los meses posteriores. Estas prácticas de conservación ayudan a que el exceso de lluvia sea utilizado para el consumo familiar o actividades agrícola, y de este modo no se pierda y ocasione erosión en los suelos.

- Por otro lado, la limpieza de los cauces, la descolmatación de río, la implementación de defensas ribereñas en la parte baja de la cuenca son actividades fundamentales para mitigar el riesgo de inundaciones. Es importante concientizar a las autoridades sobre estas medidas de prevención que pueden evitar daños en la población y sus actividades.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, M. y Reyes, E. 2017. Lotización en Condominio La Pradera – La Molina. Tesis Magister en Gestión y Dirección de Empresas Constructoras e Inmobiliarias. Lima, Perú, Pontificia Universidad Católica del Perú y Universidad Politécnica de Madrid. 136 p.
- ANA (Autoridad Nacional del Agua, Perú). s.f. Visor de Estaciones (en línea, sitio web). Consultado 10 feb. 2019. Disponible en <http://snirh.ana.gob.pe/visors2/>.
- Anderson, JR.; Hardy, EE.; Roach, JT. and Witmer, RE. 1976. A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data. Washington D.C., U.S., United States Government Printing Office. 34 p.
- Arias, DD. 2006. Análisis de técnicas de bioingeniería para control de erosión hídrica en taludes con la gramínea kikuyu (*Pennisetum clandestinum*). Tesis Ingeniero Civil. Lima, PE, Universidad Nacional de Ingeniería. 267 p.
- ATDR Casma – Huarmey (Administración técnica del distrito de riego Casma – Huarmey, Perú)/ IRH (Intendencia de Recursos Hídricos, Perú)/INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales, Perú)/Ministerio de Agricultura, Perú. 2007. Inventario de Fuentes de Agua Superficial en la Cuenca del Río Huarmey. Casma, Perú. 98 p.
- Bascuñán, SM. 2010. Relación entre la erosión producida por un flujo superficial en suelos finos y algunas propiedades de estos. Tesis Ingeniero Civil. Santiago, Chile, Universidad de Chile. 222 p.
- Buzai, GD. 2008. Sistemas de Información Geográfica, SIG, y cartografía temática: métodos y técnicas para el trabajo en el aula. Primera edición. Buenos Aires, Argentina. Lugar Editorial. 128 p.

- Cabrejos, MN. 2016. Modelamiento geoespacial en la determinación del riesgo, vulnerabilidad y de la cuantificación de la erosión hídrica en la microcuenca del Rio Atuen – Amazonas. Tesis Ingeniero Agrícola. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 145 p.
- Casella, A; Barrionuevo, N; Pezzola, A; Winschel, C. 2018. Pre-procesamiento de imágenes satelitales del sensor Sentinel 2A y 2B con el software SNAP 6.0 (en línea). 31 p. Consultado 20 jun. 2019. Disponible en [https://inta.gob.ar/sites/default/files/tutorial\\_snap\\_preproc\\_acasella\\_et\\_al\\_2018\\_inta.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/tutorial_snap_preproc_acasella_et_al_2018_inta.pdf).
- Castaño Fernández, S; Ruiz Gallardo, JR; Vela Mayorga, A. 1996. La Teledetección. Sus Bases. Revista de la Facultad de Educación de Albacete (Sección Ciencias) (11):183-194.
- CENEPRED (Centro Nacional de estimación, prevención y reducción del riesgo de desastres, Perú). 2014. Manual para la evaluación de riesgos originados por inundaciones fluviales. Lima, Perú. 48 p.
- Chadli, K. 2016. Estimation of soil loss using RUSLE model for Sebou watershed (Morocco) (en línea). *Modeling Earth Systems and Environment* 2(51):1-10. Consultado 8 feb. 2019. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0105-y>.
- Chuvieco, E. 1995. Fundamento de teledetección digital. 2 ed. Madrid, ES., Rialp. 1 – 7 p.
- COEN (Centro de Operaciones de Emergencia Nacional, Perú). 2017. Boletín informativo de emergencias: Primer Boletín N°241, Perú, jun. 9: 6. Consultado 10 ene. 2018. Disponible en <https://www.mindef.gob.pe/informacion/documentos/BOLETIN%20INFORMATIVO%20N%20241.pdf>.

- Concha Niño de Guzmán, RF; Vásquez Choque, EP; Astete Farfán, I; Benites Cañote, A; Valdivia Vera, W. 2017. Peligros Geológicos y Geo-Hidrológicos detonados por El Niño Costero 2017 en la Región Áncash: Análisis Geológico, geomorfológico y de Peligros en la Cuenca Media y Baja del Río Huarney. Perú, INGEMMET. 111 p. Informe Técnico N° A6790.
- Córdova, M. 2016. Parámetros geomorfológicos de cuencas hidrográficas (en línea, sitio web). Consultado 5 feb. 2019. Disponible en [https://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id\\_articulo=26](https://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id_articulo=26).
- Desmet, PJJ; Govers, GA. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation* 51(5): 427-433.
- ENFEN (Comité Multisectorial Encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño, Perú). 2012. Nota Técnica ENFEN: Definición operacional de los eventos El Niño y La Niña y sus magnitudes en la costa del Perú (en línea). Consultado 9 abr. 2018. Disponible en [http://www.met.igp.gob.pe/elnino/enfen/ICEN-Nota\\_Tecnica.pdf](http://www.met.igp.gob.pe/elnino/enfen/ICEN-Nota_Tecnica.pdf)
- ESA (European Space Agency). 2012. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services (en línea). ESA Communications. 80 p. Consultado 10 set. 2018. Disponible en [https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2\\_SP-1322\\_2.pdf](https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2_SP-1322_2.pdf).
- ESA (European Space Agency). c2014. Copernicus Open Access Hub (en línea, sitio web). Consultado 10 set. 2018. Disponible en <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- ESA (European Space Agency). 2019. Sentinel-2: Level-2A Processing Overview (en línea, sitio web). Consultado 10 set. 2018. Disponible en <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a-processing>.

- ESRI (Environmental Systems Research Institute, EE.UU.). s.f. Conceptos del conjunto de herramientas Hidrología: Cómo funciona Acumulación de flujo (en línea, sitio web). Consultado 8 abr. 2019. Disponible en <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm>.
- Gaitán, J.; Navarro, MF.;Tenti, L.; Pizarro, MJ.; Carfagno, P. y Rigo, S. 2017. Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina. Buenos Aires, Argentina, Ediciones INTA. 72 p. Consultado 10 set. 2018. Disponible en [https://inta.gob.ar/sites/default/files/libro\\_erosion\\_hidrica\\_rep\\_argentina.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/libro_erosion_hidrica_rep_argentina.pdf).
- González del Tánago, M. 1991. La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo: Pasado, Presente y Futuro. *Ecología* (3):13-50.
- Google. c2019. Google Earth Pro. Esc. varía. 1h. Color.
- INGEMMET (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Perú). 1995. Geología del Perú. Lima, Perú. Boletín (55): 1-177. (Serie A: Carta Geológica Nacional).
- INGEMMET (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Perú). c.2017. GEOCATMIN: Sistema de Información Geológico y Catastral Minero (en línea, sitio web). Consultado 15 set. 2018. Disponible en <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>.
- IMARPE (Instituto del mar del Perú, Perú). Definición del Niño Costero, antecedentes y sistema de alerta (en línea). Consultado el 31 de marzo del 2018. Disponible en [http://www.imarpe.pe/imarpe/index.php?id\\_seccion=I017504020000000000000000](http://www.imarpe.pe/imarpe/index.php?id_seccion=I017504020000000000000000), [http://www.imarpe.pe/imarpe/index.php?id\\_seccion=I017504010000000000000000](http://www.imarpe.pe/imarpe/index.php?id_seccion=I017504010000000000000000), [http://www.imarpe.pe/imarpe/index.php?id\\_seccion=I017504030000000000000000](http://www.imarpe.pe/imarpe/index.php?id_seccion=I017504030000000000000000)
- INDECI (Instituto Nacional de Defensa Civil, Perú). 2006. Manual básico para la estimación del riesgo. Lima, Perú. 73 p. Consultado 10 set. 2018 Disponible en [http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc319/doc319\\_contenido.pdf](http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc319/doc319_contenido.pdf).
- INDECI (Instituto Nacional de Defensa Civil, Perú). 2011. Manual de estimación del riesgo ante inundaciones fluviales. Cuaderno Técnico N° 02. Lima, Perú. 81 p.



Consultado 10 set. 2018. Disponible en <http://bvpad.indec.gov.pe/doc/pdf/esp/doc1743/doc1743-contenido.pdf>.

- Kuroiwa, J. 2002. Reducción de desastres. Viviendo en armonía con la naturaleza. Primera edición. Perú. Editorial Quebecor World Perú. 229 p.
- Labrador García, M; Évora Brondo, JA; Arbelo Pérez, M. 2012. Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio. Canarias, Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias. 57 p.
- Mancilla, GA. 2008. Uso y conservación de suelos: Uso de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE) en el campo forestal. Apuntes Docentes. Universidad de Chile. 64 p. Consultado 10 set. 2018. Disponible en [http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120400/Apuntes\\_docentes\\_USLE.pdf?sequence=1](http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/120400/Apuntes_docentes_USLE.pdf?sequence=1).
- Manrique, ED; Gonzales, G; Mayna, GG; Trebejo, JO; Manrique, SL. 2018. Informe Final: Disponibilidad Hídrica en la Naciente de la Cuenca Huarmey y Efectos del Cambio Climático. Recuay, Perú. 24 p.
- Martínez, 2007. Gestión de Riesgos: Inundaciones Urbanas en El Salvador. San Carlos, Brasil. 12 p.
- Martínez, A. y Takahashi, K. 2017. ¿El Niño Costero o Fenómeno el Niño? (en línea). Revista Moneda 170: Importancia de la tasa de interés de referencia del BCRP. (170):34-37. Consultado 10 set. 2018. Disponible en <http://www.bcrp.gov.pe/docs/Publicaciones/Revista-Moneda/moneda-170/moneda-170-07.pdf>.
- MINEDU (Ministerio de Educación, Perú). s.f. Descarga de información espacial del MED (en línea, sitio web). Consultado 15 set. 2018. Disponible en <http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/#>.

- Montalvo, 2015. Principales aplicaciones del Sistema de Información Geográfica SIG. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 15 p.
- Montes-León, MAL; Uribe-Alcántara, EM; García-Celis, E. 2011. Mapa Nacional de Erosión Potencial. Tecnología y Ciencias del Agua 2(1): 5-17.
- Morante Vargas, S; Gonzales Carrasco, DR. 2019. Elaboración de Mapas de Erosión en la Cuenca del Río Perené. Tesis Ing. Civ. Lima, Perú, UPC. 100 p.
- Moreno, A.; Cañada, R.; Cervera, B.; Fernández, F.; Gómez, N.; Martínez, P.; Prieto, ME.; Rodríguez, JA. y Vidal, MJ. 2008. Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS. Segunda edición. México. Alfaomega Grupo Editor. 911 p.
- Piazzese, J. y Oñate, E. 2004. Metodología para la obtención de información geográfica, geofísica y geo-ambiental desde imágenes satelitales (en línea). Research Reports of the International Centre for Numerical Methods in Engineering (PI244). Consultado 16 feb. 2019. Disponible en [https://www.scipedia.com/public/Piazzese\\_Oñate\\_2003a](https://www.scipedia.com/public/Piazzese_Oñate_2003a).
- Ramos Taipe, CL. 2001. Modelamiento Ambiental para Análisis de Susceptibilidad Erosiva en la Cuenca Media y Alta del Río Cañete y Determinación del Mapa de Erosión: Sistema de Información Geográfica (en línea). Perú, UNALM. 26 p. Consultado 21 feb. 2019. Disponible en <https://tarwi.lamolina.edu.pe/~cramost/MODELO%20DE%20EROSION%20HIDRICA%20-%20SIG.pdf>.
- Roberto, Z; Farrell, M; Carreño, L; Adema, E; Alvarez, C; Aumassanne, C. Avendaño, WS; Babinec FJ; Bargiano, P; Beget, ME; Bellini, Y; Belmonte, ML; Butti, L; Corro Molas, A; Cravero, W; Di Bella, C; Fontanella, D; Frank, E; Ghironi, E; Kovac, F; Lambert, MJ; Llorens, E; Mariano, R; Martínez Uncal, MC; Martínez, D; Masseroni, ML; Mendoza, M; Mieza, S; Montoya, J; Oricchio, P; Pérez, MM; Poey, S; Porfiri, C; Sartor, P; Stefanazzi, I; Vazquez, P; Viglizzo, E; Walas, C; Zamora, D. 2018.

- Potencialidades de las nuevas tecnologías en el agro pampeano. Roberto, Z; Farrell, M; Carreño, L (comps.). Anguil, Buenos Aires, Argentina, Ediciones INTA- 174 p.
- Rodríguez, J; Salo, J; Fachín, L y Encarnación, F. 2007. Manual para la Zonificación Ecológica y Económica a nivel macro y meso. Ed. IIAP. Iquitos, PE. 93 p.
  - Sarría, FA. 2003. Teledetección (en línea, curso). Murcia, España. Consultado 13 feb. 2019. Disponible en <https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema03.pdf>.
  - Schomwandt, D. 2015. Teledetección aplicada a las ciencias agronómicas y recursos naturales. Esnoz, M (ed.). Buenos Aires, Argentina, SIIA. 60 p.
  - Şen, Z. 2008. Flood Modeling, Prediction and Mitigation. Cham, CH, Springer Nature. 124 – 125 p.
  - Sharpley, AN; Williams, JR. 1990. EPIC--Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation (en línea). U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin (1768): 1-235. Consultado 13 feb. 2019. Disponible en <http://epicapex.tamu.edu/files/2015/05/EpicModelDocumentation.pdf>.
  - SINAGERD (Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, Perú)/PCM (Presidencia del Consejo de Ministros, Perú)/SGRD (Secretaría de Gestión del Riesgo de Desastres, Perú)/CENEPRED (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, Perú)/INDECI (Instituto Nacional de Defensa Civil, Perú). 2014. Plan nacional de gestión del riesgo de desastres. PLANAGERD 2014-2021 (en línea). Lima, Perú. 62 p.
  - STEP (Science Toolbox Exploitation Platform). s.f. Toolboxes: SNAP (en línea, sitio web). Consultado 20 set. 2018. Disponible en <http://step.esa.int/main/>.
  - Tayupanta, JR. 1993. La erosión hídrica: proceso, factores y formas. Quito, EC, Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. 12 p. (Boletín divulgativo no. 229).

- Telkar, SG. y Pote, NS. 2014. Soil Erosion: Types and Their Mechanism (en línea). India, Biomolecule Reports. 7 p. Consultado 10 oct 2019. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/325300770\\_Soil\\_Erosion\\_Types\\_and\\_Their\\_Mechanism](https://www.researchgate.net/publication/325300770_Soil_Erosion_Types_and_Their_Mechanism).
- Trodd, N. 2005. Cartographic Modelling. 17 p. Consultado 10 feb. 2019. Disponible en [http://geo.exa.unrc.edu.ar/Posgrado/ARCHIVOS%20UTILES/trodd\\_cartographic\\_modelling.pdf](http://geo.exa.unrc.edu.ar/Posgrado/ARCHIVOS%20UTILES/trodd_cartographic_modelling.pdf).
- UCAR (University Corporation for Atmospheric Research, EE.UU.); Programa COMET/ NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, EE.UU.)/WMO (World Meteorological Organization); Programa de Cooperación Voluntaria del Gobierno de los EE.UU. 2010. Chapter 2: Flash Flood Science. *In* Flash Flood Early Warning System Reference Guide. Estados Unidos. P. 2.1-2.8.
- UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México). 2016. Espectro electromagnético (en línea, sitio web). Consultado 16 feb. 2019. Disponible en [http://uapas1.bunam.unam.mx/ciencias/efecto\\_doppler/](http://uapas1.bunam.unam.mx/ciencias/efecto_doppler/).
- Urbina, L. 2017. Huarmey, la ciudad que quedó bajo el agua tras El Niño costero (en línea). El Comercio, Ancash, Perú; 31 dic. Consultado 30 mar. 2018. Disponible en <https://elcomercio.pe/peru/ancash/huarmey-ciudad-queda-agua-nino-costero-noticia-485418?foto=24>.
- Wahid, A.; Madden, M; Khalaf, F. y Fathy, I. 2016. Análisis Geoespacial para Determinar las Características Hidromorfológicas y Evaluar las Inundaciones Potenciales en Llanuras Costeras Áridas: Caso de Estudio en el Suroccidente de Sinaí, Egipto. Bogotá, Colombia, Earth Sciences Research Journal 20(1): E1-E9. Consultado 15 oct. 2017. Disponible en <http://dx.doi.org/10.15446/esrj.v20n1.49624>.
- Yaguache Ordoñez, LA; Rodrigues, VA; Blanco Jorge, LA; Hurtado Pidal, JR. 2016. Análisis de la erosión laminar en cuatro tipos de cobertura vegetal, con ayuda de la RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) en la microcuenca del río Pimenta (en

línea). Revista Geoespacial 13:30-39. Consultado 16 feb. 2019. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/321016533\\_ANALISIS\\_DE\\_LA\\_EROSION\\_LAMINAR\\_EN\\_CUATRO\\_TIPOS\\_DE\\_COBERTURA\\_VEGETAL\\_CON\\_AYUDA\\_DE\\_LA\\_RUSLE\\_REVISIED\\_UNIVERSAL\\_SOIL\\_LOSS\\_EQUATION\\_EN\\_LA\\_MI\\_CROCUCENCA\\_DEL\\_RIO\\_PIMENTA](https://www.researchgate.net/publication/321016533_ANALISIS_DE_LA_EROSION_LAMINAR_EN_CUATRO_TIPOS_DE_COBERTURA_VEGETAL_CON_AYUDA_DE_LA_RUSLE_REVISIED_UNIVERSAL_SOIL_LOSS_EQUATION_EN_LA_MI_CROCUCENCA_DEL_RIO_PIMENTA).

- Zavala, B; Valderrama, P; Pari, W; Luque, G; Barrantes, R. 2009. Riesgos Geológicos en la Región Áncash. Lima, Perú, INGEMMET. Boletín Geodinámica e Ingeniería Geológica (Serie C) (38):1-280.
- Zeiler, M. 1999. Modeling our world: The ESRI Guide to Geodatabase Design. Estados Unidos. 202 p. Consultado 16 feb. 2019. Disponible en [http://geography.unt.edu/~jminhe/Teaching/GIS-Adv/Modeling\\_our\\_World.pdf](http://geography.unt.edu/~jminhe/Teaching/GIS-Adv/Modeling_our_World.pdf).
- Zúñiga Huaco, JE. 2017. Determinación de la Pérdida de Suelos en la Cuenca Aportante del Embalse Aguada Blanca – Arequipa, aplicando USLE y técnicas geoespaciales. Tesis de maestría. Lima, Perú, UNALM. 150 p.

## VIII. ANEXOS

- ANEXO 1

Valores de C correspondiente al tipo de cobertura, según Montes-León et al. 2011

Vegetación y/o uso de suelo	C
Bosque de ayarín	0.01
Bosque de cedro	0.01
Bosque de encino	0.10
Bosque de encino-pino	0.01
Bosque de galería	0.10
Bosque de oyamel	0.01
Bosque de pino	0.01
Bosque de pino-encino	0.01
Bosque de tascate	0.01
Bosque de mesófilo de montaña	0.01
Chaparral	0.65
Manglar	0.10
Matorral crasicaule	0.65
Matorral de coníferas	0.20
Matorral desértico microfilo	0.25
Matorral desértico roetofilo	0.25
Matorral espinoso tamaulipeco	0.45
Matorral rosetofilo costero	0.25
Matorral sarcocaule	0.25
Matorral sarco-crasicaule	0.25
Matorral sarco-crasicaule de neblina	0.25
Matorral submontano	0.35
Matorral subtropical	0.12
Mezquital	0.65
Palmar inducido	0.75
Palmar natural	0.75

Vegetación y/o uso de suelo	C
Pastizal gipsofilo	0.25
Pastizal halofilo	0.25
Pastizal inducido	0.02
Pastizal natural	0.07
Popal	0.85
Pradera de alta montaña	0.05
Sabana	0.54
Sabanoide	0.54
Selva alta perennifolia	0.45
Selva alta subperennifolia	0.45
Selva baja caducifolia	0.50
Selva baja espinosa caducifolia	0.50
Selva baja espinosa subperennifolia	0.50
Selva mediana caducifolia	0.45
Selva mediana perennifolia	0.45
Selva mediana subcaducifolia	0.45
Tular	0.10
Vegetación de desiertos arenosos	0.85
Vegetación de dunas costeras	0.85
Vegetación de galería	0.85
Vegetación halófila	0.85
Zona urbana	0.005
Cuerpos de agua	1.0
Agricultura en riego	0.55
Agricultura de temporal	0.75
Agricultura de humedad	0.25

- **ANEXO 2**

Valores de C correspondiente al tipo de cobertura vegetal, según Wischmeier, citado por Ramos Taipe 2001

Cultivo y practica	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1.0
Bosque o matorral denso (alto mulch)	0.001
Pradera herbacea en buenas condiciones	0.01
Pradera sobrepastoreada	0.1
Maiz, sorgo, alto rendto., laboreo convencional	0.20 – 0.55
Maiz, sorgo, alto rendto., sin laboreo convencional	0.50 – 0.90
Maiz, sorgo, bajo rendto., laboreo minimo	0.02 – 0.10
Maiz, sorgo, alto rendto., laboreo con chisel	0.12 – 0.20
Maiz, sorgo, bajo rendto., laboreo con chisel	0.30 – 0.45
Algodón	0.40 – 0.70
Pradera herbacea	0.01 – 0.025
Soya	0.20 – 0.50
Trigo	0.10 – 0.40
Arroz	0.10 – 0.20
Cacahuate	0.30 – 0.80
Frutales con cobertura vegetal	0.01 – 0.8
Caña de azucar	0.56
Arbolado denso	0,001-0,003
Arbolado forestal clareado	0,003-0,009
Arbolado muy clareado (25-60%)	0,041
Matorral con buena cobertura	0,003-0,013
Matorral ralo y eriales	0,20-0,013
Cultivos anuales y herbáceos	0,25
Pasturas	0,15
Plantas herbáceas y matorjos (100%)	0,003
Plantas herbáceas y matorjos (60%)	0,035
Cubierta escasa (60%)	0,15-0,09
Cubierta inapreciable	0,45

- **ANEXO 3**

Valores de P correspondiente al tipo de prácticas de conservación, según Taipe 2001

PRACTICA DE CONSERVACION	Factor P
Cultivo a nivel s = 0 – 1°	0.60
Cultivo a nivel s = 2 – 5°	0.50
Cultivo a nivel s = 6 – 7°	0.60
Cultivo a nivel s = 8 – 9°	0.70
Cultivo a nivel s = 10 – 11°	0.80
Cultivo a nivel s = 12 – 14°	0.90
Bancales a nivel	0.14
Bancales a contra pendiente	0.05
Bancales con pend. Siguiendo la pend.	0.35
Bancales a nivel con referencia de agua	0.01
Caballones enlazados	0.10 – 0.20

- **ANEXO 4**

Descarga del programa SNAP (Fuente: Tomado de STEP s.f.)

Home > Download > SNAP Download

---

## SNAP Download

---

Here you can download the latest installers for SNAP and the Sentinel Toolboxes.

Data provision is available to all users via the [Sentinel Data Hub](#).

### Current Version

The current version is **7.0.0** (22.07.2019 13:30 UTC).

For detailed information about changes made for this release please have a look at the release notes of the different projects: [SNAP](#), [S1TBX](#), [S2TBX](#), [S3TBX](#), [SMOS Box](#), [PROBA-V Toolbox](#)

We offer three different installers for your convenience. Choose the one from the following table which suits your needs. During the installation process, each toolbox can be excluded from the installation. Toolboxes which are not initially installed via the installer can be later downloaded and installed using the plugin manager. Please note that SNAP and the individual Sentinel Toolboxes also support numerous sensors other than Sentinel.

	Windows 64-Bit	Windows 32-Bit	Mac OS X	Unix 64-bit
Sentinel Toolboxes	These installers contain the <b>Sentinel-1</b> , <b>Sentinel-2</b> , <b>Sentinel-3</b> Toolboxes			
	<a href="#">Download</a>	<a href="#">Download</a>	<a href="#">Download</a>	<a href="#">Download</a>

- **ANEXO 5**

Descarga de la herramienta Sen2Cor (Fuente: Tomado de STEP s.f.)

For any questions about the usage of Sen2Cor, please follow the general STEP forum area dedicated to Sen2Cor: <http://forum.step.esa.int/c/s2tbx/sen2cor>.

Latest release:

- 2.5.5 – It was released on March 23, 2018. This version runs on the operating systems: Linux, Mac OSX and Windows (64 bit is mandatory). For details about the features and fixes, see the release note.
  - Standalone installers:
    - Windows installer: [Sen2Cor-02.05.05-win64.zip](#)
    - Linux installer: [Sen2Cor-02.05.05-Linux64.run](#)
    - Mac installer: [Sen2Cor-02.05.05-Darwin64.run](#)

Detailed information on all changes implemented in the new format of Sentinel-2 L2A product is available in the dedicated documentation online: [Sentinel-2 Products Specification Document \(PSD\)](#)

Release Note: [S2-PDGS-MPC-L2A-SRN-V2.5.5.pdf](#)  
 Software User Manual: [S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.5.5\\_V2.pdf](#)  
 Sentinel-2 Level 2A Product Definition: [S2-PDGS-MPC-L2A-PDD-V2.5.5.pdf](#)  
 Sentinel-2 Level 2A Input Output Data Definition: [S2-PDGS-MPC-L2A-IODD-V2.5.5.pdf](#)



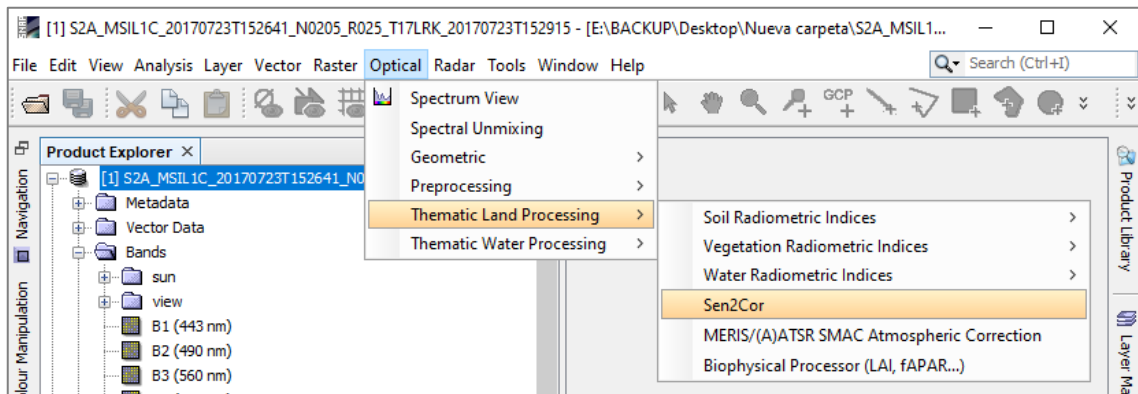
- **ANEXO 6**

Archivos descargados por cada imagen satelital

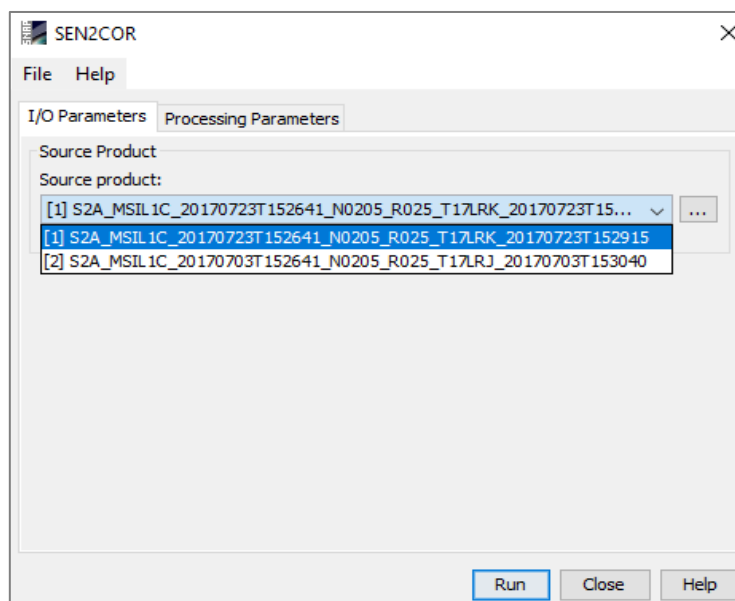
AUX_DATA	4/07/2017 06:54	Carpeta de archivos	
DATASTRIP	10/09/2018 17:35	Carpeta de archivos	
GRANULE	10/09/2018 17:35	Carpeta de archivos	
HTML	10/09/2018 17:35	Carpeta de archivos	
rep_info	10/09/2018 17:35	Carpeta de archivos	
INSPIRE	4/07/2017 06:54	Documento XML	19 KB
manifest.safe	4/07/2017 06:55	Archivo SAFE	52 KB
MTD_MSIL1C	4/07/2017 06:54	Documento XML	44 KB

- **ANEXO 7**

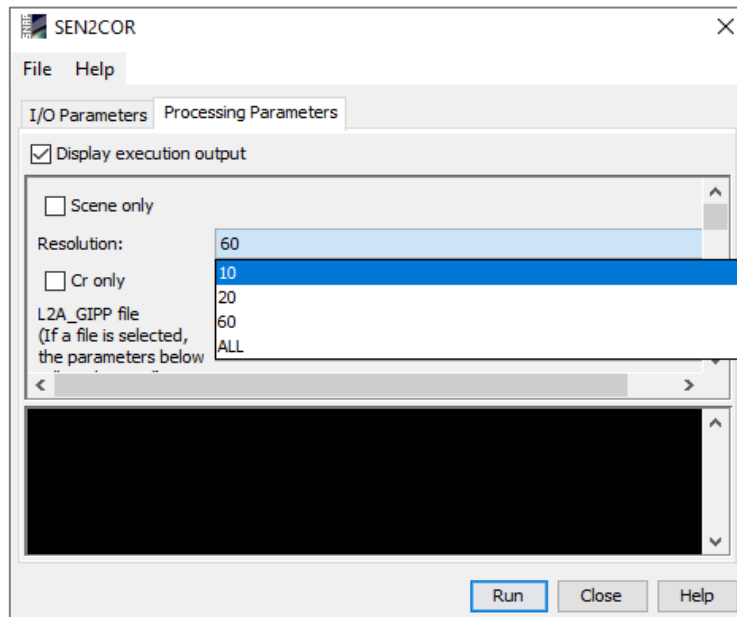
- Ubicación de la herramienta Sen2Cor



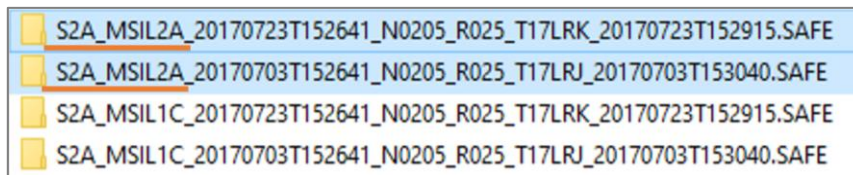
- Selección de archivo



- Selección de la resolución de 10 m.

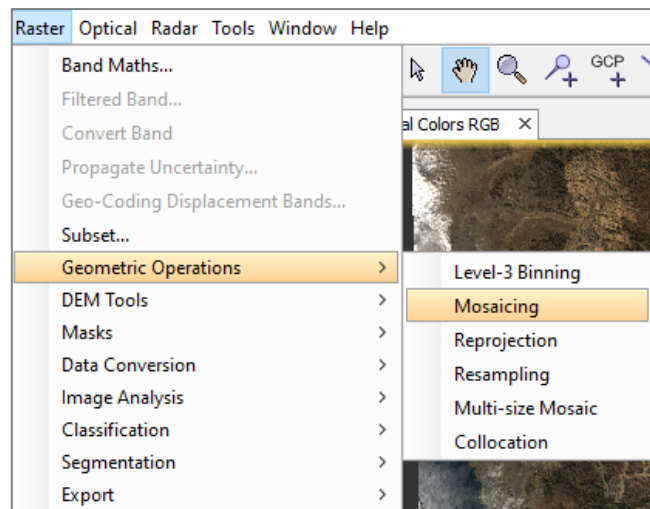


- Archivos resultantes en el Nivel-2a

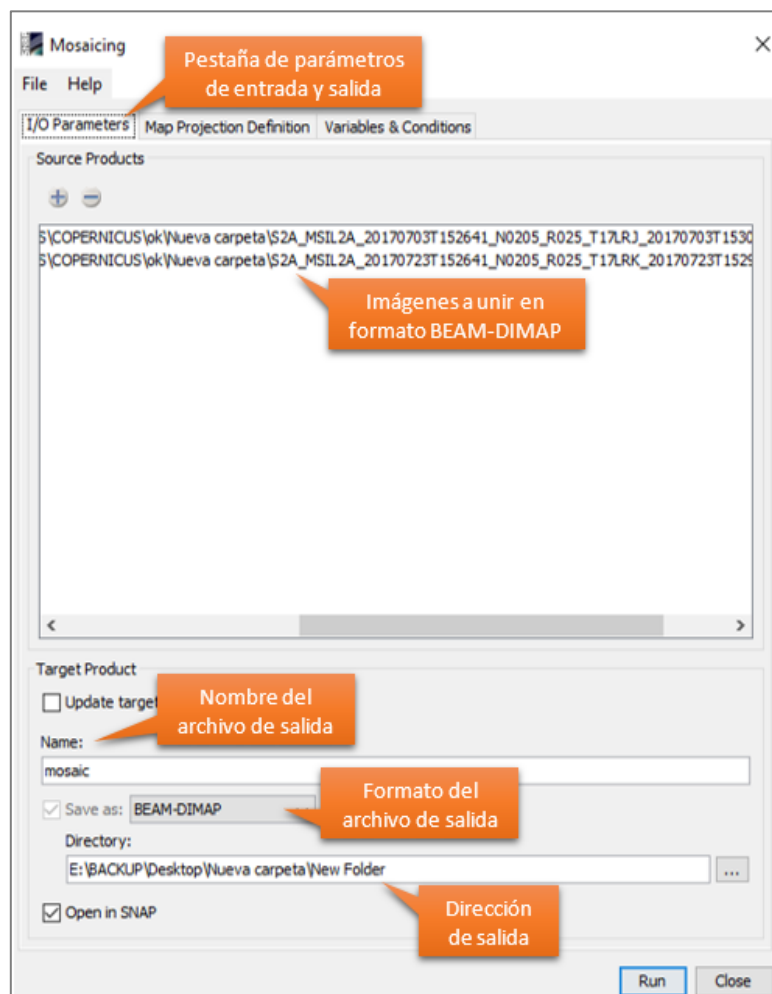


- ANEXO 8

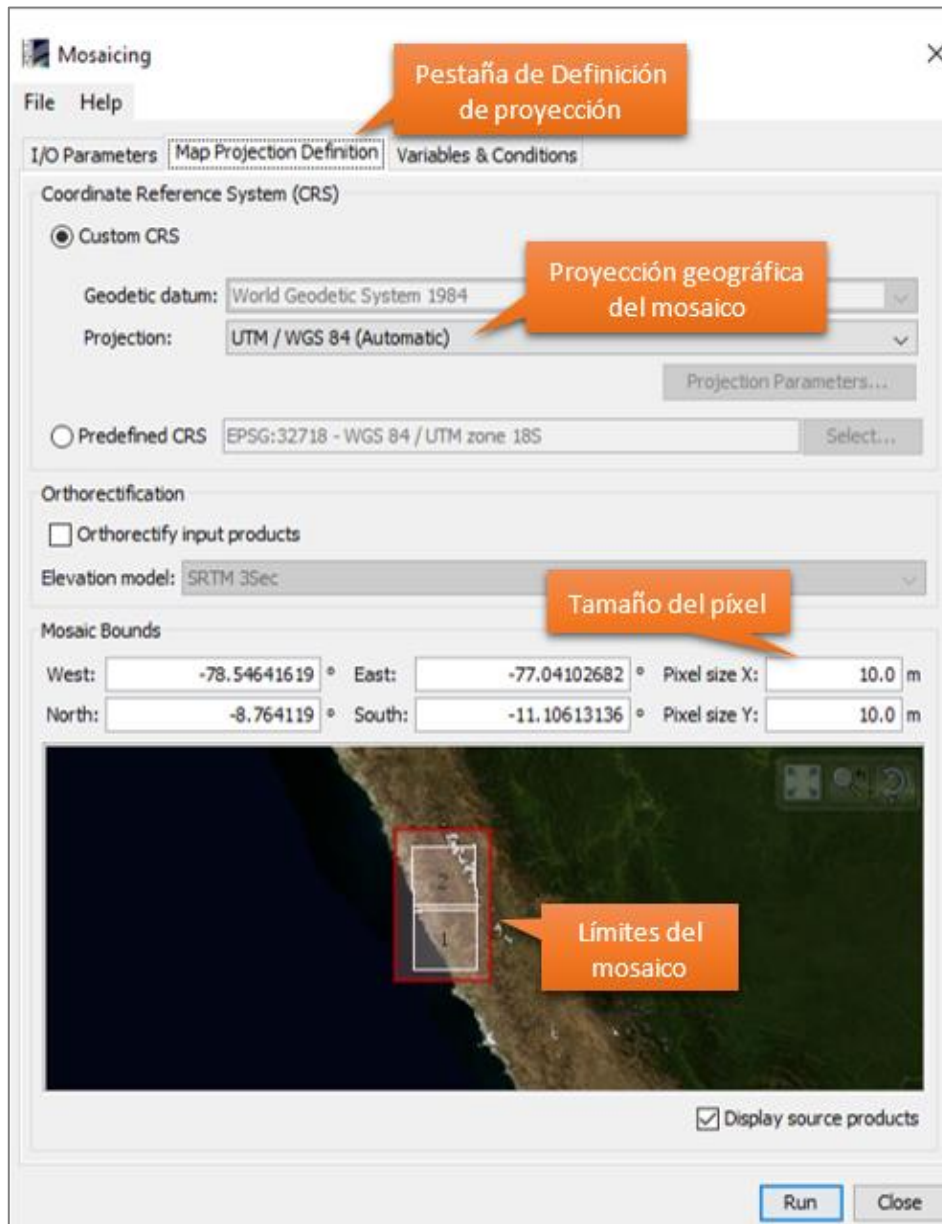
- Selección de *Mosaicing*



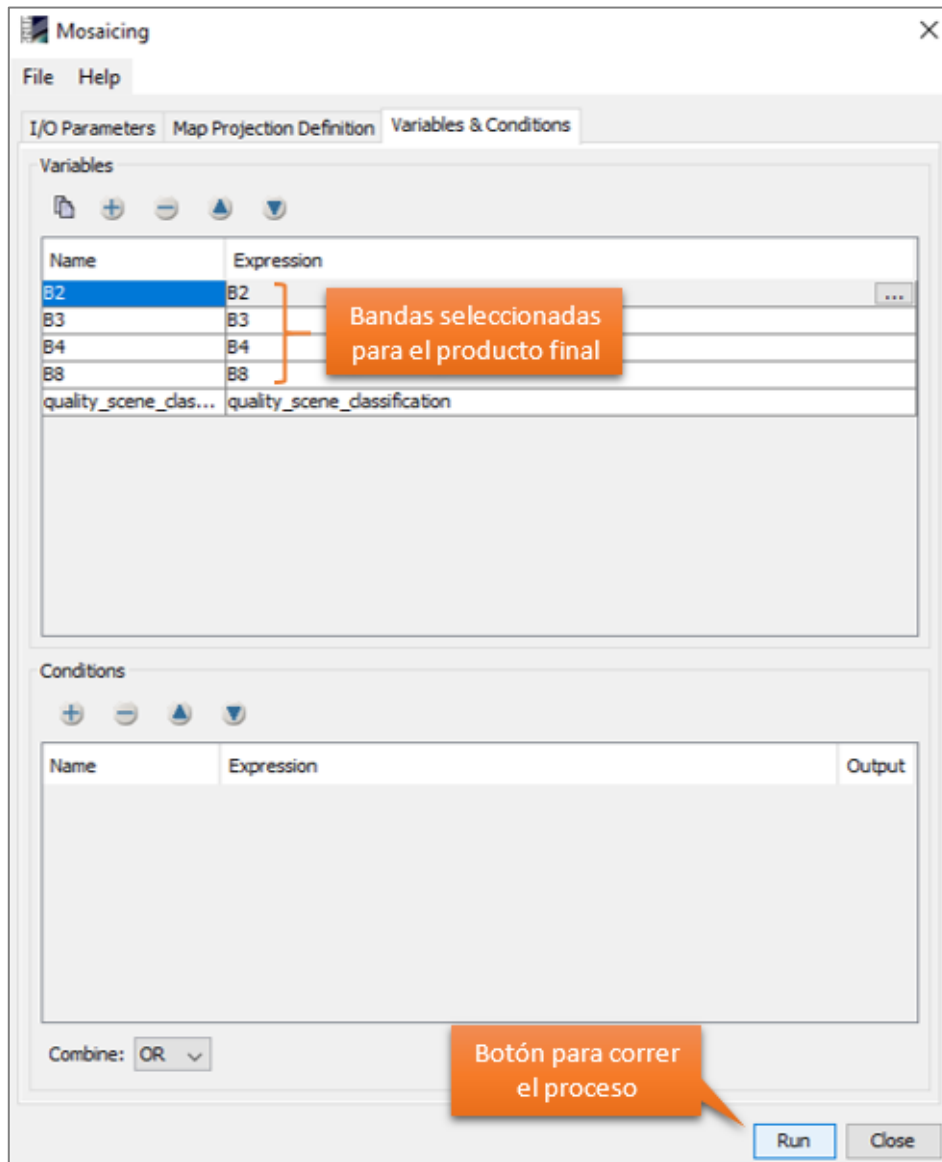
- Ventana de *Mosaicing*



- Pestaña de Proyección Geográfica



- Pestaña de Variables y Condiciones

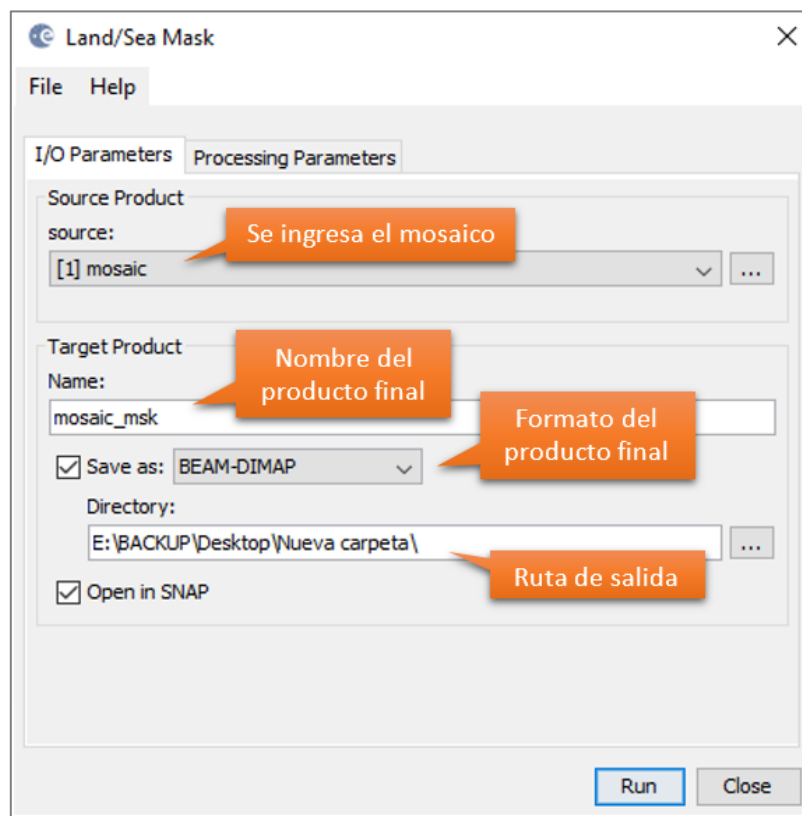


- ANEXO 9

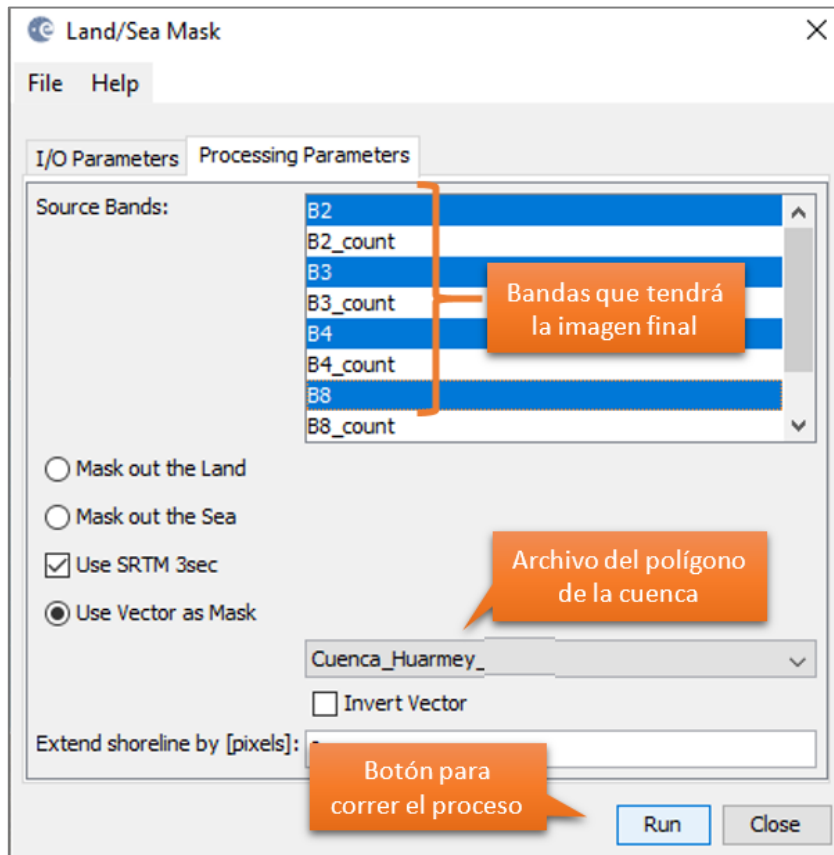
- Máscara de la cuenca Huarmey



- Pestaña de los parámetros de entrada y salida

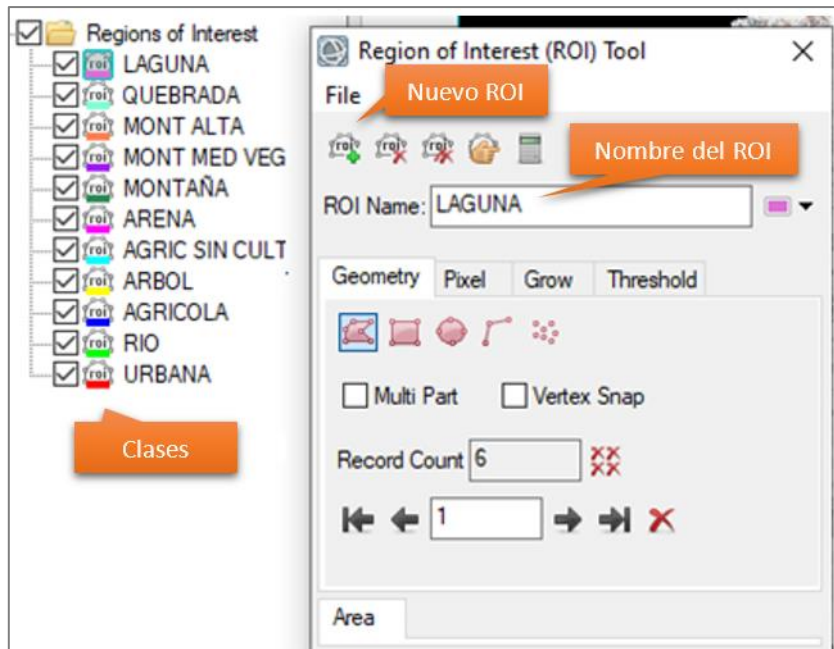


- Pestaña de parámetros del procesamiento

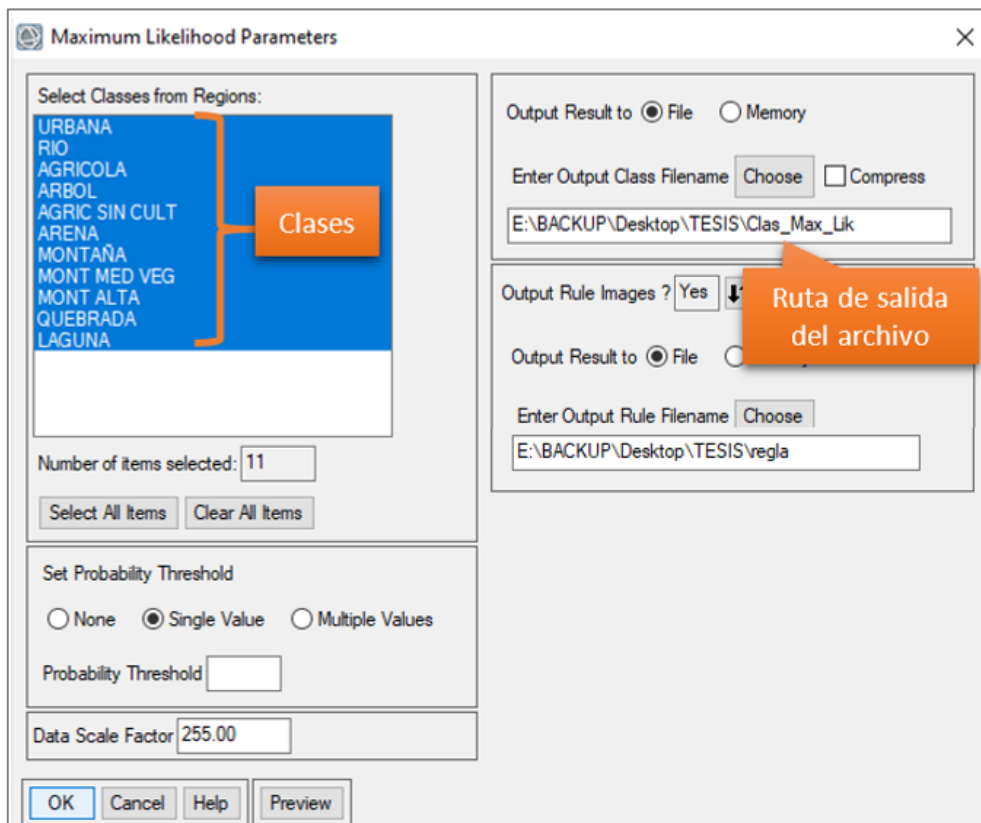


- ANEXO 10

- ROI's de la cuenca Huarney



- Ventana de Parámetros para la Clasificación por Máxima Probabilidad





• ANEXO 11



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
FACULTAD DE AGRONOMIA  
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



## INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : LIZBETH ROCÍO CAYCHO TORRES

PROCEDENCIA : ANCASH/ HUARMHEY/ HUAR

REFERENCIA : H.R. 69152

BOLETA : 3269

FECHA : 18/07/2019

Lab	Número Muestra Claves	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural	M.O. %
2411	Muestra 1, Huiña Huarmey, 0-45 cm.	47	34	19	Fr.	0.54
2412	Muestra 2, Ex Hacienda Huamba Alta-Huarmey, 0-45 cm.	57	26	17	Fr.A.	1.32
2413	Muestra 3, Ex Hacienda Bamba Huarmey U.C.SR AQUINO, 0-45 cm.	41	26	33	Fr.Ar.	0.77
2414	Muestra 4, Sector Maria Cristina Huarmey, 0-45 cm.	93	2	5	A.	0.02
2415	Muestra 5, Quebrada Verna Pucyi, Sector Tayca Huarmey, 0-45 cm.	79	12	9	Fr.A.	0.15
2416	Muestra 6, Sector Taya-Huarmey, 0-45 cm.	93	2	5	A.	0.02
2417	Muestra 7, Congon Huarmey, 0-45 cm.	47	32	21	Fr.	1.12
2418	Muestra 8, El Castillo Huarmey, 0-45 cm.	63	22	15	Fr.A.	0.88
2419	Muestra 9, Pto. Huarmey, 0-45 cm.	57	32	11	Fr.A.	0.10

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Ing. Bruno La Torre Martínez  
Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM  
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622  
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe



## INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : LIZBETH ROCIO CAYCHO TORRES

PROCEDENCIA : ANCASH/ AIJA

REFERENCIA : H.R. 69255

BOLETA : 3304

FECHA : 26/07/2019

Número Muestra		Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural
Lab	Claves				
2694	M-1, Aija - Aija, Prof. 0-45 cm.	66	16	18	Fr.A.
2695	M-2, Succha - Aija, Prof. 0-45 cm.	74	16	10	Fr.A.
2696	M-3, Huacllan - Aija, Prof. 0-45 cm.	74	12	14	Fr.A.
2697	M-4, Huacllan - Aija, Prof. 0-45 cm.	54	16	30	Fr.Ar.A.
2698	M-5, Coris - Aija, Prof. 0-45 cm.	44	28	28	Fr.Ar.

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número Muestra		M.O. %
Lab	Claves	
2694	M-1, Aija - Aija, Prof. 0-45 cm.	4.97
2695	M-2, Succha - Aija, Prof. 0-45 cm.	3.45
2696	M-3, Huacllan - Aija, Prof. 0-45 cm.	2.30
2697	M-4, Huacllan - Aija, Prof. 0-45 cm.	0.58
2698	M-5, Coris - Aija, Prof. 0-45 cm.	1.75

Ing. Bruno La Torre Martínez  
Jefe del Laboratorio