

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“ANÁLISIS DE PÉRDIDA DE SUELOS POR EROSIÓN HÍDRICA
EN LA SUBCUENCA CONDURIRI MEDIANTE LA
METODOLOGÍA RUSLE, 1980 - 2014”**

TESIS

PRESENTADA POR:

ELAR HARRY VALDEZ TUMI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Puno - Perú

2014

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO – PUNO

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**“ANÁLISIS DE PÉRDIDA DE SUELOS POR EROSIÓN HÍDRICA EN LA
SUBCUENCA CONDURIRI MEDIANTE LA METODOLOGÍA RUSLE,
1980 - 2014”**

TESIS PRESENTADA POR:

ELAR HARRY VALDEZ TUMI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE DEL JURADO	:	 M.Sc. Oscar Raúl Mamani Luque
PRIMER MIEMBRO	:	M.Sc. Alberto Isidro Pilares Hualpa
SEGUNDO MIEMBRO	:	 Ing. Edgardo S. Guerra Bueno
DIRECTOR	:	 M.Sc. Roberto Alfaro Alejo
ASESOR	:	 Ing. Bernardo Coloma Paxi

ÁREA : Ingeniería y Tecnología

TEMA: Gestión de riesgos y vulnerabilidad ambiental

LÍNEA: Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente

DEDICATORIA

Doy infinitas gracias a Dios por haberme concedido la vida, haberme guiado por la senda del saber y del bien; por enseñarme el camino correcto de la vida, guiándome y fortaleciéndome cada día más...

Con todo cariño y gratitud eterna a mis queridos padres: Gerardo y Sara. Quienes con su paciencia, sacrificio y desvelos me han guiado por este camino hasta alcanzar los objetivos más altos y hacer de mi un profesional.

A mis queridos hermanos Ronny y Jerson por comprenderme y alentarme para cumplir con mis metas trazadas.

AGRADECIMIENTOS

A nuestra alma mater la universidad nacional del altiplano, en especial a la escuela profesional de ingeniería agrícola, por ser la casa donde me forme y por la labor que cumple en el logro de nuestra formación profesional.

A los docentes de la escuela profesional de ingeniería agrícola, por haberme brindado sus conocimientos y enseñanzas y haber compartido sus experiencias para mi formación profesional en los claustros universitarios.

Al M.Sc. Roberto Alfaro Alejo, por su apoyo como director de tesis, en el presente trabajo de Investigación.

Al Ing. Bernardo Coloma Paxi, por su apoyo como asesor en la ejecución y culminación del presente trabajo de Investigación.

Al Ing. Efraín Turpo Cayo, Especialista en Teledetección y Sistema de Información Geográfica, por su generosidad al compartir su apoyo constante y disposición a escucharme durante el desarrollo de esta tesis.

Para mis queridos familiares y amigos, quienes siempre supieron confiar y brindarme su apoyo incondicional, por creer y confiar siempre en mí, apoyándome en todas las decisiones que he tomado en la vida.

INDICE

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	
DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 Planteamiento del Problema.....	2
1.3 Antecedentes	3
1.4 Justificación.....	6
1.5 Objetivos	7
1.5.1 Objetivo general	7
1.5.2 Objetivos específicos.....	7

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO.....		8
2.1 Cuenca Hidrográfica		8
2.2 Erosión de Suelos		8
2.2.1 Procesos de la Erosión del Suelo.....		9
2.2.2 Mecánica de la Erosión del Suelo		9
2.2.3 Factores que Influyen en la Erosión		10
2.2.4 Erosión Hídrica		11
2.2.4.1 La Erosión Natural.....		11
2.2.4.2 La Erosión Acelerada.....		12
2.2.5 Principales Formas de Erosión Hídrica		12
2.2.5.1 Erosión Laminar		12
2.2.5.2 Erosión en Surcos		12
2.2.5.3 Erosión en Cárcavas.....		13
2.2.5.4 Erosión por Salpicadura.....		13
2.2.6 Daños Directos e Indirectos Causados por Erosión Hídrica		13
2.2.6.1 Daños Directos.....		14
2.2.6.2 Daños Indirectos		14
2.3 Modelización de la Erosión del Suelo, Tipos de Modelos		15
2.4 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE).....		17
2.4.1 Factor R o Índice de Erosividad de la Lluvia.....		22
2.4.1.1 Factor EI30 Método de Wischmeier (1959)		23
2.4.1.2 Morgan (1974).....		23
2.4.1.3 Foster (1981).....		24
2.4.1.4 Roose (1995).....		25
2.4.2 Factor de Erodabilidad del Suelo (K).....		26
2.4.3 Factor LS o Longitud y Gradiente de la Pendiente.		28
2.4.3.1 Método de Mintegui (1983).....		29
2.4.3.2 Metodología de Renard (1997)		29
2.4.4 Factor C o de Cobertura Vegetal.....		30

2.4.5	Factor P o de Prácticas de Conservación de Suelos	31
2.4.6	Perdida de Suelo (A).	33
2.5	Teledetección.	34
2.5.1	Características de los Datos de Teledetección.....	35
2.5.2	Aplicaciones de Teledetección.	35
2.5.3	Componentes de un Sistema de Teledetección.	37
2.5.3.1	Fuente de Energía	37
2.5.3.2	Superficie Terrestre	38
2.5.3.3	Sistema Sensor	38
2.5.3.4	Sistema de Recepción	38
2.5.3.5	Interpretación	38
2.5.4	Fundamento Físicos de la Teledetección.....	39
2.5.4.1	Radiación Electromagnética	39
2.5.4.2	Espectro Electromagnético	39
2.5.5	Bandas Espectrales	40
2.5.5.1	Espectro Visible	41
2.5.5.2	El Infrarrojo	41
2.5.5.3	Infrarrojo Próximo	41
2.5.5.4	Infrarrojo Medio	41
2.5.5.5	Infrarrojo Lejano Térmico	41
2.5.5.6	Microondas	42
2.5.6	Sensores Remotos	42
2.5.6.1	Sensores Pasivos.....	42
2.5.6.2	Sensores Activos.....	42
2.5.7	Resolución del Sensor Remoto.....	42
2.5.7.1	Resolución Espacial.....	43
2.5.7.2	Resolución Espectral.....	43
2.5.7.3	Resolución Radiométrica.....	43
2.5.7.1	Resolución Temporal.....	43
2.5.8	Imagen Satelital.....	43
2.5.9	El Formato Ráster.....	44
2.5.9.1	Elementos que Componen una Capa Ráster	45
2.5.10	Tipos de Imágenes de Teledetección.....	47
2.5.10.1	Imagen Multiespectral (MS).....	47
2.5.10.2	Imagen Pancromática (PAN)	48
2.5.10.3	Imagen Fusionada (PS).....	48
2.5.10.4	Imagen Estéreo	49
2.5.11	Satélites de Teledetección	49
2.5.12	El Satélite Landsat.....	50
2.5.12.1	Bandas de Imágenes del Visible al Infrarrojo Medio	51
2.5.12.2	Combinaciones con las Bandas del Sensor Landsat	53
2.5.12.3	Combinación en Color Natural RGB 432 Bandas 4-3-2	53
2.5.12.4	Combinación en Falso Color RGB	54
2.5.13	Técnicas de Tratamiento Digital de Imagen.....	58
2.5.13.1	Correcciones Radiométricas	58
2.5.13.2	Correcciones Geométrica.....	58
2.5.13.3	Mejoramiento Espectral.....	59

2.5.14	Clasificación Digital de la Imagen	60
2.5.14.1	Fase de Entrenamiento.....	60
2.5.14.2	Fase de Asignación	64
2.6	Sistema de Información Geográfica SIG.....	68
2.6.1	Aplicaciones de los SIG	69
2.6.2	Componentes de un SIG.....	71
2.6.3	Modelo de Datos Espaciales en un SIG	72
2.6.3.1	Modelo Vectorial	72
2.6.3.2	Modelo Raster.....	72
2.6.4	Ventajas y Requerimientos de un SIG	73
2.6.5	Interpolación.....	74
2.6.5.1	Clases de Métodos de Interpolación	74

CAPITULO III

	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	78
3.1	Área de Estudio	78
3.1.1	Subcuenca Conduriri	78
3.2	Materiales y Equipos.....	80
3.2.1	Materiales y Equipo de Campo	80
3.2.2	Materiales y Equipo de Gabinete	80
3.2.3	Información Cartográfica e Imágenes de Satélite	80
3.2.3.1	Cartografía	80
3.2.3.2	Imágenes Landsat 8 OLI/TIRS	81
3.2.3.3	Datos de Elevación Digital ASTER GDEM.....	81
3.2.4	Precipitación.....	82
3.2.5	Suelos	82
3.3	Metodología	83
3.3.1	Fase Preliminar.....	83
3.3.1.1	Recopilación de Información Básica	83
3.3.1.2	Obtención de Área Delimitada de la Subcuenca Conduriri	83
3.3.1.3	Reconocimiento Preliminar de la Zona de Estudio.....	87
3.3.2	Procesamiento de las Variables.....	90
3.3.2.1	Factor "R", Erosividad de las Lluvias	90
3.3.2.2	Factor "LS", Topografía.....	92
3.3.2.3	Factor "C", Cobertura Vegetal	94
3.3.2.4	Factor "K", Erosionabilidad del suelo.....	98
3.3.2.5	Factor "P", Prácticas de Conservación de Suelos	98
3.3.3	Integración de los Factores.....	99

CAPITULO IV

	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	100
4.1	Procesamiento de las Variables	100
4.1.1	Factor "R", Erosividad de las Lluvias	100
4.1.2	Factor "LS", Longitud y Gradiente de Pendiente	103
4.1.3	Factor "C", Cobertura Vegetal	109

4.1.3.1	Composición de Bandas.....	109
4.1.3.2	Mosaico de Imágenes.....	109
4.1.3.3	Corrección Geométrica	110
4.1.3.4	Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI).....	110
4.1.3.5	Mejoras y Realces	110
4.1.3.6	Clasificación no Supervisada.....	112
4.1.3.7	Clasificación Supervisada.....	115
4.1.4	Factor "K", Erosionabilidad del suelo	117
4.2	Erosión Hídrica Actual en la Subcuenca Conduriri	120
CAPITULO V		
	CONCLUSIONES	123
CAPITULO VI		
	RECOMENDACIONES	124
CAPITULO VII		
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
CAPITULO VIII		
	ANEXOS	133

ÍNDICE DE CUADROS

	Pag.
Cuadro 1. Clasificación de los métodos según los datos que utiliza y la forma de generarlos.....	15
Cuadro 2. Clasificación de los modelos según el tipo de información que se obtiene.	16
Cuadro 3. Dimensiones y unidades de los factores del modelo RUSLE	20
Cuadro 4. Clasificación de IFM para Latinoamérica.....	26
Cuadro 5. Valores del factor LS en función de la pendiente	29
Cuadro 6. Valores de "C" según el uso de la tierra.....	31
Cuadro 7. Valores de "P" para cultivos en contorno y su máxima longitud permitida entre obras	32
Cuadro 8. Valores de "P" para curvas de nivel.....	32
Cuadro 9. Valores de P para barreras con la distancia máxima entre obras	33
Cuadro 10. Niveles de intensidad de pérdida de suelo	33
Cuadro 11. Clasificación de los niveles de intensidad de pérdida de suelo	34
Cuadro 12. Características de la región espectral	40
Cuadro 13. Características de los principales satélites utilizados en teledetección	50
Cuadro 14. Características de las imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS	51
Cuadro 16. Cartas nacionales (IGN).....	81
Cuadro 17. Imágenes de satélite Landsat 8 OLI/TIRS	81
Cuadro 18. Modelo de elevación digital.....	82
Cuadro 19. Estaciones meteorológicas.....	82
Cuadro 20. Tipos de cubierta vegetal (clasificación no supervisada).....	112
Cuadro 21. Superficie ocupada por los tipos de cubierta vegetal	115
Cuadro 22. Valores del factor C	115
Cuadro 23. Características de las unidades de suelo en la subcuenca Conduriri	117
Cuadro 24. Superficie con grados de erosión de la subcuenca Conduriri.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Procesos de erosión.....	9
Figura 2. Desprendimiento y arrastre de partículas.....	10
Figura 3. Factores que afectan la susceptibilidad a la erosión	11
Figura 4. Componentes de un sistema de teledetección	38
Figura 5. Espectro electromagnético.....	40
Figura 6. Modelos digitales. Codificación de una variable cuantitativa en formato ráster	46
Figura 7. Modelos digitales. Codificación de una variable cualitativa en formato ráster	47
Figura 8. Banda azul (TM 2).....	51
Figura 9. Banda verde (TM 3).....	52
Figura 10. Banda Rojo (TM 4).....	52
Figura 11. Infrarrojo Cercano (TM 5).....	52
Figura 12. Infrarrojo térmico (TM 10).....	52

Figura 13. Banda Pancromática	53
Figura 14. Colores básicos para la combinación.....	53
Figura 15. Combinación en color natural 4 - 3 - 2	54
Figura 16. Combinación 5 - 4 - 3 (RGB)	55
Figura 17. Combinación 8 - 5 - 2 (RGB)	56
Figura 18. Combinación 8 - 5 - 3 (RGB)	56
Figura 19. Combinación 5 - 4 - 3 (RGB)	57
Figura 20. Combinación 8 - 4 - 2 (RGB)	57
Figura 21. Clasificador de paralelepípedos	65
Figura 22. Extensión a dos bandas del algoritmo de máxima probabilidad.....	67
Figura 23. Ejemplo de SIG.....	69
Figura 24. Modelo de datos ráster y vectorial.....	73
Figura 25. Modelo IDW de interpolación	75
Figura 26. Modelo splines de interpolación	75
Figura 27. Modelo kriging de interpolación.....	76
Figura 28. Modelo TIN de interpolación	77
Figura 29. Ubicación del área de estudio	79
Figura 30. Diagrama de la metodología desarrollada	84
Figura 31. Modelo espacial para delimitación de cuenca	88
Figura 32. Delimitación de la cuenca llave a partir de un DEM.....	89
Figura 33. Flujograma para la obtención del mapa de erosividad de la lluvia.....	91
Figura 34. Proceso para la obtención de DEM.....	92
Figura 35. Flujograma para la obtención del mapa de LS.	94
Figura 36. Flujograma para la obtención del mapa del factor C	96
Figura 37. Modelo para la evaluación de la erosión hídrica	99
Figura 38. Modelo espacial para obtener el mapa del factor de erosividad	101
Figura 39. Distribución espacial de la erosividad de las lluvias (factor - R)	102
Figura 40. Modelo espacial para obtener el mapa de factor de erosividad	104
Figura 41. Mapa de pendientes en grados de la subcuenca Conduriri.	105
Figura 42. Mapa del factor de longitud de pendiente (L) de la subcuenca Conduriri.....	106
Figura 43. Mapa del factor de gradiente de la pendiente (S) de la subcuenca Conduriri.....	107
Figura 44. Distribución espacial del factor - LS	108
Figura 45. Representación de las bandas espectrales	109
Figura 46. Mosaico de las escenas Landsat 002-071 y 002-072	109
Figura 47. Índice de Vegetación Normalizada (NDVI)	111
Figura 48. Resultados de la clasificación no supervisada	113
Figura 49. Modelo espacial para obtener el mapa de factor de cobertura vegetal	114
Figura 50. Mapa de cobertura vegetal - C (clasificación supervisada) en formato ráster	116
Figura 51. Serie de suelos registrados de la subcuenca Conduriri	118
Figura 52. Susceptibilidad de los suelos (factor K)	119
Figura 53. Distribución en porcentajes de los niveles de erosión	120
Figura 54. Mapa de la erosión actual en la subcuenca Conduriri	122

RESUMEN

La vertiente hidrográfica del lago Titicaca (lado Peruano), de la cual forma parte la subcuenca Conduriri, se encuentra afectado por avanzados procesos de degradación de suelos, entre los cuales la erosión hídrica constituye uno de los más importantes y el más predominante. El suelo es uno de los recursos más importantes y más amenazados, por lo que la estimación del riesgo de erosión hídrica es primordial para promover estrategias de conservación. El presente trabajo de investigación referido al “Análisis de pérdida de suelos por erosión hídrica en la subcuenca Conduriri mediante la metodología RUSLE, período 1980 - 2014”, se realizó en la subcuenca Conduriri, hidrográficamente ubicado en la vertiente del lago Titicaca, el objetivo del estudio fue estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica, mediante simulación y experimental, con la finalidad de comparar y obtener un instrumento de gestión para la planificación y conservación de cuencas. Para la determinación de la erosión hídrica, se usó el modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), de este modelo se trataron los factores climáticos, textura de suelo, topografía y cobertura vegetal. Los resultados alcanzados permiten obtener una visión general de manera cualitativa y cuantitativa de la variación espacial de los sectores más susceptibles a la erosión hídrica en la subcuenca Conduriri, constituyéndose en un instrumento de gestión fundamental a partir del cual se podrá realizar la planificación y conservación de la subcuenca en materia del recurso suelo. Los valores obtenidos a través de la metodología RUSLE, muestran que la subcuenca Conduriri posee, en un 4.4% de su superficie un riesgo de degradación por erosión hídrica crítica, degradación muy alta cubren un 4.6% de la subcuenca, los riesgos de degradación alta ocupan un 3%, degradación media un 9.9%, los riesgos de erosión moderada ocupan el 28.6% y erosión baja con un 49.5%. Así se puede concluir que la información genérica de tipos de suelo, pueden ser útiles para la realización de circulaciones de erosión, en situaciones de diagnóstico previo.

Palabras claves: análisis, erosión hídrica, sedimentación, producción de sedimentos.

ABSTRACT

The hydrographic side of Lake Titicaca (Peruvian side), which is part the subbasin Conduriri, is affected by advanced processes of soil degradation, among which the water erosion is one of the most important and most predominant. The soil is one of the most important resources and more threatened, so the estimate of the risk of water erosion is paramount to promote conservation strategies. This research work referred to the "Analysis of loss of soil by water erosion in the subbasin Conduriri methodology using the RUSLE, period 1980 - 2014 ", was held in the subbasin Conduriri, in hydrographical terms located on the slope of the lake Titicaca, the objective of this study was to estimate the loss of soil by water erosion, through simulation and experimental, with the purpose of comparing and obtain a management tool for planning and watershed conservation. For the determination of water erosion, we used the model of the Universal Soil Loss Equation Revised (RUSLE), of this model were discussed climatic factors, soil texture, topography and vegetation cover. The results allowed to obtain an overview of qualitative and quantitative manner of the spatial variation of the sectors most susceptible to water erosion in the subbasin Conduriri, becoming a key management tool from which to perform the planning and conservation of the subbasin in the field of soil as a resource. The values obtained through the methodology RUSLE, show that the subbasin Conduriri possesses a 4.4% of its surface a risk of degradation by water erosion critical, very high degradation cover a 4.6% of the subbasin, the risks of degradation occupy a high 3%, degradation average a 9.9%, the risks of moderate erosion occupy 28.6% and erosion with a low 49.5%. As well it can be concluded that the generic information of soil types, can be useful for the realization of circulations of erosion, in situations of prior diagnostic.

Key Words: analysis, water erosion, sedimentation, sediment yield.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo es un problema ambiental muy serio que está afectando a la mayoría de los países de América Latina. Las causas del problema de la erosión son conocidas, una de las principales es la pobreza. Cuando los pobres provocan la erosión lo hacen porque no tienen más alternativas para sobrevivir. La erosión del suelo está estrechamente vinculada con los problemas del desarrollo rural. Sin embargo, sin suelo, el desarrollo rural es imposible, (FAO y PNUMA, 1980).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), actualmente la erosión del suelo afecta a un 20% de las tierras agrícolas, un 15% de los pastizales y un 30% de los bosques del mundo. La organización señala que este desgaste se encuentra en su punto más grave desde hace 20 años. De acuerdo a un reciente estudio de la FAO y sus aliados, a mediados de la primera década del siglo XXI la degradación del suelo afecta a más de 1500 millones de personas.

En este contexto, la degradación de los suelos en esta parte de la región de Puno, unida a la pobreza de los productores rurales que las habitan, constituyen uno de los problemas socio-ambientales más serios del país.

Actualmente, la subcuenca de Conduriri es una de las que presenta una situación crítica de la región de Puno, donde los procesos de desertificación y erosión, pese a las múltiples medidas aplicadas en la región, siguen su avance. Las causas que originan esta situación, se enmarcan dentro de distintas problemáticas que afectan a la región, como la fragilidad ambiental, los recursos escasos, la pobreza y el mal manejo del suelo.

En este ámbito, la falta de información sobre el tema de la erosión en Puno es un problema evidente. El planteamiento de instaurar recursos dirigidos hacia la

cuantificación del grado de erosión, es una necesidad creciente cuyo propósito es facilitar la toma de decisiones, lograr un manejo sustentable del recurso suelo y el aumento en la calidad de vida de la población rural, que basa su economía en este recurso.

1.2 Planteamiento Del Problema

El Centro Internacional de Referencia e Información en Suelo (ISRIC) y el Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas (UNEP), manifiestan que a nivel mundial los suelos se encuentran en grave estado de degradación, siendo la erosión del suelo como el proceso que afecta al mayor número de hectáreas, representando más del 80% de toda la degradación. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), citado por Kappelle (2009), indica que la erosión del suelo se encuentra en su punto más grave desde hace 20 años y de acuerdo a un reciente estudio a mediados de la primera década del siglo XXI la degradación del suelo afecta a más de 1500 millones de personas.

En el Perú, la erosión del suelo es uno de los problemas más serios de deterioro del medio ambiente, que afecta a gran parte del territorio nacional en diferentes grados de severidad, causados principalmente por factores naturales y humanos, trayendo como consecuencia reducción en la fertilidad de los suelos (perdidas en la productividad agrícola) y contaminación de masas de agua por sedimentos, (INTECSA 1993).

Según INTECSA - AIC PROGETTI – CNR, en el año de 1993, en la vertiente hidrográfica del lago Titicaca (lado peruano), indica que la erosión del suelo es uno de los problemas ambientales más graves, y de más difícil solución que está afectando los suelos en una extensión de 33433 km², de los cuales 5303 km² presenta problemas de erosión ligera, 19366 km² presenta problemas de erosión moderado, 8386 km² presenta problemas de erosión severa y 82 km² presenta problemas de erosión muy severa, lo cual demuestra que la vertiente hidrográfica del lago Titicaca (lado peruano) de la cual forma parte la subcuenca Conduriri, hace muchos años atrás presenta graves problemas de degradación de suelos, a raíz de este problema existente, surge la importancia de realizar la presente investigación.

Al concluir la presente investigación, me permitiré responder la siguiente interrogante:

Problema general

¿Cuál es la pérdida actual del recurso suelo por acción de la erosión hídrica en la subcuenca Conduriri?

1.3 Antecedentes

Se realizó la evaluación de pérdidas de suelo utilizando la ecuación de pérdidas de suelo revisada (RUSLE) junto a los SIG, para determinar la influencia del uso del suelo sobre la erosión en la cuenca del río Guadiana en Puerto Rico, encontraron 7 clases de uso del terreno: suelo desnudo (534 ton/ha/año), bosque de dosel abierto (26 ton/ha/año), agricultura (22 ton/ha/año), pastizales (17 ton/ha/año), urbano poco denso (15 ton/ha/año), bosque de dosel cerrado (7 ton/ha/año) y urbano denso (1 ton/ha/año). Lo cual permitió hacer diferentes simulaciones de uso del suelo que indican que reforestar el 5% de las áreas más afectadas, la erosión se disminuiría en un 20% y si se reforesta la cuenca por completo la erosión se disminuiría en 37%, (López *et al.*, 1998).

En Colombia se evaluó la degradación de los suelos por la erosión hídrica, a través de la elaboración de un modelo utilizando los sistemas de información geográfica (SIG), en la cual analizo los factores que gobiernan el proceso de erosión como son: la precipitación, el tipo de suelo, la pendiente y la vegetación, a partir de la metodología de la FAO, los resultados obtenidos a partir del análisis espacial muestran valores de pérdida de suelo que oscilan entre 1.66 y 426 ton/ha/año y son agrupados en intervalos o clases de degradación, los cuales permitan localizar, de forma rápida y precisa, las zonas de máximo riesgo, (Pérez, 2001).

En México, realizo un diagnóstico de la erosión hídrica en el estado de Tlaxcala, donde encontró que el 90.70% del estado presenta problemas de erosión, en diferentes tipos, formas y grados, siendo la erosión hídrica la dominante y más degradante. La velocidad de la erosión hídrica es de 471.28 ton/ha/año como máxima y mínima de 1.77

ton/ha/año, el grado ligero es el que domina, ocupa una superficie de 1178.526 km² con un porcentaje de 29.02%, (Pérez, 2001).

Según Torres *et al.*, (2003), evaluó la degradación de los suelos de la cuenca el Josefino, localizada en el municipio Jesús María, estado de Jalisco. Los escenarios se construyeron mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica. Los datos utilizados consistieron en cuatro años de información climática, uso de suelo y unidades de suelo, lo cual resultó en cinco unidades hidrológicas, mismas que sirvieron para la predicción de la erosión hídrica. Las metodologías utilizadas fueron: la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos por erosión hídrica y eólica, y FAO para degradación química, física y biológica. En los resultados, se observó que los principales procesos de degradación de los suelos de la cuenca son la erosión hídrica y eólica, en valores clasificados entre altos y muy altos, que van de 107 a 200 ton/ha/año y afectan entre 35 y 81% del área total, respectivamente. La degradación física y química representan los menores grados de afectación que van de ligeras a moderadas.

En Ilave se realizó el modelamiento de la erosión hídrica en la microcuenca del río Coraraca, ubicada dentro de la cuenca del río Ilave, para ello utilizo la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) con un SIG, alcanzando los siguientes resultados: en un 33.92% de su superficie un riesgo de degradación por erosión hídrica muy alto (>200 tn/ha/año), los riesgos de degradación alto (50–200 tn/ha/año) cubren un 33.45% de la microcuenca, los riesgos de degradación moderados (10-50 tn/ha/año) ocupan una superficie de 6.15% y los riesgos de degradación ligera (<10 tn/ha/año), se ubican predominantemente en las partes bajas de la microcuenca ocupando una superficie de 26.47%. (Ancco, 2006)

Según Vega (2008), realizo la evaluación de la erosión hídrica superficial por parcelas experimentales en suelos desnudos de la Región de Coquimbo - Chile, donde el método de clavos de erosión resulta adecuado en la cuantificación y posterior análisis de la erosión hídrica superficial, al introducir nuevos conceptos que permiten establecer un balance entre perdidas y entradas de material, en los cuales alcanzo los siguientes resultados; En la provincia de Elqui, respecto al valor máximo para erosión se logró en el sector de *Tangue N° 1*, con una lámina de 1,49 mm, equivalentes a 18,49 ton/ha y en

sector de *Las Cardas*, donde los 1,64 mm de altura resultaron en una erosión acumulada de 19,82 ton/ha. En la provincia de *Limari*, el valor máximo se alcanza en el sector de *Romeralsillo*, con una erosión equivalentes a 1,01 mm, es decir, 13,99 ton/ha.

Según Guanca (2010), aplicó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) mediante técnicas de información geográfica (SIG), para determinar la erosión hídrica de los suelos en la cuenca del río Pilcomayo, resultando un valor máximo promedio de pérdida de suelo de 1050 ton/ha/año; del total de la cuenca el 94% de la superficie de la cuenca es de clase nula a ligera, 3% moderada, 2% alta y 0.36% de la superficie de clase muy alta. Se observa erosión mayor a 50 ton/ha/año, en pendientes mayores al 5%. Un 91% de las asociaciones de suelos presentan erosión actual nula a ligera, 4% moderada y 4% alta.

Según Tejerina (2010), determino la erosión hídrica de los suelos dominantes de la alta cuenca del río Bermejo, mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos implementado en formato SIG, donde encontró valores de pérdida de suelos desde 9 tn/ha/año; en zonas con pendientes que van desde 0 a 5% y valores máximos de 437 ton/ha/año; presentándose en zonas con pendientes empinadas superiores a 15%.

Según Laura (2010), evaluó la erosión hídrica en la cuenca del río Juramento en la provincia de Salta, con la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y herramienta SIG (Sistema de Información Geográfica). Se utilizaron los SIG ArcGIS v.9.2 y Erdas Imagine v.9.1, como herramienta para el análisis y representación de la erosión. El estudio de erosión mostró que el 34% del área de estudio presenta problemas de erosión alta a muy alta, presentándose valores mínimos de 1 ton/ha/año hasta valores máximos de 223 ton/ha/año.

Según Hernández (2010), estimo la tasa de erosión hídrica, mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, integrando en un ambiente SIG cada uno de los factores que definen la USLE obtuvo una cartografía resultante en la que aparece reflejada la pérdida media de suelo, registrándose el valor más alto de pérdida de suelo por erosión hídrica, de acuerdo a las condiciones de pendiente pronunciada, alta precipitación y

suelo poco desarrollado la tasa fue de 310.57 tn/ha/año, y el valor mínimo de la tasa de erosión fue de 0.018 tn/ha/año, localizado en un terreno con 0% de pendiente.

Según Santacruz (2011), realizó la estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo en la cuenca del río Cahoacán, localizada en la costa Chiapaneca, México, en la cual se presentan precipitaciones que van de 1675 mm hasta 2000 mm, estos valores de precipitación media anual son muy grandes en la parte alta de la cuenca, provoca valores de erosividad muy altos en la zona de montaña, la precipitación media anual disminuye en las zonas planas cercanas al área de costa. Los valores de erosión hídrica, determinados mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, revelaron que las pérdidas de suelo van desde 3.9 ton/ha/año hasta valores de 8010.20 ton/ha/año.

1.4 Justificación

Uno de los problemas ambientales más serios que se está presentando a nivel mundial es el estado de degradación de las tierras así mismo en el Perú específicamente el altiplano de Puno está inmerso en este problema ambiental, la región Puno hace varios años atrás presenta graves problemas de degradación de suelos, a consecuencia de los factores climáticos adversos junto con las condiciones geomorfológicas de relieves con pendientes fuertes y el sobrepastoreo en las partes altas, han llevado a acelerar los intensos procesos de erosión en diferentes cuencas de la región, lo que está generando pérdidas importantes de la capacidad productiva de los suelos y de áreas de pastoreo, la cual representa una serie amenaza para el abastecimiento de alimentos de primera necesidad, poniendo en riesgo el bienestar y la existencia de sus habitantes, por otro lado la erosión disminuye la vida útil de las obras hidráulicas por la cantidad de sedimentos que acarrea el agua, eleva el lecho de los ríos; lo cual genera problemas de inundación en las partes bajas.

Lo anterior muestra un problema ambiental y social que debe ser atendido para evitar mayores impactos y posiblemente daños irreversibles, ello justifica el desarrollo de la presente investigación, referido a la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica mediante el modelo RUSLE, en vista de que la información resulte un instrumento de gestión de erosión del suelos para la intervención por los gobiernos

locales, regional y nacional en materia de manejo, conservación y restauración de las zonas afectadas por erosión.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Estimar la pérdida de suelos por erosión hídrica en la subcuenca Conduriri, mediante la aplicación de la metodología RUSLE durante el periodo 1980 - 2014.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar el Mapa de Erosión hídrica de la Subcuenca Conduriri, mediante la aplicación del Sistema de Información Geográfica en el periodo de 1980 – 2014.
- Determinar los valores y mapas de los factores que afectan a la susceptibilidad del suelo, utilizados en la aplicación de la metodología RUSLE.
- Diseñar modelos para la obtención de cada una de las variables que afectan a la susceptibilidad del suelo de la metodología RUSLE a través del Software ArcGis.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Cuenca Hidrográfica

Según Brooks (1985), indica que la cuenca hidrográfica se define como la unidad territorial natural que capta la precipitación, y es por donde transita el escurrimiento hasta un punto de salida en el cauce principal o sea es un área delimitada por una divisoria topográfica denominada parte-agua que drena a un cauce común.

Según Vásquez (2000), indica que la cuenca hidrográfica es el área natural o unidad de territorio, delimitada por una divisoria topográfica (*divortium aquarium*), que capta la precipitación y drena el agua de escorrentía hasta un colector común, denominado río principal.

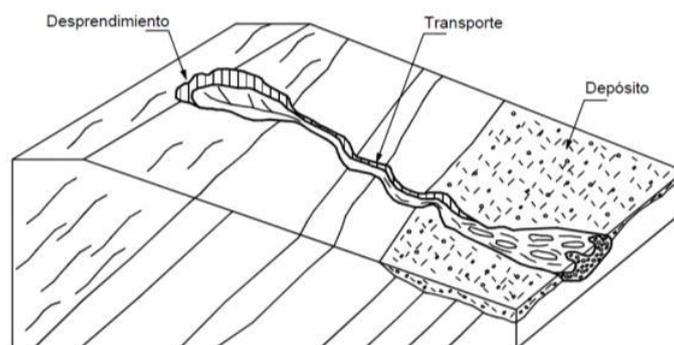
Moreno y Renner (2007), indican que el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, las cuales confluyen en un curso mayor, que a su vez, puede desembocar a un río principal, en un deposito natural de agua, en un pantano o directamente al mar.

2.2 Erosión de Suelos

Según Hill *et al.* (1998), explica que la erosión es el resultado de las interacciones entre las características climáticas y las intervenciones humanas que llevan al desequilibrio ecológico. Hoy en día, las prácticas inadecuadas del uso del suelo (la extensión de los pastos, la colección de leña, quemadas incontroladas) son la fundamental causa de la fuerte degradación. Los impactos socioeconómicos son los aceleradores de los procesos de erosión por disturbios de las interacciones complejas del crecimiento de la planta, formación de los suelos y procesos de erosión. Los indicadores físicos más importantes de la degradación están relacionados a la destrucción del suelo y de la vegetación.

2.2.1 Procesos de la Erosión del Suelo

Según Morgan (2005), menciona que la erosión del suelo es un proceso de dos fases consistentes en el desprendimiento de partículas individuales de la masa del suelo y su transporte por los agentes erosivos, como las corrientes de agua y el viento. Cuando la energía de estos agentes no es suficiente para transportar las partículas, se produce una tercera fase: su deposición. Hellin (2004), explica que la erosión hídrica es la pérdida progresiva de los componentes del suelo como consecuencia de la dispersión de sus agregados, los cuales son arrastrados por el agua hasta lugares más bajos, contribuyendo a la degradación del suelo y a la pérdida de su fertilidad, siendo una amenaza para la productividad agrícola. Razones que han llevado a que numerosos investigadores muestren un considerable interés por el desarrollo de tecnologías o métodos para la conservación de los suelos. Suarez (2001), manifiesta que la erosión comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza de un fluido en movimiento.



Fuente. Suárez (2001)

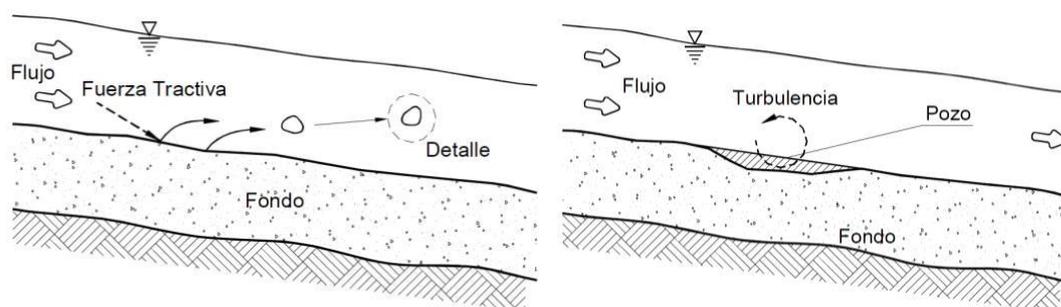
Figura 1: Procesos de erosión

2.2.2 Mecánica de la Erosión del Suelo

Según Suarez (2001), la mecánica de la erosión incluye tres procesos básicos:

1. Desprendimiento de las partículas
2. Transporte de las partículas desprendidas
3. Depósito o sedimentación.

Las fuerzas que actúan o fuerzas tractivas dependen de la velocidad del agua, la turbulencia, los caudales y la forma y rugosidad del canal y la resistencia del suelo a la fuerza tractiva depende de la estructura y las interacciones físico – químicas entre las partículas de suelo. El control de erosión está dirigido a disminuir la fuerza tractiva y/o aumentar la resistencia del suelo a la erosión.

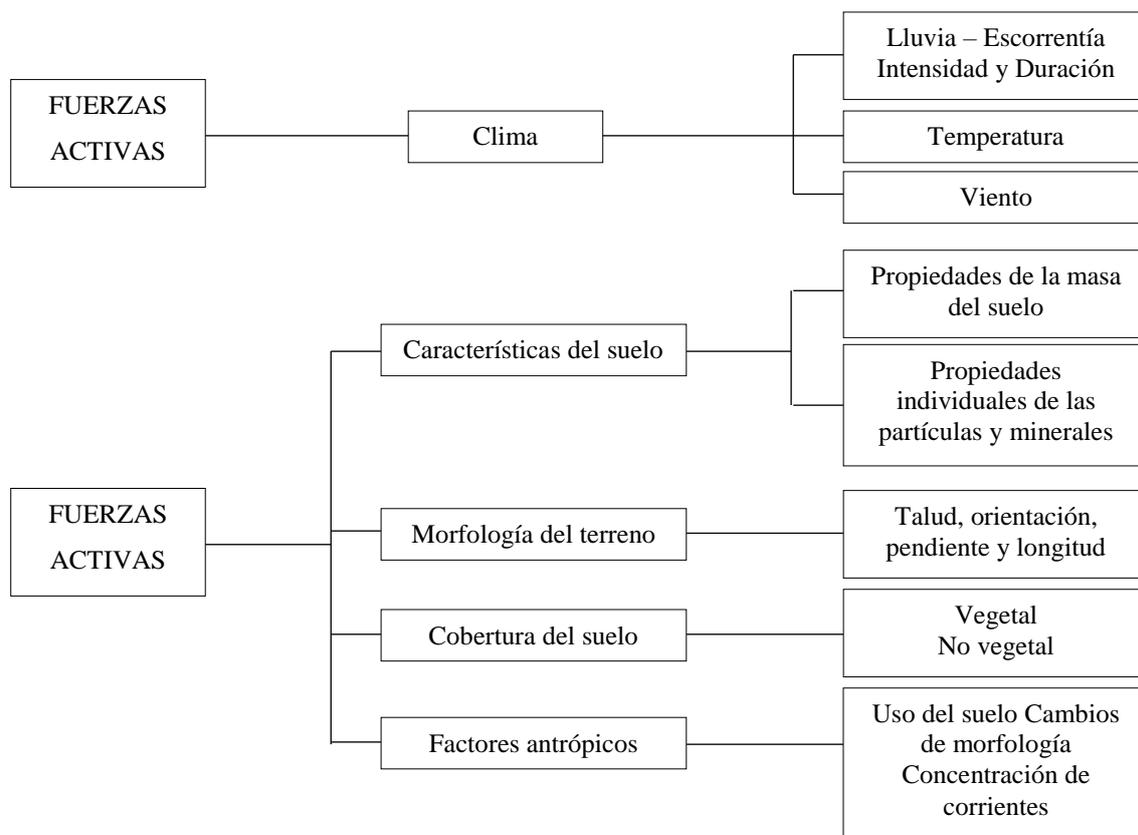


Fuente: Suárez (2001)

Figura 2: Desprendimiento y arrastre de partículas

2.2.3 Factores que Influyen en la Erosión

La Organización Meteorológica Mundial, OMM (2006), manifiesta que la degradación de las tierras intervienen dos sistemas complejos conectados entre sí: el ecosistema natural, y el sistema social humano. Las fuerzas de la naturaleza, mediante el desgaste periódico causado por fenómenos climáticos extremos y persistentes, y el uso y abuso por los seres humanos de los ecosistemas sensibles y vulnerables de las tierras secas. Por otro lado Greenland y Lal (1975), indican que la erosión es causada por una combinación de factores: condiciones del clima, la topografía de los terrenos, la cobertura vegetal, las características propias del suelo y la actividad humana. Suarez (2001), explica que la fuerza tractiva del agua y del viento en movimiento son las principales fuerzas que generan erosión superficial y la fuerza de gravedad es la principal fuerza que produce la erosión en masa. La susceptibilidad a la erosión depende del clima, las características del suelo, la morfología del terreno, la cobertura del suelo, y la intervención antrópica.



Fuente. Suárez (2001)

Figura 3: Factores que afectan la susceptibilidad a la erosión

2.2.4 Erosión Hídrica

Ineter *et al.* (2005), indica que, la erosión hídrica es el proceso de separación y transporte de las partículas del suelo por acción del agua de lluvia. Es un proceso que destruye los suelos, ya que hace desaparecer el suelo superficial, a veces hasta dejar al descubierto la roca madre. Puede ser un proceso natural o acelerado. Morgan (1997) nos dice que, la pérdida de suelo se expresa, habitualmente, en unidades de peso o volumen por unidad de superficie y tiempo (tm/ha/año).

2.2.4.1 La Erosión Natural

Rodríguez *et al.* (2004), menciona que, la erosión natural o geológica es ocasionada por la acción permanente de los diversos fenómenos del intemperismo natural, y es tan lenta que requiere miles de años para producir cambios importantes en

la configuración de la superficie terrestre. El suelo en estos casos se pierde tan lentamente que suele ser repuesto por los procesos naturales de descomposición y regeneración del sistema suelo.

2.2.4.2 La Erosión Acelerada

Rodríguez *et al.* (2004), menciona que, es el proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de las partículas de suelo causado por el agua. Ocurre cuando el hombre realiza sus actividades de uso del suelo de manera incorrecta, particularmente cuando deja el suelo sin su cobertura vegetal durante una parte del año (deforestación, sobrepastoreo, cultivos en limpio).

2.2.5 Principales Formas de Erosión Hídrica

2.2.5.1 Erosión Laminar

Ineter *et al.* (2005), indica que es la pérdida superficial de suelo en forma más o menos uniforme, de tal manera que las raíces de las plantas quedan al descubierto. Este proceso es poco percibido por los agricultores, a pesar del gran daño que está produciendo a sus tierras, ya que se están perdiendo las partículas coloidales más importantes (arcilla, humus y nutrientes).

2.2.5.2 Erosión en Surcos

Ineter *et al.* (2005), menciona que, es la pérdida de suelo por el agua de lluvia, cuando esta se ha concentrado en pequeñas depresiones naturales, y empieza a desplazarse ladera abajo arrastrando el suelo, formando pequeñas zanjas con profundidades hasta de 50 cm. Este proceso es acelerado por el hombre, cuando hace un mal manejo del suelo, como el hacer surcos en dirección de la pendiente, el cual es una práctica común en la zona.

2.2.5.3 Erosión en Cárcavas

Ineter *et al.* (2005), nos dice que, las cárcavas son zanjas profundas (mayores de 1m) en las laderas, formadas por el arrastre de las partículas de suelo, de manera casi completa, hasta llegar incluso al lecho rocoso; cuando en las laderas hay una gran cantidad de cárcavas constituyen un paisaje que se denomina “bad lands”. También en este caso el hombre es responsable en parte por el mal uso que le ha dado a estos suelos de ladera.

2.2.5.4 Erosión por Salpicadura

Ineter *et al.* (2005), menciona que, se debe al impacto de las gotas de lluvia sobre los agregados inestables de un suelo desnudo. Se producen pequeños cráteres de impacto con liberación de partículas.

Las partículas se desplazan como máximo 150 cm, siendo las arenas finas, las más afectadas. Generalmente las partículas se quedan a poca distancia. Puede dar origen a una costra superficial que hará disminuir la infiltración. Sus efectos son más evidentes cerca de las divisorias de aguas.

2.2.6 Daños Directos e Indirectos Causados por Erosión Hídrica

Ocampo *et al.* (1996), afirma que, los daños causados por la erosión pueden ser directos cuando afectan los cultivos o dañan la chacra, disminuyen la capacidad de producción y desvalorizan la propiedad.

Ocampo *et al.* (2006), también nos dice que, la suma o conjunto de problemas de erosión de varias chacras ocasiona daños indirectos que se manifiestan en desequilibrios hidrológicos y ecológicos, en problemas de sedimentación y daños en las vías, en los acueductos y en las viviendas.

Ocampo *et al.* (1996), afirma que, todos los daños directos e indirectos, significan grandes pérdidas económicas para el agricultor, la comunidad y el país, y en ocasiones la pérdida irreparable de vidas humanas y la esterilidad de vastas zonas.

2.2.6.1 Daños Directos

Los daños directos se identifican fácilmente. Estos daños son variables que se pueden cuantificar o medir. Algunos daños directos usualmente son de gran magnitud, cuando son catastróficos. Normalmente se estiman a grosso modo, con base en proyecciones de pérdidas de vidas humanas, de tierras, de ganado y de viviendas. Anualmente, este tipo de daños causa pérdidas millonarias (Núñez, 2001).

Según Ocampo *et al.* (1996), los daños directos son los que se manifiestan visiblemente en un predio y que pueden ocurrir aún por la acción de una sola lluvia fuerte. Entre los principales daños directos están:

- Pérdida de siembra.
- Pérdida de suelos.
- Arrastre de nutrientes.
- Pérdida de agua.
- Pérdida de áreas de cultivo.

2.2.6.2 Daños Indirectos

Según Núñez (2001), son daños causados en el ecosistema que no pueden cuantificarse de una manera clara, pero que ocurren insidiosamente todos los días. También se conocen como daños intangibles. Algunos ejemplos son los siguientes:

- Pérdida de riqueza genética de la fauna: ante los procesos de tala del bosque y avance continuo del frente agrícola, el banco genético de muchas especies animales disminuye por la muerte de muchos de sus miembros.
- Pérdida de especies de flora: debido a la heterogeneidad del bosque tropical húmedo y a la condición de poca densidad de especies forestales por hectárea, la deforestación puede incidir fácilmente en que algunas especies desaparezcan rápidamente de los ecosistemas forestales.

Según Ocampo *et al.*(1996), la deforestación y tala indiscriminada de los bosques, de las cuencas hidrográficas hace más grandes las fluctuaciones de los caudales de quebradas y ríos; los máximos y mínimos se hacen más críticos debido al desbalance entre la lluvia y la retención por parte de la vegetación y la cubierta muerta.

Los principales problemas ocasionados por este desequilibrio hidrológico con:

- Escasez de agua para el consumo.
- Colmatación de embalses y quebradas con disminución de su capacidad de almacenamiento y conducción.

2.3 Modelización de la Erosión del Suelo, Tipos de Modelos

Cuando se predice la erosión, se debe decidir si la predicción es para un año, un día, una tormenta o para periodos cortos dentro de una tormenta, si se refiere a una parcela, una ladera o una cuenca. Estas perspectivas en el tiempo y en el espacio influirán en los procesos que deben incluirse en el modelo, en la forma que deben describirse y en el tipo de datos necesarios para validar el modelo y su funcionamiento (Morgan, 1994).

Los modelos se pueden clasificar según los datos que utiliza y la forma de generarlos en:

Cuadro 1: Clasificación de los métodos según los datos que utiliza y la forma de generarlos.

TIPOS DE MODELO	DESCRIPCIÓN
Físicos	Modelos a escala reducida contruidos en laboratorio; necesitan asumir similitudes dinámicas entre el modelo y el mundo real
Analógicos	Utiliza sistemas mecánicos o eléctricos análogos a los investigados; p. ej. El fluido eléctrico utilizado para simular los flujos de agua.
Digital	Utiliza ordenadores para procesar grandes cantidades de dates
a) Con base física	Describe los procesos incluidos en el modelo mediante ecuaciones matemáticas teniendo en cuenta las leyes de conservación de la masa y la energía.

b) Estocásticos	Se basa en la generación de series sintéticas de datos a partir de las características estadísticas de datos simples existentes; es útil para generar secuencias de entrada para modelos de base física y empírica cuando los datos son disponibles solo para pequeños periodos de observación.
c) Empíricos	Basada en la identificación de relaciones estadísticas significativas entre las variables importantes consideradas, cuando se dispone de una base de datos razonable. Se realizan tres tipos de análisis: De caja negra: solo se estudian las entradas y salidas principales. De caja gris: solo conocen algunos detalles de cómo funciona el sistema. De caja blanca: se conocen todos los detalles de cómo opera el sistema

Fuente: Gregory y Walling (1973)

Cuadro 2. Clasificación de los modelos según el tipo de información que se obtiene.

CUALITATIVOS: Establecen una graduación ordinal en la magnitud del proceso erosivo en una área determinada.	Formas de erosión.	
	Grados de erosión	
CUANTITATIVOS: Permiten la estimación numérica de la erosión, y definiendo rangos, establecer estados erosivos.	Evaluación Directa: Medidas en el terreno, ensayos o medidas de parámetros asociados a los sedimentos.	
	Evaluación Indirecta: Con relaciones empíricas entre factores o parámetros.	Físicos
		Estadísticos
		Paramétricos

Fuente. Almorox et al., (1994)

El conocimiento de los procesos erosivos es máximo para periodos de tiempo muy cortos, de solo unos pocos minutos. Aunque es posible aplicar estos conocimientos a periodos más largos, la extrapolación continua no es posible. Un fenómeno singular o una tormenta es probablemente, el límite superior al que puede aplicarse las relaciones establecidas para condiciones instantáneas. Por ello, modelizaciones para periodos de tiempo más largos, solo pueden obtenerse sumando las predicciones de tormentas individuales. La alternativa es desarrollar modelos empíricos a partir de datos recogidos durante un año, o basados en medias anuales, (Morgan, 1994).

La escala de trabajo influye en el número de factores que deben incorporarse al modelo, los que pueden mantenerse constantes y los que pueden considerarse principales, alrededor de los cuales deberá construirse el modelo.

Se hará una revisión de los modelos que se han utilizado para desarrollar políticas de conservación de suelos, aunque en general hasta ahora han sido modelos parámetros como la USLE, el SLEMSA y últimamente la RUSLE. Pero teniendo en cuenta que el conocimiento de los procesos erosivos ha mejorado significativamente en los últimos años, ahora se pueden desarrollar modelos con base física y de caja blanca desarrollados con un soporte digital. Si lo clasificamos según los datos obtenidos, modelos cuantitativos de evaluación indirecta, básicamente físicos. Por lo tanto la revisión de los modelos existentes intentara clasificar los modelos según si son empíricos o físicos pero sin olvidar que el límite entre un tipo de modelo y otro no es nítido y la evolución en el desarrollo de los modelos es importante.

2.4 Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos Revisada (RUSLE).

Rodríguez et al. (2005), menciona que, la degradación de los suelos por erosión hídrica, es uno de los procesos más importantes en la pérdida de la capacidad productiva de la tierra. En la estimación de este proceso degradativo, en términos de pérdida de suelo, se han desarrollado y diseñado una serie de procedimientos y modelos.

Según Velásquez (2008), la investigación en erosión de suelos y su efecto en la producción agrícola comenzó en los años 1930. Durante 1940 y 1956, los científicos empezaron a desarrollar procedimientos cuantitativos para estimar la pérdida de suelos en el cinturón maicero de los Estados Unidos. Varios factores fueron introducidos a una primera ecuación de pérdida de suelos, en la cual la pendiente y las prácticas culturales fueron consideradas. Se reconoció que la ecuación de pérdida de suelos podría tener un gran valor para la planificación de fincas y que la ecuación del cinturón maicero podría ser adaptada a otras regiones. En 1946, un grupo de especialistas llevaron a cabo un taller en Ohio para replantear los factores previamente utilizados y adicionaron un factor de lluvia. En 1954, el Departamento de Agricultura de los EEUU (USDA) y el Servicio de Investigación Agrícola (ARS) establecieron el Centro Nacional de Datos de Escorrentía y Pérdida de Suelos (CNDEPS) en la Universidad de Purdue, con el objetivo de localizar, ensamblar y consolidar todos los datos disponibles a través de los EEUU.

Más de 10000 parcelas experimentales de escorrentía, fueron tomadas en cuenta para medir la pérdida de suelo, en 49 localidades a lo largo de los EEUU (Almoza et al., 2007).

Basados en los datos recopilados por el CNDEPS, Wischmeier, Smith y otros, desarrollaron la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS o USLE). Con una aceptación amplia, la USLE se ha consolidado como la mayor herramienta de planificación de la conservación que se usa en los EEUU y en otros países del mundo (Velásquez, 2008).

Según Morgan y Kirkby (1984), la USLE o EUPS se diseñó en principio como un auxiliar útil para la planificación de la conservación, también puede ser un útil instrumento de investigación, con tal de que uno sea más preciso para evaluar los factores de la ecuación que para la planificación de la conservación. Puede utilizarse para generar los datos de pérdida de suelo para correlacionarlos con otros parámetros. La ecuación se desarrolló para calcular la pérdida promedio anual de suelo a largo plazo. Por tanto, su aplicación a determinado año o tempestad tal vez no sea adecuada. Cuando se utiliza en el caso de una tempestad específica, estimará la pérdida de suelo promedio si ese evento se repite mucho y, lo mismo que con cualquier promedio, la pérdida de suelo derivada de cualquiera de estos eventos puede variar considerablemente.

Velásquez (2008), indica que los factores de la EUPS se desarrollaron mediante una unidad de evaluación llamada la parcela estándar. Una parcela estándar es de una longitud de 22,13 metros sobre una pendiente uniforme de 9 por ciento en sentido longitudinal. La parcela fue labrada hacia arriba y hacia abajo de la pendiente y estuvo bajo barbecho continuo durante por lo menos dos años. La parcela estándar es simplemente resultado del desarrollo histórico de la EUPS. Los datos básicos a menudo se obtenían de parcelas de 40,5 m² (0.01 acres) de tamaño. Para una anchura adecuada de 1,83 metros (6 pies) se requería una longitud de parcela de 22,13 metros (72,6 pies). Gran parte de los datos se tomaron de las superficies que se desviaban de la parcela estándar y permitía obtener las escalas para el análisis estadístico que condujeron a la formulación de la EUPS. Sin embargo, la parcela estándar se tomó como base para definir la variación en L, S, C, y P.

Con investigación adicional, experimentos, datos y recursos estuvieron a la disponibilidad de investigadores y científicos que continuaron mejorando la USLE, lo que llevó al desarrollo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (EUPSR o RUSLE) (Renard *et al.*, 1997, citado por Velásquez, 2008).

Según Alonso *et al.*, (2007), la ecuación universal de pérdida de suelos modificada (RUSLE) es una revisión de USLE (Wischmeier y Smith, 1978), donde se mantiene la misma estructura general, pero se modificó la forma de obtención de cada uno de los factores del modelo (Renard *et al.*, 1997, citado por Vega y Febles, 2005). Aunque fue desarrollado para pequeñas pendientes, USLE y sus resultados han sido incorporados en aplicaciones de modelación de erosión y transporte de sedimento a escala de cuenca. Los requerimientos de datos de entrada son bajos, comparado con muchos otros modelos: lluvia anual, un estimado de la erodabilidad, información de la cobertura de suelo y la topografía. Dando como resultado una estimación de la pérdida de suelo anual promedio (Merritt *et al.*, 2003, citado por Alonso *et al.*, 2007).

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

Donde:

A es la cantidad de material erodado calculado o medido expresado en toneladas por hectárea para una duración de lluvia específica. A tiene las unidades de K, en el periodo de tiempo seleccionado para R.

R es el factor de lluvia en forma de un índice (EI30), que es medido por el poder erosivo de la lluvia expresado en toneladas metro por hectárea hora o en joule por metro cuadrado, una medida de la fuerza erosiva de la lluvia y escurrimiento asociado.

K es el factor de erodabilidad del suelo, es erosión estándar en tonelada por hectárea por unidad de erosividad R, para un suelo específico con una pendiente uniforme de 9% de gradiente y 22,1 m de longitud de pendiente en barbecho limpio labrado, es una medida de la susceptibilidad inherente de las partículas del suelo a la erosión.

L es el factor longitud de pendiente, expresa la relación de pérdida de suelo de una pendiente con una longitud dada y la pérdida de suelo de una pendiente con una longitud estándar de 22,13 m, con idénticos valores de erodabilidad y gradiente de pendiente.

S es el factor de gradiente de pendiente, expresa la relación de pérdida de suelo de una gradiente de pendiente específica y la pérdida de suelos de una pendiente con gradiente estándar de 9%, bajo otras condiciones similares, definen el efecto de la inclinación de la pendiente sobre la pérdida de suelo por unidad de área.

C es el factor combinado de vegetación y manejo, expresa relación de pérdida de suelo de un área con cobertura y manejo específicos a un área similar pero en barbecho continuamente labrado.

P es el factor prácticas de conservación de suelo que expresa la relación de pérdida de suelo de un área con cobertura y manejo específico, como cultivo en contorno, cultivo en bandas o terrazas, con otro con labranza a favor de la pendiente.

Cuadro 3. Dimensiones y unidades de los factores del modelo RUSLE

Símbolo	Dimensión	Unidades métricas
A	M	tm
	$L^2 * T$	ha * año
R	$L * F * L$	Mj * mm
	$L^2 * T * T$	ha * hrs * año
K	$M * L^2 * T$	tm * ha * hrs
	$L^2 * L * F * L$	ha * MJ * mm

Fuente: Renard et al., (1997), citado por Mesén (2009)

Según Mesén (2009), el producto de los primeros cuatro factores (R, K, L y S) es el potencial erosivo inherente en el sitio; eso es, la pérdida de suelo que ocurriría en la ausencia de cualquier cobertura vegetal (C) o práctica de manejo (P). Los dos últimos factores reducen esta pérdida potencial para compensar los efectos de uso de la tierra, manejo y prácticas especiales.

Del mismo modo Ramírez (2010), nos dice que, los términos RKLS, establecen la influencia de los factores físicos del lugar, poco modificables por el hombre. Representan la pérdida de suelo que ocurriría en ese sitio si todo el año el suelo estuviese desnudo; por esa razón a este producto parcial se lo denomina erosión potencial (EP).

Ramírez (2010), indica que el producto de (RKLS) por los valores de C y P permite estimar la erosión actual (EA). Estos valores dependen del porcentaje de cobertura natural y del manejo que cada productor haga de su campo. Para diferentes manejos corresponden diferentes valores de C y P; estos valores se encuentran tabulados.

Wischmeier y Smith (1978), describen cada uno de estos factores y proporcionan métodos para evaluarlos. El RUSLE fue desarrollado para:

- Predecir el movimiento promedio anual de suelos desde una pendiente específica, bajo condiciones de uso y manejo específicos.
- Orientar la selección de prácticas de conservación para localidades específicas. Para ello, es preciso conocer la tolerancia de pérdidas de suelo del terreno, lo que a su vez permitirá efectuar la ordenación agroecológica del espacio considerado.
- Estimar la reducción de pérdida de suelos que se puede lograr con cambios de manejo efectuados por el agricultor.
- Determinar el largo máximo de pendiente tolerable para un sistema de cultivo determinado.

Las ventajas del (R) USLE incluyen facilidad de uso, simplicidad, y una base de datos amplia sobre la cual fue desarrollado. Sin embargo, tiene varias limitaciones. Los métodos para estimar los seis factores no se encuentran disponibles en muchos lugares

fuera de los Estados Unidos de Norteamérica. Su aplicación en praderas es limitada. Está basado sobre el supuesto de pendiente de terreno, suelos, cultivo y manejo uniformes. Es un procedimiento estadístico (empírico o "agrupado") que no contempla los procesos físicos de separación, transporte y sedimentación en forma mecánica (Wischmeier y Smith, 1978).

2.4.1 Factor R o Índice de Erosividad de la Lluvia

Uno de los factores que determinan la erosión es la agresividad o erosividad de la lluvia; se define como la capacidad potencial de la precipitación, de causar erosión en un período determinado de tiempo (Pérez, 2001).

Según Ramírez (2010), el factor R representa la capacidad potencial de las lluvias para generar erosión; es función de las características físicas de las mismas (intensidad, duración, velocidad y tamaño de las gotas) y además la altitud incide significativamente en los valores obtenidos (Antezana, 2001), del mismo modo Ramírez et al. (2007), nos dice que, existe una relación directa entre la erosividad y la precipitación anual, dada la definición misma de dicho índices.

Antezana (2001) nos dice que, es el potencial erosivo de la lluvia que afecta el proceso de erosión del suelo. La erosión por gotas de lluvia incrementa con la intensidad de la lluvia. Una suave y prolongada lluvia puede tener la misma energía total que una lluvia de corta duración y más intensa.

Debido a la dificultad para calcular el factor R de la USLE, ya que para su cálculo debe contarse con registros pluviográficos diarios durante un número elevado de años, y calcular la energía cinética y la intensidad de los aguaceros en forma aislada, diversos autores han propuesto métodos adicionales para definir el factor de erosividad de una manera simple y aplicable a las condiciones regionales (RAMÍREZ et al., 2007).

Ineter (2005), nos dice que, los más conocidos al respecto fueron desarrollados por: Smith y Wischmeier (1963), Athesian (1974), Delwaulle (1973), Roose (1975), Klingebiel (1972), Hudson (1971), Lal (1976), Arnoldus (1978), Morgan (1974) y Foster (1981).

2.4.1.1 Factor EI30 Método de Wischmeier (1959)

Una estimación de la erosividad a partir de datos pluviométricos la obtuvo Wischmeier (1959), tras demostrar que la correlación entre la pérdida de suelo en distintas tormentas y la cantidad de lluvia caída o la cantidad máxima en distintos intervalos era pequeña, pero que el factor más correlacionado con la erosión era la energía cinética, el mejor estimador de la pérdida de suelo resultó ser un parámetro igual al producto de la energía cinética de la tormenta para la intensidad máxima registrada en 30 minutos (Elías y Castellvi, 2001).

Ramírez (2010) nos dice que, el índice EI30, se define como el producto de la energía cinética (E) de un aguacero y su máxima intensidad en un intervalo de 30 minutos (I). El factor R resulta de promediar totales anuales de E*I para un período de por lo menos 20 años de fajas pluviográficas.

A los fines prácticos, la ausencia de esta información en las estaciones meteorológicas ha limitado la aplicación de esta metodología; además la dificultad para determinar el factor R de la USLE, ya que para su cálculo debe contarse con registros pluviográficos diarios durante un número elevado de años, y calcular la energía cinética y la intensidad de los aguaceros en forma aislada, diversos autores han propuesto métodos adicionales para definir el factor de la erosividad de una manera simple y aplicable a las condiciones regionales (Ramírez et al., 2007).

2.4.1.2 Morgan (1974)

Morgan (1997), nos dice que, este método fue propuesto para lugares de alta precipitación y está dado por la siguiente fórmula:

$$R = I30 (9,28P - 8,383) / 1000$$

Donde:

I30 = 75 mm/h (valor recomendado por Wischmeier).

P = Precipitación promedio anual en mm.

2.4.1.3 Foster (1981)

Este método citado por Morgan (1997), es otro índice de erosividad, que se expresa por la siguiente fórmula:

$$R = 0,276P * I30 / 100$$

Donde:

I30 = 75 mm/h (valor recomendado por Wischmeier).

P = Precipitación promedio anual en mm.

- Componente I30 de la ecuación Morgan y Foster:

Según Morgan (1997), con intensidades mayores de 75 mm/h, la energía cinética se aproxima a un valor de 29 Jm⁻²mm⁻¹, que parece representativo para muchas localizaciones (Kinnell, 1987). Cárter et al. (1974), comprobaron en el sur de USA, que la energía cinética aumentaba hasta un valor máximo para intensidades próximas a 75 mm/h, decrecía para intensidades hasta de 175 mm/h y, posteriormente, aumentaba de nuevo para mayores intensidades. Mientras que Osuji (1989), comprobó que los valores máximos de energía eran, generalmente, próximos a 35 J m⁻²mm⁻¹, para intensidades mayores de 70 mm/h.

Según Morgan y Kirby (1984), los estudios han demostrado que el tamaño mediano de las gotas de lluvia no continúa aumentando con intensidades de precipitación pluvial superiores a 75 mm/h (Cárter et al., 1974 y Hudson, 1971). Elías y Castellvi (2001), nos dice que por tanto, las recomendaciones actuales (Wischmeier y Smith, 1978) son que se utilice un límite superior de 76,2 mm/h para calcular la energía por unidad de precipitación pluvial y se establezca un límite inferior de 63,5 mm/h para el componente I30, con un valor recomendado de 75 mm/h, para zonas de alta precipitación.

2.4.1.4 Roose (1995)

Este método citado por Morgan (1997), es otro índice de erosividad que considera la precipitación promedio anual y se expresa por la siguiente fórmula:

$$R = 1,73 * 0,5 * P$$

Donde:

P = Precipitación promedio anual en mm.

2.4.1.5 Índice Modificado de Fournier

Ineter et al. (2005) y Pizarro (2007), nos dicen que, el índice modificado de Fournier fue desarrollado por Arnoldus (1978), para corregir posibles desviaciones en el índice de Fournier, considerando las precipitaciones de todos los meses para un periodo de tiempo, considera no solamente el mes de mayor precipitación sino también el resto de los meses.

Según Arnoldus (1978), citado por Ramírez (2010), basado en trabajos de Fournier, nos dice que el índice modificado de Fournier (IMF), es un método práctico que utiliza una fórmula obtenida por regresión lineal en la cual correlacionó valores conocidos de R con las lluvias medias anuales.

$$R = \sum_{i=1}^{i=12} p_i^2 / P$$

Donde:

i = número del mes.

p = precipitación mensual en mm.

P = precipitación promedio anual en mm.

Ramírez (2010), nos dice que, este índice fue utilizado por FAO en la elaboración del mapa universal de degradación de suelos. Las principales ventajas que muestra son el empleo de datos meteorológicos simples y una buena correlación con valores medidos conocidos del factor R, empleando el índice I30. Esta ecuación se probó en diferentes regiones del mundo obteniéndose en general un alto grado de correlación (0,89).

Según Arnoldus (1980) y Hoyos et al. (2005), citado por Ramírez et al. (2007), establecieron que el IMF es considerado como un buen estimador de la erosividad de las lluvias para el modelamiento de los procesos erosivos en zonas tropicales.

Ramírez et al. (2007), indica que en la zona cafetera colombiana se evaluó la erosividad de las lluvias mediante el índice de erosión pluvial de Fournier y se correlacionó con el factor de erosividad propuesto por Wischmeier y Smith (1965), y como resultado se encontró una regresión lineal alta ($R^2 = 0,92$), entre estos dos factores.

Cuadro 4: Clasificación de IFM para Latinoamérica.

Clase	Rango	Calificación
1	Menor de 60	Muy bajo
2	60 a 90	Bajo
3	90 a 120	Moderado
4	120 a 160	Alto
5	Mayor de 160	Muy Alto

Fuente: Lobo et al. (2006), citado por RAMÍREZ et al. (2007).

2.4.2 Factor de Erodabilidad del Suelo (K)

Según Poels (1993), es una compleja propiedad que se la entiende como la facilidad con la cual el suelo es desprendido por el salpicamiento, durante una lluvia o por flujo superficial. Esta propiedad del suelo está relacionada al efecto integrado de la lluvia, escurrimiento e infiltración. Los suelos generalmente llegan a ser menos erosivos

con una reducción en la fracción de limo a pesar del correspondiente incremento de la fracción de arcilla o arena.

El factor K representa el efecto de las propiedades y de las características del perfil del suelo en la pérdida del mismo, dependiendo marcadamente de la capacidad de infiltración y de la resistencia del suelo a la degradación estructural que puede conducir a la reducción de infiltración, ya que el suelo es menos capaz de absorber el agua suministrada en la superficie de la tierra, el escurrimiento superficial es acrecentado y la erosión hídrica se presenta. A la vez, la capacidad de infiltración y la resistencia a la degradación estructural de la superficie están influenciadas por muchas propiedades del suelo como la porosidad, resultado de la formación de la estructura del suelo que se presenta estable y desarrollada por la presencia de moderadas cantidades de arcilla, materia orgánica y por óxidos de hierro.

El factor K, es completamente único para cada lugar, determinado por la compactación de sus fracciones, que obtiene parámetros que establecen indicadores solamente para ese sitio, entonces debe señalarse que el factor K, es el menos transferible a otras zonas de donde originalmente fue investigado. Por lo que existe varios métodos para el cálculo del factor K, pero el más confiable según Auza (1999), es la ecuación de Mannaerts (1999), el cual relaciona el tamaño medio de las partículas de suelo a la pérdida del mismo por erodabilidad.

$$K = 0.0034 + 0.0405 * e^{\left[-0.5 * \left(\frac{\log Dg + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right]}$$

$$Dg = e^{(0.01 * \sum Fi * \ln(Mi))}$$

Donde:

K = Factor de erodabilidad del suelo $\left(\frac{t}{ha} * \frac{Mj}{ha} * \frac{mm}{hr} \right)$

Dg = Media geométrica del diámetro de las partículas (mm).

Fi = Fracción de las partículas primarias (%).

Mi = Promedio aritmético de los límites de tamaño de partículas (mm).

2.4.3 Factor LS o Longitud y Gradiente de la Pendiente

Según Ramírez (2010), se conoce con el nombre de factor topográfico. Expresa el efecto del relieve sobre la pérdida de suelos, representando el efecto del largo y grado de la pendiente. Según Ineter et al. (2005), a medida que la escorrentía se acumula en una pendiente alargada, su capacidad de desprender y transportar se incrementa.

L es el factor de longitud de la pendiente y representa su efecto en la erosión (adimensional). Es la razón entre la pérdida de suelo en la longitud de pendiente en campo con respecto a la longitud de una parcela de 22,1 m en el mismo tipo de suelo y gradiente. La longitud de la pendiente es la distancia desde el origen de la escorrentía superficial a lo largo de su vía de flujo a la localidad donde se concentra el flujo o donde se deposita el suelo desprendido. Afortunadamente, los valores de pérdida de suelo no son especialmente sensitivos a la longitud de la pendiente y las diferencias en longitud de +0 - 10% no son importantes en la mayoría de pendientes.

S es el grado de inclinación de la pendiente. Representa los efectos de la inclinación en la erosión. La pérdida de suelo se incrementa más rápidamente con pendientes muy escarpadas en comparación con el incremento en longitud de la pendiente. Se define como el cociente de la pérdida de suelo en el campo entre la que ocurre en una parcela de 9% de inclinación bajo idénticas condiciones. La relación entre la pérdida del suelo y la gradiente se ve influenciada por la densidad de la cobertura vegetal y el tamaño de las partículas del suelo.

Generalmente, el factor L y S se consideran juntos. Los factores LS juntos son iguales a 1 bajo condiciones de la parcela unitaria de 22,1 m y 9% de inclinación. Los valores de L y S son relativos y representan que tan erodable es una longitud de inclinación particulares en relación a los 22,1 m de largo y 9% de inclinación de la parcela unitaria, algunos valores de LS son menores que 1 y otros mayores que 1. Métodos para su determinación:

2.4.3.1 Método de Mintegui (1983)

García (2005), nos dice que, este método fue elaborado por la Cátedra de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid, mediante la correlación con el mapa de pendientes. Este estudio permitió la elaboración de una tabla que asigna directamente el valor del factor LS en función de la pendiente (Ramos, 2001).

Cuadro 5: Valores del factor LS en función de la pendiente.

Gradiente de Pendiente (%)	Factor LS
0 – 3	0,3
3 – 12	1,5
12 – 18	3,4
18 – 24	5,6
24 – 30	8,7
30 – 60	14,6
60 – 70	20,2
70 – 100	25,2
Más de 100	28,5

Fuente: Método Mintegui (1983), citado por Ramos (2001) y García (2005).

2.4.3.2 Metodología de Renard et al., (1997)

Renard et al. (1997), citado por Barrios y Quiñonez (2000) y Velásquez (2008), nos dice que el factor LS se calcula aplicando las ecuaciones empleadas en RUSLE.

El factor L: Donde λ es la longitud de la pendiente (m), m es el exponente de la longitud de la pendiente y β es el ángulo de la pendiente. La longitud de la pendiente se define como la distancia horizontal desde donde se origina el flujo superficial al punto donde comienza la deposición o donde la escorrentía fluye a un canal definido (Foster et al., 1977, citado por Barrios y Quiñonez, 2000)

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m \qquad m = \frac{F}{(1+F)} \qquad F = \frac{\sin \beta / 0,0896}{3(\sin \beta)^{0,8} + 0,56}$$

El factor L con el área de drenaje aportadora (Desmet & Govers, 1996, citado por Velásquez, 2008).

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)}+D^2)^{m+1}-A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m \cdot D^{m+2} \cdot (22,13)^m}$$

Donde A (i, j) [m] es el área aportadora unitaria a la entrada de un pixel (celda), D es el tamaño del pixel y x es el factor de corrección de forma.

El factor S: El ángulo β se toma como el ángulo medio a todos los subgrids en la dirección de mayor pendiente (McCool *et al.*, 1987,1989, citado por Barrios y Quinonez, 2000).

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

Velásquez (2008), nos dice que, cuando se aplica esta fórmula en el Ráster Calculator de ArcGis se debe tomar en cuenta que el ángulo deberá ser convertido a radianes (1 grado sexagesimal = 0,01745 radianes), para que pueda ser multiplicado por los demás componentes de las ecuaciones.

2.4.4 Factor C o de Cobertura Vegetal

Ineter *et al.* (2005), nos dice que, la cobertura de suelo es la más grande defensa contra la erosión de suelo, pero un mantenimiento de variables de sistema de cultivos y manejo también influyen altamente en la habilidad de la superficie de suelo a resistir erosión. Velásquez (2008), nos dice que, C es el factor de manejo de cultivo. El factor C se utiliza para reflejar el efecto del cultivo y las prácticas de manejo en las tasas de erosión. Es el factor que se utiliza más a menudo para comparar los impactos relativos de las opciones de manejo en los planes de conservación. El factor C indica cómo el plan de conservación afectará la pérdida promedio anual y cómo la pérdida potencial de suelo será distribuida en el tiempo durante las actividades de construcción, rotaciones de cultivo u otros esquemas de manejo.

El factor C se basa en el concepto de la desviación en relación a un estándar, en este caso un área limpia de cultivos y en barbecho continuo. La tasa de pérdida de suelo es entonces un estimado de la tasa de pérdida de suelo en las condiciones actuales en relación a aquella que se experimentaría bajo las condiciones de referencia.

“C” representa los efectos de las plantas, la cobertura del suelo, la biomasa del suelo y las actividades disturbadoras del suelo en los procesos de erosión. La RUSLE calcula las tasas de pérdida del suelo, que son las tasas de pérdida en un momento dado, en una secuencia de manejo de cobertura, en relación a la pérdida de suelo en la parcela unitaria. El valor del factor “C” es una tasa promedio ponderado con respecto al factor R durante el año.

La cobertura vegetal del suelo representa o mide el grado de protección ejercida por los cultivos. Los valores se pueden tomar, varían en función de la clase y calidad de estas coberturas, oscilando desde un mínimo 0.003 para coberturas densas y 0.45 para coberturas sin vegetación. Se obtiene a través del cuadro 6, que han sido elaboradas por distintos autores:

Cuadro 6: Valores de “C” según el uso de tierra.

Tipo y altura de la cobertura	Porcentaje de cubrimiento del suelo					
	Coeficiente C					
	0	20	40	60	80	95 - 100
cobertura de pastos bajos	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
cobertura de pastos y hierbas (0.5m)	0.36	0.17	0.09	0.038	0.012	0.003
Arbustos (2m)	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
Arboles (4m)	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003

Fuente: Suárez (2005).

2.4.5 Factor P o de Prácticas de Conservación de Suelos

Según Velásquez (2008), P es el factor de prácticas de control de erosión. El factor P de la RUSLE refleja el impacto que las prácticas de control tienen sobre la tasa de erosión.

Ineter (2005), nos dice que, este factor representa el efecto de mejores prácticas como cultivo en contorno o en bandas. Su valor depende de la pendiente del terreno y puede ser obtenido de tablas. Los valores de P varían entre 0 y 1. La determinación del factor P por efecto de incluir prácticas de conservación de suelos, son obtenidos de valores obtenidos en ensayos experimentales.

En la zona de estudio no se observan prácticas de este tipo, por lo que este factor no se ha considerado, pero citamos las tablas como referencia:

Cuadro 7: Valores de “P” para cultivos en contorno y su máxima longitud permitida entre obras.

Gradiente de Pendiente (%)	Factor P	Máxima longitud de pendiente (m)
1 – 2	0,60	120 – 180
3 – 5	0,50	90 – 100
6 – 8	0,50	60 – 65
9 – 12	0,60	40
13 – 16	0,70	25
17 – 20	0,80	20
21 – 25	0,90	15

Fuente: Wischmeier y Smith (1978), citado por Ineter (2005).

Cuadro 8: Valores de P para curvas a nivel.

Prácticas de conservación	Factor P
Cultivo a nivel $s = 0 - 1^\circ$	0,60
Cultivo a nivel $s = 2 - 5^\circ$	0,50
Cultivo a nivel $s = 6 - 7^\circ$	0,60
Cultivo a nivel $s = 8 - 9^\circ$	0,70
Cultivo a nivel $s = 10 - 11^\circ$	0,80
Cultivo a nivel $s = 12 - 14^\circ$	0,90

Fuente: Ramos (2001).

Cuadro 9: Valores de P para barreras con la distancia máxima entre obras.

Gradiente de Pendiente (%) ^s	Barrera		Distancia (m)
	Vivas P	Barreras Muertas P	
1 – 2	0,50	-	40
3 – 5	0,40	-	33
6 – 8	0,40	-	30
9 – 12	0,50	-	25
13 – 16	0,55	0,60	15
17 – 20	0,60	0,65	12
21 – 25	0,65	0,70	10
26 – 30	0,70	0,75	9
31 – 35	0,75	0,80	9

Fuente: Wischmeier y Smith (1978), citado por Ineter (2005).

2.4.6 Pérdida de Suelo (A)

Según Núñez (2001), el concepto de “las pérdidas tolerables”, o niveles aceptables de erosión, manejado objetivamente, puede ser instrumento valioso en la identificación de problemas erosivos y en la selección de métodos de control para minimizar las pérdidas. Naturalmente, la pérdida aceptable de suelo depende de las condiciones del mismo: si se trata de un suelo profundo con fertilidad similar a lo largo de todo el perfil, una pérdida de 25 mm en 30 años es mucho menos que si se trata de un suelo de pocos centímetros descansando sobre roca dura. En este caso la cifra tope excede raras veces 12,5 tm/ha/año; y frecuentemente es menor. En Estados Unidos son comunes objetivos de 2,5 a 12,5 tm/ha/año, y la Federación Centroafricana no admite más de 10 tm/ha/año para suelos arenosos y 12,5 tm/ha/año para suelos arcillosos (Hudson, 2006).

Cuadro 10: Niveles de intensidad de pérdida de suelo.

Intensidad de amenaza	Pérdida de suelo (tm/ha/año)	Pérdida de suelo (mm)
Baja	5 – 12	0,4 – 2
Media	12 – 25	2 – 5
Alta	mayor a 25	mayor a 5

Fuente: Wischmeier y Smith (1978).

El límite de erosión aceptado internacionalmente como admisible oscila en torno a las 10 –12 tm/ha/año, aunque se cree que en zonas húmedas esta cifra puede elevarse hasta las 25 tm/ha/año. Por encima de esta cifra no se garantiza la conservación de los suelos, ya que la destrucción es más rápida que la creación de suelo (Ramos, 2001).

Según los valores de erosión aceptables se clasifica la pérdida de suelo por erosión de acuerdo a los siguientes rangos:

Cuadro 11: Clasificación de los niveles de intensidad de pérdida de suelo. Pérdidas de suelo tolerables.

Intensidad de Amenaza	Pérdida de suelo (tm/ha/año)
Baja	Menor a 5
Moderada	5 – 25
Media	25 – 50
Alta	50 – 100
Muy Alta	100 – 200
Crítica	Más de 200

Fuente: Adaptado de FAO, UNESCO, PNUMA (1980), citado por Edeso (1997), Ramos (2001, 2009), Velásquez (2008) y Ramírez (2010).

2.5 Teledetección

Chuvieco (1996), Por Teledetección entendemos, de modo genérico, cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto con ella. Sin embargo, de un modo más restringido, y en el ámbito de las ciencias de la tierra, la teledetección es entendida como una técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde los satélites artificiales. Por otro lado Guzmán (2007), explica que la teledetección es una técnica a través de la cual se obtiene información de un objeto sin tener un contacto directo con él, esto es posible gracias a la relación sensor – cobertura, la cual se expresa a través de la llamada radiación electromagnética. Esta relación se puede presentar en tres formas: emisión, reflexión y emisión – reflexión, donde el flujo de energía que se produce por alguna de estas formas

va a estar en función de la transmisión de energía térmica y conductividad espectral propia de cada elemento en la naturaleza.

2.5.1 Características de los Datos de Teledetección

Romero (2006), menciona que el conjunto de los datos adquiridos mediante procedimientos de teledetección de aviones o naves espaciales comprenden siempre tres tipos de información:

- Una información espacial que representa la organización en el espacio físico de los elementos que constituyen la imagen.
- Una información espectral que caracteriza y puede conducir al conocimiento de la naturaleza de la superficie terrestre.
- Una información temporal que permite la detección de los cambios operados en la superficie de la Tierra con el transcurso del tiempo.

2.5.2 Aplicaciones de la Teledetección

Según Iturrate (1998), La teledetección se ha aplicado con bastante éxito y sobre todo, con la certeza de que será una tecnología importantísima a corto plazo, en áreas y aplicaciones como:

a) Meteorología

- Análisis de masas nubosas y su evolución.
- Modelización climática a diferentes escalas.
- Predicción de desastres naturales de origen climático.

b) Agricultura y Bosques

- Discriminación de tipos de vegetación: tipos de cultivo, tipos de madera, etc.
- Determinación del vigor de la vegetación.
- Determinación del rango de interpretabilidad y biomasa.
- Medición de extensión de cultivos y de maderas por especies.

- Clasificación de usos de suelos.

c) **Cartografía y Planeamiento Urbanístico**

- Cartografía y actualización de mapas.
- Categorización de la capacidad de la tierra.
- Separación de categorías urbana y rural.
- Planificación regional.
- Cartografía de redes de transporte.
- Cartografía de límites tierra – agua.
- Cartografía de fracturas.

d) **Geología**

- Reconocimiento de tipo de roca.
- Cartografía de unidades geológicas principales.
- Revisión de mapas geológicos.
- Delineación de rocas y suelos no consolidados.
- Cartografía de intrusiones ígneas.
- Cartografía de depósitos de superficie volcánica reciente.
- Cartografía de terrenos.
- Búsqueda de guías de superficie para mineralización.
- Determinación de estructuras regionales.
- Cartografía lineales.

e) **Recursos Hidrográficos**

- Determinación de límites, áreas y volúmenes de superficies acuáticas.
- Cartografía de inundaciones.
- Determinación del área y límites de zonas nevadas.
- Medida de rasgos glaciales.
- Medida de modelos de sedimentaciones y turbidez.

- Determinación de la profundidad del agua.
- Delineación de campos irrigados.
- Inventario de lagos.
- Detección de zonas de alteraciones hidrotermales.

f) Oceanografía y Recursos Marítimos

- Detección de organismos marinos vivos.
- Determinación de modelos de turbidez y circulación.
- Cartografía térmica de la superficie del mar.
- Cartografía de cambios de orilla.
- Cartografía de orillas y áreas superficiales.
- Cartografía de hielos para navegación.
- Estudio de mareas y olas.

g) Medio Ambiente

- Control de superficies mineras.
- Cartografía y control de polución de aguas.
- Detección de polución del aire y sus efectos.
- Determinación de efectos de desastres naturales.
- Control medioambiental de actividades humanas.
- Seguimiento de incendios forestales y sus efectos.
- Estimación de modelos de escorrentía y erosión.

2.5.3 Componentes de un Sistema de Teledetección

Los elementos básicos que influyen en la Teledetección son:

2.5.3.1 Fuente de Energía

Representa de donde proviene la radiación electromagnética que es captada por el sensor; provenientes desde un foco exterior al sensor (Sol), o emitida por el mismo.

2.5.3.2 Superficie Terrestre

Corresponde a todas las coberturas que se encuentran en la superficie terrestre, vegetación, agua, construcciones humanas, etc. Que absorben y reflejan la señal energética según sus propias características físicas.

2.5.3.3 Sistema Sensor

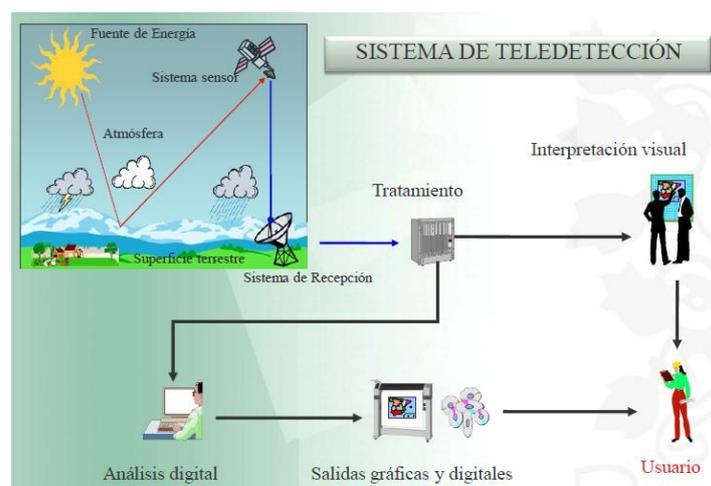
Compuesto por el sensor y la plataforma satelital en que se encuentra; es el que recepciona la información de las cubiertas, las codifica, las almacena y posteriormente las envía al Sistema de Recepción.

2.5.3.4 Sistema de Recepción

Recibe y Graba la información emitida por el satélite, realizándoles algunas correcciones y las distribuye.

2.5.3.5 Interpretación

Convierte la información según las necesidades propias, realizando tratamiento visual y digital, para el estudio que esté realizando.



Fuente: Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales Renovables

Figura 4: Componentes de un sistema de teledetección.

2.5.4 Fundamento Físico de la Teledetección

Teledetección es la técnica que permite obtener información a distancia de objetos sin que exista un contacto material, en nuestro caso se trata de objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que esta observación sea posible es necesario que, aunque sin contacto material, exista algún tipo de interacción entre los objetos y el sensor. En este caso la interacción va a ser un flujo de radiación que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor. Este flujo puede ser, en cuanto a su origen, de tres tipos:

- Radiación solar reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo reflejado)
- Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico)
- Radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar)

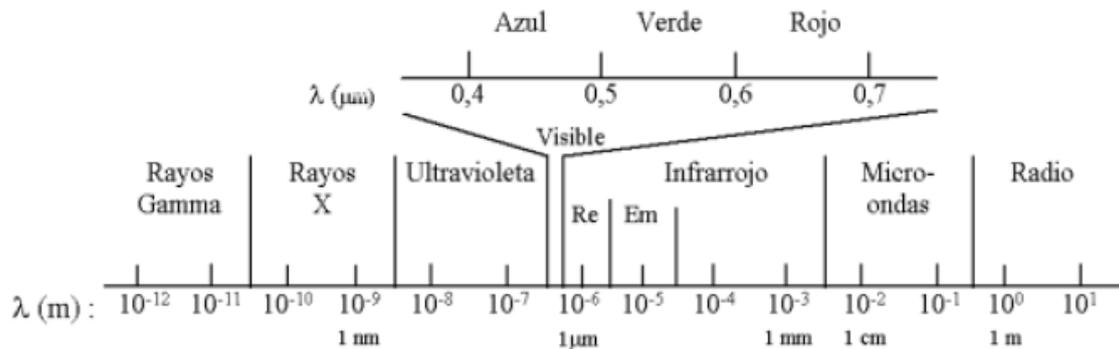
Las técnicas basadas en los dos primeros tipos se conocen como teledetección pasiva y la última como teledetección activa.

2.5.4.1 Radiación Electromagnética

Según Chuvieco (1996), el principio físico de la teledetección espacial, radica, en la interacción, de la radiación electromagnética entre la superficie de la tierra y el sensor remoto; y es definida como aquella energía que se mueve a través del espacio armónicamente en componentes eléctrico y magnético, los mismos que se encuentran perpendiculares entre sí. El flujo viaja a velocidad de la luz, en forma de ondas y compuesta por una sucesión de unidades discretas de energía denominados fotones o cuantos.

2.5.4.2 Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético se divide en regiones que se basan en longitudes de onda, que pueden ir desde los Rayos Gamma con longitudes de onda corta 10-12 μm , hasta las ondas de radio con longitudes de hasta kilómetros. Esas regiones antes nombradas se les denomina bandas, las cuales tienen sus propias frecuencias medidas en Hertz y longitudes de ondas que van desde los micrómetros hasta los kilómetros.



Fuente: Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales Renovables

Figura 5: Espectro electromagnético

A continuación se muestra un esquema del espectro electromagnético que representa las características de cada región espectral.

Cuadro 12: Características de la región espectral

Región Espectral (bandas)	Longitud de onda (λ)	Características
Rayos Gamma	< 0,03 nm	Radiación completamente absorbida por las capas superiores de la atmósfera. No se usa en teledetección
Rayos X	0,03 - 30 nm	Radiación completamente absorbida por la atmósfera. No se usa en teledetección
Ultravioleta	0,03 - 04 μ m	La radiación con $\lambda < 0,3 \mu$ m es completamente absorbida por la capa de ozono
Visible (azul, verde y rojo)	0,4 - 0,7 μ m	Se puede detectar a través de fotodetectores y películas fotosensibles normales (color y B/N).
Infrarrojo Próximo	0,7 - 1,3 μ m	Discrimina masas vegetales y concentraciones de humedad.
Infrarrojo Medio	1,3 - 8 μ m	Estima contenido de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.
Infrarrojo Térmico	8 - 14 μ m	detecta el calor proveniente de la mayor parte de la cubierta terrestre
Micro-Ondas	0,1 - 100 cm	Radiación de grandes longitudes de onda, capaces de penetrar nubes, nieblas y lluvia
Ondas de Radio	> 100 cm	Radiación con las mayores longitudes de onda del espectro. Usadas en telecomunicaciones

Fuente: Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales Renovables

2.5.5 Bandas Espectrales

Chuvieco (1996), explica que los diversos rangos de longitud de onda, que puede ser divididos o separados en el espectro electromagnético, reciben el nombre de región espectral o bandas espectrales, rangos que son útiles para identificar las características y

propiedades físicas de cualquier tipo de material que existe en la superficie de la tierra. En la teledetección las bandas espectrales de mayor uso son:

2.5.5.1 Espectro Visible

Chuvieco (2002), comprende longitudes de onda entre los 0.4 y 0.7 μm y reciben su nombre, por ser la única radiación electromagnética perceptible por el ojo humano; dividiéndose en tres bandas elementales: azul (0.4 – 0.5 μm), verde (0.5 – 0.6 μm) y rojo (0.6 – 0.7 μm) y acompañadas por una gama de tonalidades coloreadas.

2.5.5.2 El Infrarrojo

Chuvieco (2002), forma parte del electromagnético cuyo rango oscila entre los 0.7 hasta los 14 μm , dividiéndose a la vez en: el infrarrojo próximo, el infrarrojo medio y el infrarrojo termal.

2.5.5.3 Infrarrojo Próximo

Chuvieco (2002), abarca longitudes de onda entre 0.7 – 1.3 μm y se lo aplica principalmente, para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

2.5.5.4 Infrarrojo Medio

Chuvieco (2002), abarca longitudes de onda entre 1.3 – 8 μm y se utiliza para estimar el contenido de humedad en la vegetación y detectar focos de elevada temperatura.

2.5.5.5 Infrarrojo Lejano Térmico

Chuvieco (2002), abarca longitudes de onda entre 8 – 14 μm , que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

2.5.5.6 Microondas

Chuvienco (2002), son radiaciones electromagnéticas, cuyas longitudes de onda son mayores al milímetro (mm) y resulta de gran interés por ser transparentes ante la cubierta nubosa y a las gotas de agua.

2.5.6 Sensores Remotos

Es el instrumento que se encuentra en la plataforma satelital capaz de captar la energía procedente de la cubierta terrestre. Existen dos tipos de sensores:

2.5.6.1 Sensores Pasivos

Están limitados a recopilar y almacenar la energía electromagnética emitida por las cubiertas terrestres, que son reflejadas por los rayos solares o provenientes de su propia temperatura. Estos sensores se clasifican en: sensores fotográficos (cámaras fotográficas), sensores óptico-electrónicos (exploradores de barrido y empuje, y las cámaras de vidicon), y los sensores de antena (radiómetros de micro-ondas).

2.5.6.2 Sensores Activos

Tienen la capacidad de emitir su propio haz de energía, el que luego de la reflexión sobre la superficie terrestre es recibido por el satélite. El sensor más conocido es el Radar (radiómetro activo de micro-ondas), el que puede trabajar en cualquier condición atmosférica. El otro sensor conocido es el Lidar.

2.5.7 Resolución del Sensor Remoto

La resolución de un sistema sensor como su habilidad para discriminar información de detalle; depende del efecto combinado de todos sus componentes físicos del sistema.

2.5.7.1 Resolución Espacial

Es la capacidad que tiene el sensor de distinguir el objeto más pequeño sobre la imagen. Este objeto se visualiza en la unidad mínima de información representada en la imagen, al que se le denomina píxel (Píxel: es un elemento de una imagen de dos dimensiones, el cual es el más pequeño e indivisible de una imagen digital).

2.5.7.2 Resolución Espectral

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor.

2.5.7.3 Resolución Radiométrica

Relacionado con la sensibilidad del sensor, es decir, a su capacidad de detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Se expresa en el número de bits de cada uno de los elementos contenidos en la imagen. Generalmente es $2^8 = 256$ niveles por píxel.

2.5.7.4 Resolución Temporal

Frecuencia o periodicidad con que el sensor adquiere imágenes de la misma área de superficie terrestre, siempre en función de las características orbitales del satélite (altura, velocidad e inclinación) y de las características del sensor.

2.5.8 Imagen Satelital

Las Imágenes Satelitales están confeccionadas por matrices, en las que cada celda representa un píxel, las dimensiones de este píxel dependerá de la Resolución espacial del sensor. Los sensores registran la radiación electromagnética que proviene de las distintas coberturas y las almacena en cada píxel, de acuerdo a los intervalos de longitudes de onda, en las que este programado el sensor para captar.

Esta energía electromagnética es representada en cada píxel por un valor digital al cual se le agrega una tonalidad, este valor es llamado Nivel Digital (ND), la cantidad de niveles digitales que se podrá representar dependerá de la Resolución Radiométrica del sensor, para un sensor con Resolución Radiométrica de 8 bit los niveles digitales varían entre 0 y 255, siendo en la escala de grises el cero igual al color negro y el 255 igual al color blanco.

La posición de cada píxel en la imagen satelital está determinada por un eje de coordenadas XYZ.

X: N° de columna de la matriz.

Y: N° de fila de la matriz.

Z: Nivel digital (valor de intensidad de la escala de grises).

La asignación de colores más conocida por los usuarios es la del falso color convencional (R=Red (rojo); G=Green (verde); B=Blue (azul)), la cual asigna el color azul a la banda del verde, el color verde a la banda del rojo y el color rojo a la banda del infrarrojo cercano.

La información que se obtiene de las distintas bandas de las imágenes satelitales, son de gran ayuda en diversos ámbitos tales como:

- Agricultura y recursos forestales
- Uso de suelo
- Geología
- Recurso de agua
- Medio ambiente

2.5.9 El Formato Ráster

El modelo ráster divide el área de estudio en una agrupación de celdas cuadradas ordenadas en una secuencia específica. Cada una de estas celdas recibe un único valor

que se considera representativo para toda la superficie abarcada por la celda, por tanto se considera que el modelo ráster cubre la totalidad del espacio.

Un conjunto de celdas, junto con sus valores se denomina una capa ráster. Este modelo responde a una concepción del mundo como un continuo que puede describirse mediante un número de variables (altitud, pendiente, temperatura media, tipo de suelo, etc.) que toman valores diferentes en diferentes localizaciones definidas por un sistema de coordenadas. Cada variable se representa así mediante una capa. El modelo vectorial responde a una concepción del mundo basada en objetos con límites definidos.

2.5.9.1 Elementos que Componen una Capa Ráster

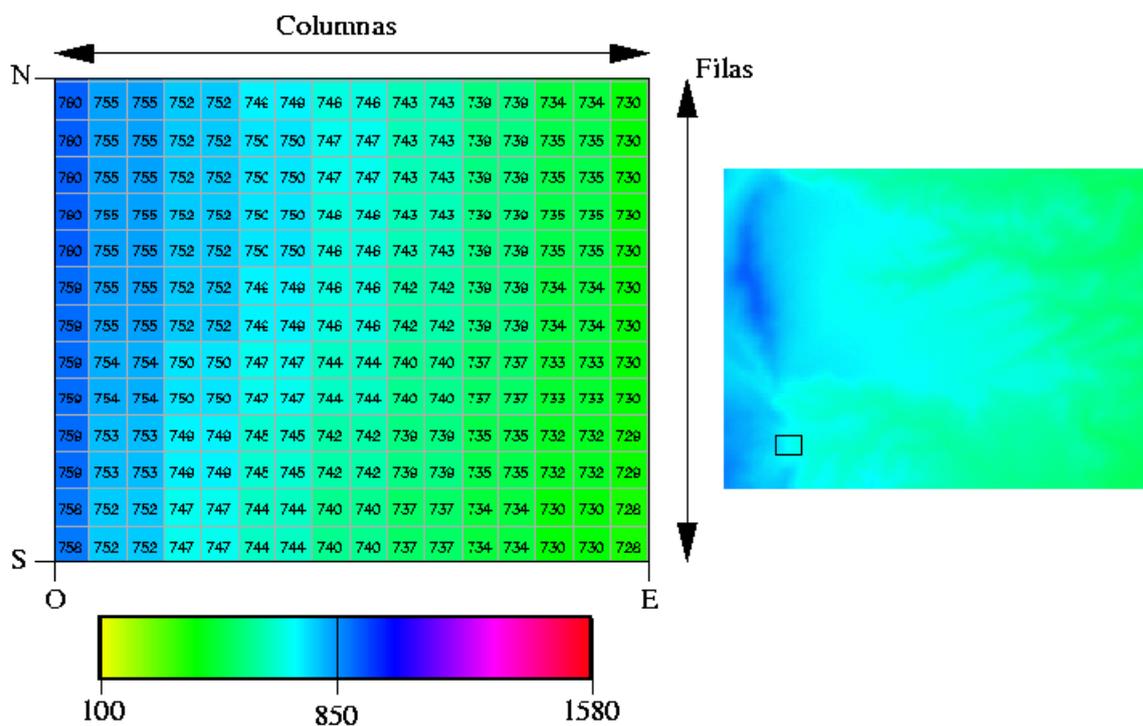
Una capa en formato ráster está compuesta por cuatro elementos fundamentales:

- a) La matriz de datos, que puede contener tres tipos de datos:
 - Valores numéricos en caso de que la variable representada sea cuantitativa (figura 7).
 - Identificadores numéricos en caso de que se trate de una variable cualitativa. Estos identificadores se corresponden con etiquetas de texto que describen los diferentes valores de la variable cualitativa (figura 8).
 - Identificadores numéricos únicos para cada una de las entidades representadas en caso de que la capa ráster contenga entidades (puntos, líneas o polígonos).

Aunque el formato ráster responde fundamentalmente a una concepción del mundo como conjunto de variables puede utilizarse también para representar entidades. Si suponemos un fondo en el que no exista nada (valor NULL en todas las celdillas) podemos representar objetos puntuales mediante celdillas aisladas con un valor (diferente de cero) que actuará normalmente como identificador; las líneas estarían constituidas por ristas de celdillas adyacentes con valores diferentes de cero, los polígonos por conjuntos de polígonos con un mismo valor diferente de cero (figura 5).

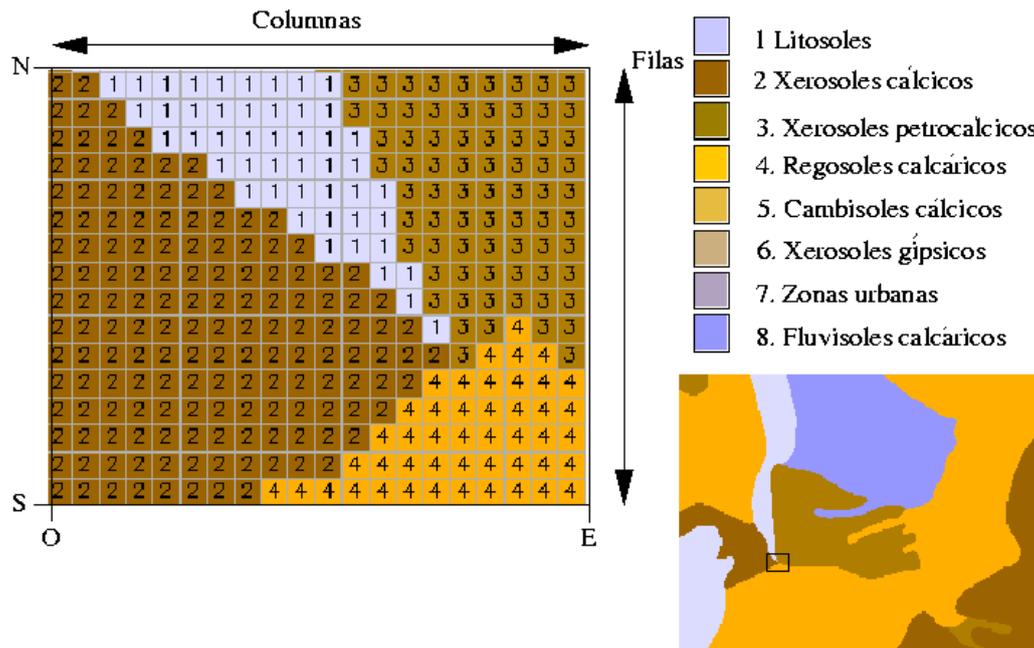
- b) Información geométrica acerca de la matriz y de su posición en el espacio:

- Número de columnas (nc)
 - Número de filas (nf)
 - Coordenadas de las esquinas de la capa (e, w, s, n)
 - Resolución o tamaño de píxel en latitud(rx) y en longitud(ry)
- c) Una tabla de colores que permita decidir de qué color se pintará cada celdilla en la pantalla.
- d) En caso de que la variable sea cualitativa, una tabla que haga corresponder a cada identificador numérico una etiqueta de texto descriptiva.



Fuente: Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales Renovables

Figura 6: Modelos digitales. Codificación de una variable cuantitativa en formato ráster



Fuente: Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales Renovables

Figura 7: Modelos digitales. Codificación de una variable cualitativa en formato ráster.

2.5.10 Tipos de Imágenes de Teledetección

Según Labrador (2012), El tipo de producto más común que suministran los satélites de teledetección es una imagen digital tipo ráster, donde cada píxel tiene asignado uno o varios valores numéricos (niveles digitales) que hacen referencia a la energía media recibida dentro de una determinada banda espectral. Teniendo esto en cuenta, se pueden adquirir los siguientes tipos de imágenes:

2.5.10.1 Imagen Multiespectral (MS)

Imagen que lleva asociados varios valores numéricos a cada píxel, tantos como bandas espectrales sea capaz de detectar el sensor. A priori, es el tipo de producto más útil ya que nos proporciona, en cierto modo, la firma espectral de los distintos elementos presentes en la imagen. Así, por ejemplo, el satélite IKONOS proporciona una imagen multiespectral con 4 bandas, que cubren las regiones espectrales correspondientes al azul, verde, rojo e infrarrojo próximo. Cuanto mayor sea el número de bandas que proporciona el sensor, mayor será la capacidad de análisis de los elementos presentes en la imagen.

Aparte de las multiespectrales también existen las denominadas **imágenes hiperespectrales**, menos habituales. Vienen caracterizadas por poseer información en un gran número de bandas. Se requieren para estudios de identificación y clasificación muy precisos, principalmente en mineralogía. A día de hoy provienen de algunos satélites de tipo experimental, como es el caso del sensor HYPERION (220 bandas), a bordo del satélite EO-1, por lo que su disponibilidad es bastante limitada.

2.5.10.2 Imagen Pancromática (PAN)

Dispone de una sola banda espectral que abarca comúnmente gran parte del visible y comienzo del infrarrojo, obteniendo como resultado una imagen que habitualmente se representa en una escala de grises (imagen en blanco y negro). Como contrapartida, tienen la ventaja de poseer mayor resolución espacial que las multiespectrales que proporciona el mismo satélite. Es por ello que son muy interesantes para la detección de pequeños elementos de la superficie terrestre que no son distinguibles en la imagen multiespectral.

En aquellos satélites donde existe la posibilidad de obtener imágenes multiespectrales y pancromáticas de forma simultánea es habitual la opción de suministrar, bajo pedido, ambas imágenes en lo que se conoce como opción Bundle.

2.5.10.3 Imagen Fusionada (PS)

Este tipo de imagen se obtiene mediante la fusión de una imagen multiespectral con una pancromática. Las siglas PS provienen de *pan-sharpened*, su denominación en inglés. Básicamente, consiste en asignar a cada píxel de la imagen pancromática los valores procedentes de un algoritmo que combina la imagen pancromática con la multiespectral. El resultado final es una imagen multiespectral con la resolución espacial de la pancromática. El inconveniente de este tipo de imágenes es que se modifica la información espectral original captada por los sensores a través de los algoritmos usados, por lo que se suelen utilizar únicamente como herramientas de interpretación visual y no para análisis espectral. Esta fusión se encuentra dentro de la oferta de los distribuidores oficiales de los satélites capaces de obtener una imagen multiespectral y pancromática. Dicha fusión, con el software adecuado, puede ser realizada por los usuarios.

2.5.10.4 Imagen Estéreo

En realidad se refiere a dos imágenes de una misma zona tomadas con ángulos de visión distintos. Muchos satélites tienen la capacidad de reorientar el sensor, lo que les permite tomar, en una o en sucesivas pasadas, este tipo de imágenes. Se suelen emplear para generar modelos de elevación del terreno.

2.5.11 Satélites de Teledetección

Según datos extraídos de la *Union of Concerned Scientists*, en la actualidad hay más de 900 satélites orbitando la Tierra, de los que la mayoría, aproximadamente un 60%, son de comunicaciones. Los satélites de teledetección son aproximadamente unos 120. Todos los años son varios los satélites de este tipo que se lanzan al espacio y otros tantos los que dejan de estar operativos, por lo que su número varía permanentemente.

En el futuro, el número de satélites de teledetección en órbita continuará aumentado, así como las constelaciones de satélites con sensores cada vez más perfeccionados para conseguir un mejor conocimiento de los fenómenos a observar.

En este documento únicamente se van a describir los satélites de teledetección que cumplan con las siguientes características:

- Que se encuentren operativos en la fecha de elaboración de esta publicación.
- Que posean una resolución espacial igual o superior a los 30 metros/píxel, aproximadamente.
- Que sus productos estén disponibles por alguna vía de comercialización relativamente sencilla.

Se han dejado fuera de este catálogo los sensores de microondas tipo RADAR. Estos presentan la ventaja de poder operar en casi cualquier situación meteorológica (nubosidad, lluvia ligera, etc.), sin embargo el procesamiento e interpretación de sus imágenes requiere una metodología muy diferente a la relatada en este documento.

Para cada uno de los satélites descritos, ordenados por orden alfabético, se ha intentado homogeneizar la información mostrada, aunque esto no siempre ha sido posible dada la gran disparidad de documentación existente sobre cada uno de ellos.

Cuadro 13: Características de los principales satélites utilizados en teledetección

Sensor	Res. Espacial	Tamaño de imagen	Res. Temporal	Res. Radiométrica	Res. Espectral
Meteosat	2500 m	Toda la esfera	0.5 horas	256 ND	1Vis 1Ir 1It
NOAA AVHRR	1100 m	2700 x 2700 km	12 horas	1024 ND	2Vis 1Ir 1It
Landsat TM	30 m	185 x 185 km	16 días	256 ND	3Vis 3Ir 1It
SPOT HRV	20 m	60 x 60 km	20 días	256 ND	2Vis 1Ir
SPOT Vegetation	1150 m	2200 x 2200 km	1 día	1024 ND	2Vis 2Ir
MODIS	250 – 100 m	2330 x 2330 km	1	1024 ND	36 Bandas
IKONOS	4 m	100 x 100 km	A petición	2048 ND	3Vis 1Ir

Fuente: Alonso (2006)

2.5.12 El Satélite Landsat

Rodríguez (2005), Indica que el programa Landsat es actualmente administrado por la NASA (Nacional Aeronautics and Space Administration) por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y por la USGS (United States Geological Survey). Este programa empezó sus investigaciones experimentales sobre los recursos naturales terrestres en 1962 con la contribución de algunas agencias federales de los Estados Unidos con el nombre de Programa Satelital ERTS (Earth Resource Technology Satellite). El éxito del programa se debe a factores como la combinación de sensores con bandas espectrales destinadas a la observación de la tierra, resolución espacial funcional y su gran cobertura en orbitas casi polares sincronizadas con el sol. Por otro lado Fernández y Herrero (2001), manifiesta que este sensor es el más empleado en aplicaciones agrícolas, forestales, usos de suelo, hidrológica, recursos costeros y monitorización medioambiental. Sobre todo está ligado a estudios territoriales en los que el parámetro fundamental es el medio ambiente. Sus principales características de la plataforma Landsat: resolución temporal, resolución espacial y resolución espectral.

Cuadro 14: Características de las imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS

LANDSAT 8 OLI/TIRS				
Dimensiones de la escena	185 x 185 km			
Resolución Temporal	16 días			
	Bandas Espectrales		Longitud de Onda	Resolución
Resolución Espectral	TM1	Aerosol Costero	0.43 – 0.45	30 m
	TM2	Azul	0.45 – 0.51	30 m
	TM3	Verde	0.53 – 0.59	30 m
	TM4	Rojo	0.64 – 0.67	30 m
	TM5	IRC	0.85 – 0.88	30 m
	TM6	IROC 1	1.57 – 1.65	30 m
	TM7	IROC 2	2.11 – 2.29	30 m
	TM8	Pancromática	0.50 – 0.68	15 m
	TM9	Cirrus	1.36 – 1.38	30 m
	Bandas Espectrales		Longitud de Onda	
	TM10	IRT 1	10.60 – 11.19	100 m
	TM11	IRT 2	11.50 – 12.51	100 m

Fuente: USGS (2013)

2.5.12.1 Bandas de Imágenes del Visible al Infrarrojo Medio

Landsat 8 ha estado en línea por pocos meses, y las imágenes se muestran increíbles. Mientras que todas las bandas de las misiones Landsat anteriores todavía se incorporan, hay un par de otras nuevas, como la banda costera azul de penetración del agua/aerosol, detección y la banda de nubes cirrus, para el enmascaramiento de nubes y otras aplicaciones. He aquí un resumen de algunas combinaciones de bandas más comunes aplicados para Landsat 8, se muestra como rojo, verde, azul (RGB).

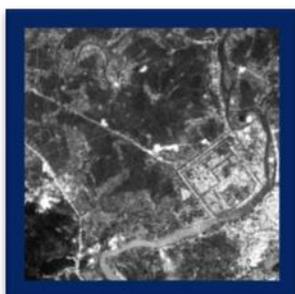


Figura 8: Banda Azul (TM 2): Provee máxima penetración en cuerpos de agua poco profundos.



Figura 9: Banda Verde (TM 3): Incluye el punto más alto de la luz visible de la vegetación verde, de modo que ayuda a valorar el vigor de las plantas y diferenciar vegetación verde y amarillenta.



Figura 10: Banda Rojo (TM 4): Debido a la fuerte absorción de la clorofila, la vegetación verde aparece más oscura que en otras bandas de luz visible. La intensidad de esta absorción puede ser usada para diferenciar diferentes tipos de plantas. La banda roja es también importante para determinar el color del suelo, y para identificar rojizas, rocas manchadas con hierro que son asociadas frecuentemente con depósitos de oro.



Figura 11: Infrarrojo Cercano (TM 5): La vegetación verde es mucho más brillante que en cualquiera de las bandas del visible. Un canal de irrigación es también muy evidente debido a la fuerte absorción por el agua y el contraste con campos vegetados más brillantes.

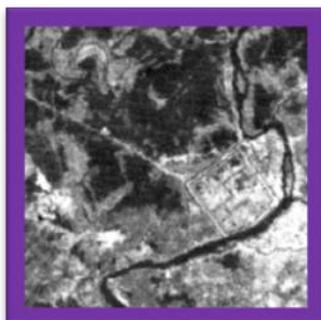


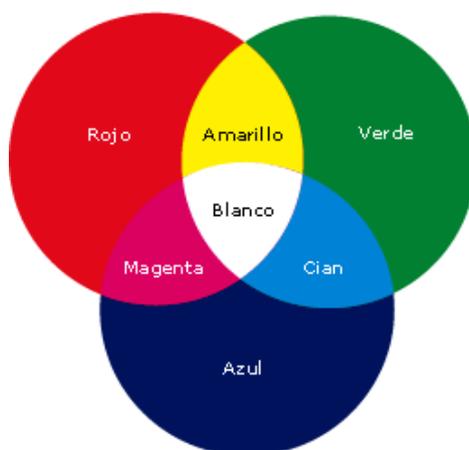
Figura 12: Infrarrojo Térmico, 10,60 – 11,19 μm (TM 10) Esta es una banda térmica, lo que significa que se puede utilizar para medir la temperatura de la superficie. Band 6 se utiliza principalmente para aplicaciones geológicas pero se usa para medir el estrés en algún momento de calor de la planta. Esto también se utiliza para diferenciar las nubes de suelos brillantes como las nubes tienden a ser muy frío.



Figura 13: Banda Pancromática, 0.5 a 0.75 μm (TM 8): La banda Pancromática es la mayor novedad del sensor ETM+ en el Landsat7. Su resolución espacial de 15 m registrado con las demás bandas, permite que las imágenes generadas a través de este sensor sean trabajadas para obtener ampliaciones hasta una escala de 1:25.000.

2.5.12.2 Combinaciones con las Bandas del Sensor Landsat

Según Fernández y Herrero (2001), explican que la combinación de bandas espectrales se lleva a cabo con el objeto de obtener una imagen FALSO COLOR, es decir, la aplicación de un color primario (rojo, verde, azul) a cada banda de la imagen.



Fuente: Fernández y Herrero (2001)

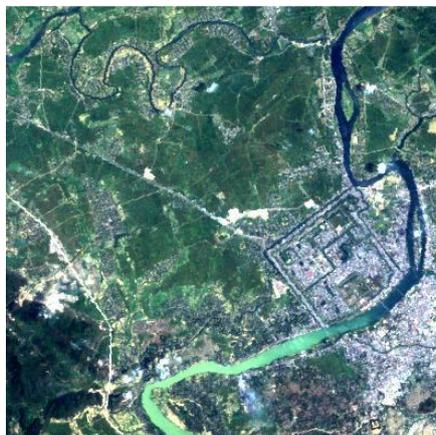
Figura 14: Colores básicos para la combinación

2.5.12.3 Combinación en Color Natural RGB 432 Bandas 4 – 3 – 2

Es la combinación más próxima a la percepción de la tierra con nuestros ojos desde el espacio, de ahí el nombre de color verdadero. Las bandas visibles dan respuesta a la luz que ha penetrado más profundamente, y por tanto sirven para discriminar el agua poco profunda y sirven para distinguir aguas turbias, corrientes, batimetría y zonas con sedimentos.

- El azul oscuro indica aguas profundas.
- El azul claro indica aguas de media profundidad.

- La vegetación se muestra en tonalidades verdes.
- El suelo aparece en tonos marrones y tostados.
- El suelo desnudo y la roca aparecen en tonos amarillentos y plateados.



Fuente: Smith (2001)

Figura 15: Combinación en color natural Rojo (TM 4) = R, Verde (TM 3) = G, Azul (TM 2) = B

2.5.12.4 Combinación en Falso Color RGB

Fernández y Herrero (2001), indican que se pueden utilizar cualquier combinación entre bandas, seleccionando tres a tres cada una de las bandas. A continuación se muestra una relación de las combinaciones más empleadas con indicación del tipo de ámbito habitual donde se emplean:

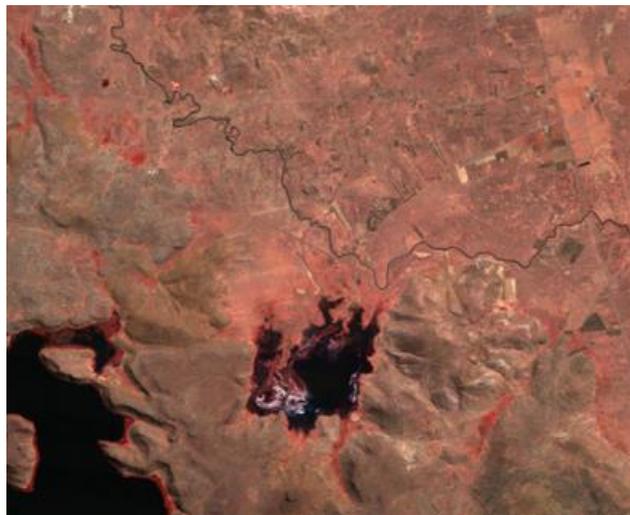
Cuadro 15: Combinación en falso color RGB

Combinación	Tipo de Estudio
432	Color Natural
764	Falso Color (Urbano)
543	Color Infrarrojo (Vegetación)
652	Agricultura
765	Penetración Atmosférica
562	Vegetación Saludable
564	Tierra / Agua
753	Natural con Remoción Atmosférica
754	Infrarrojo de Onda Corta
654	Análisis de Vegetación

Fuente: USGS (2013)

Gracias a las combinaciones de bandas podemos resaltar variaciones de color, textura, tonalidad y diferenciar los distintos tipos de cobertura que existen en la superficie, estas son las combinaciones de bandas más usadas:

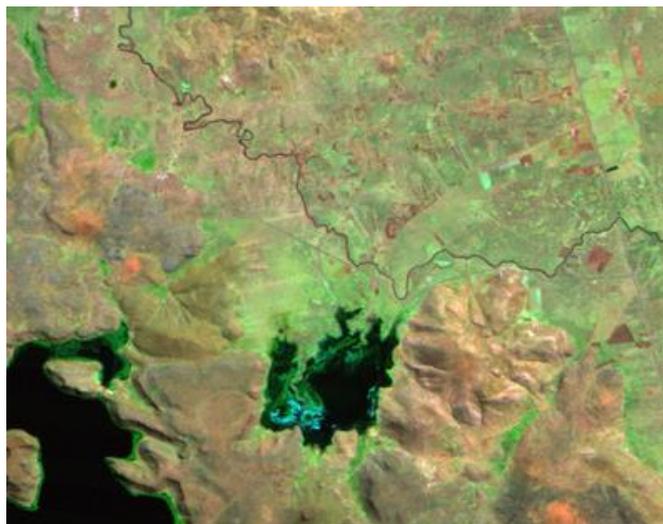
Bandas 5, 4, 3 (RGB): Tiene buena sensibilidad a la vegetación verde, la que aparece de color rojo, los bosques coníferos se ven de un color rojo más oscuro, los glaciares se ven de color blanco y el agua se ve de color oscuro debido a sus características de absorción.



Fuente: Propia

Figura 16: Combinación 5 – 4 – 3 (RGB)

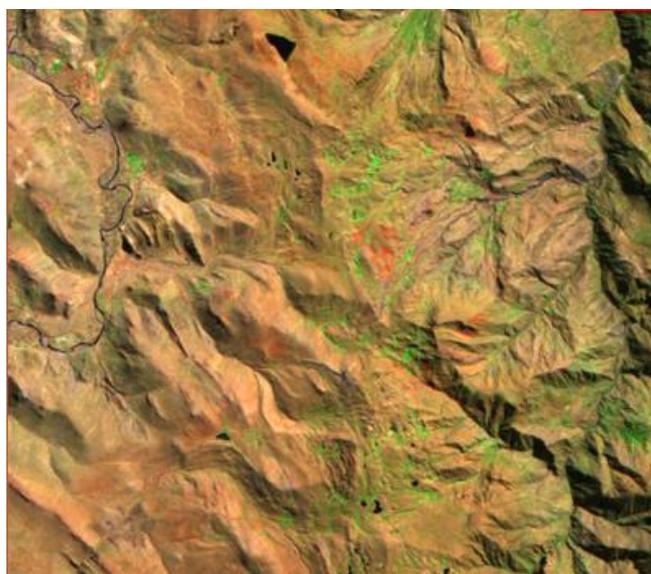
Bandas 8, 5, 2 (RGB): Esta combinación de bandas es ampliamente utilizada en geología. Utiliza las tres bandas menos correlacionadas entre sí. La banda 8, en rojo, cubre el segmento del espectro electromagnético en el que los minerales arcillosos absorben, más que reflejar, la energía; la banda 5, en verde, cubre el segmento en el que la vegetación refleja fuertemente; y la banda 2, en azul, abarca el Segmento en el cual los minerales con óxidos de hierro absorben energía.



Fuente: Propia

Figura 17: Combinación 8 – 5 – 2 (RGB)

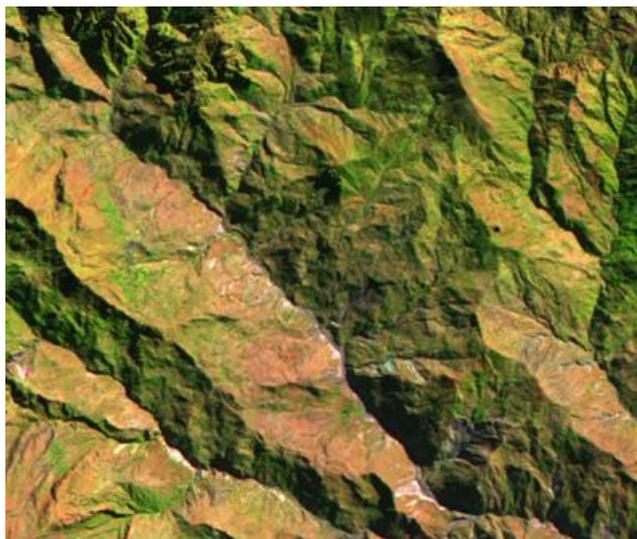
Bandas 8, 5, 3 (RGB): Permite discriminar los tipos de rocas. Ayuda en la interpretación estructural de los complejos intrusivos asociados a los patrones volcánico – tectónicos.



Fuente: Propia

Figura 18: Combinación 8 – 5 – 3 (RGB)

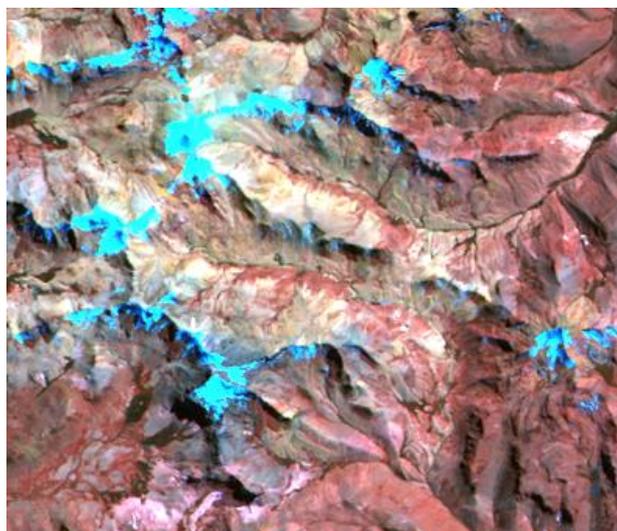
Bandas 5, 4, 3 (RGB): En esta combinación la vegetación aparece en distintos tonos de color verde.



Fuente: Propia

Figura 19: Combinación 5 – 4 – 3 (RGB)

Bandas 8, 4, 2 (RGB): Ayuda a diferenciar tipos de rocas, definir anomalías de color que generalmente son de color amarillo claro algo verdoso, la vegetación es verde oscuro a negro, los ríos son negros y con algunas coloraciones acules a celestes, los glaciares de ven celestes.



Fuente: Propia

Figura 20: Combinación 8 – 4 – 2 (RGB)

2.5.13 Técnicas de Tratamiento Digital de Imagen

Montesinos (1990), manifiesta que el tratamiento digital es el conjunto de transformaciones numéricas realizadas sobre la matriz original para obtener representaciones más adecuadas de la imagen, según las aplicaciones. Mediante el tratamiento digital se pretende extraer la información contenida en los datos aportados por las imágenes de satélite tomadas por los sensores.

2.5.13.1 Correcciones Radiométricas

Sobrino et al., (2000), Indica que estas correcciones permite eliminar los problemas radiométricos derivados de un mal funcionamiento del sensor, el efecto de la inclinación del satélite o de la posición del sol, o incluso el estado de la atmosfera, de tal forma que las medidas tomadas por el satélite sean comparables entre sí, aun cuando se hayan realizado en condiciones muy diversas. Chuvieco (2002), manifiestan que son técnicas que modifican los niveles digitales (ND) originales, con el objetivo de medir la respuesta espectral de cualquier objeto de la superficie terrestre en la imagen con una recepción ideal. La conversión de ND almacenados en una imagen original a variables físicos es un paso previo que resulta de gran utilidad en múltiples fases de la interpretación de imágenes, ya que permite trabajar con variables físicas de significado estándar, comparables en un mismo sensor a lo largo del tiempo, entre distintos sensores y entre la teledetección espacial y otros métodos de detección de energía electromagnética.

2.5.13.2 Corrección Geométrica

Usualmente la información obtenida de sensores remotos presenta errores geométricos de origen sistemático, aquellos que pueden ser corregidos utilizando la información desde la plataforma y conociendo la distorsión interna del sensor, y no sistemático, aquellos que no pueden ser corregidos con una precisión aceptable sin un número suficiente de puntos de control terrestre. Entre las causas de errores geométricos de origen sistemático se puede mencionar la velocidad de la plataforma y la rotación de la tierra. Por otro lado, las distorsiones de origen no sistemático incluyen los errores producto de la altitud y posición del sensor (Bernstein, 1983; citado por Jensen, 1996).

La mayoría de la información de sensores remotos comerciales entregan los datos con los errores sistemáticos previamente corregidos, permaneciendo los errores no sistemáticos en la imagen. Para corregir estos errores se puede recurrir a dos procedimientos comunes, estos son la rectificación imagen a imagen, y la rectificación imagen a mapa (Jensen, 1996).

2.5.13.3 Mejoramiento Espectral

En este estudio se considerarán mejoramientos espectrales a aquellas técnicas que permitan mejorar la disposición de los datos satelitales para su análisis cuantitativo.

a) Índice de Vegetación

Para estudiar la cobertura vegetal de una zona mediante imágenes de satélites, se han desarrollado diversas técnicas que permiten tener datos cualitativos y cuantitativos del estado de vegetación. Los índices de vegetación son técnicas que transforman las imágenes originales reduciendo directamente en cada pixel el número de sus bandas a un solo dato de información. Básicamente estos índices se fundamentan en el fuerte contraste existente entre la reflectancia expresada en rango de valores de menor a mayor. En las plantas con actividad fotosintética, las moléculas de clorofila responsables de esta función absorben la luz roja, por lo tanto reflejan elementos como nubes, nieve, agua, zonas de suelo sin cobertura y rocas, mientras que las células de las hojas en un estado de turgencia normal reflejan la mayor parte de la radiación infrarroja que reciben (Yague, et al. 1999 citado por Chuvieco (1996).

Entonces una de las transformaciones aplicadas al estudio de vegetación, es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). La combinación de las bandas infrarroja cercana (4) y roja (3) para el sensor TM es utilizada para la construcción del NDVI. Este resultado permite visualizar a través de los valores de niveles digitales una discriminación más clara de la vegetación. Existe un rango de valores que es la respuesta de la magnitud espectral que se obtiene del NDVI este oscila entre (-1) a (+1); encontrándose para cubiertas vegetales valores en torno a 0.2. Sin embargo los valores positivos que se muestran en la imagen indican menor reflectancia correspondiendo a

zonas de vegetación. Mientras que los valores negativos, generados por una mayor reflectancia mas en el rojo que en el infrarrojo pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo sin cobertura y rocas (Chuvienco, 1996).

La fórmula para poder calcular el índice NDVI para el satélite Landsat TM es el siguiente:

$$NDVI = \frac{Banda\ 4 - Banda\ 3}{Banda\ 4 + Banda\ 3}$$

Donde: Banda 4 = Infrarrojo cercano
 Banda 3 = Rojo visible

2.5.14 Clasificación Digital de la Imagen

Es el proceso mediante el cual los píxeles de una imagen satelital multibanda son etiquetados según la categoría a la que pertenecen. A partir de esta imagen puede generarse una cartografía temática y el inventario estadístico de la superficie involucrada en cada categoría (Chuvienco, 1996).

La clasificación digital distingue las siguientes fases:

- 1) Definición digital de las categorías (fase de entrenamiento).
- 2) Agrupación de los píxeles en una de esas categorías (fase de asignación).
- 3) Comprobación y verificación de resultados.

2.5.14.1 Fase de Entrenamiento

La clasificación digital comienza con la definición de las categorías que se pretenden distinguir en la imagen. Se trata de una clasificación basada en los valores numéricos. Por lo tanto se trata de obtener el rango de ND que identifica a cada

categoría para todas las bandas que intervienen en la clasificación.

Las distintas categorías no se definen solo por un ND sino por un conjunto de ND próximos entre sí. Existe una cierta dispersión en torno al ND medio de cada categoría. Por esto la fase de entrenamiento trata de definir con rigor cada una de las categorías que se pretenden distinguir teniendo en cuenta su dispersión en la zona de estudio.

Esto se consigue seleccionando una muestra de píxeles en la imagen que representen adecuadamente a cada categoría. A partir de estos se determina el ND medio de cada clase y el rango en el que varían, para todas las bandas que intervienen en la clasificación. Las estimaciones posteriores se basan sobre la muestra seleccionada por lo cual conviene seleccionarla adecuadamente ya que los resultados de la clasificación están mucho más influidos por la definición previa de las categorías, que por el criterio por el cual éstas son diferenciadas en la imagen.

Los métodos de clasificación se pueden distinguir en dos grupos: supervisado y no supervisado. El método supervisado parte de un conocimiento previo del terreno del cual se seleccionan las muestras para cada una de las diferentes categorías. En cambio, en el método no supervisado se buscan automáticamente grupos de valores espectrales homogéneos en la imagen para que después el usuario intente encontrar las correspondencias entre esos grupos seleccionados automáticamente y las categorías que le puedan ser de interés.

a) Clasificación supervisada

Este método de entrenamiento requiere un cierto conocimiento de la zona de estudio que permite delimitar sobre la imagen unas zonas o áreas representativas de las distintas categorías que se pretenden discriminar. Estas áreas se conocen como training fields (áreas de entrenamiento) ya que sirven para entrenar al ordenador para que pueda reconocer las distintas categorías. A partir de estas áreas el ordenador calcula diversos parámetros estadísticos de los ND que definen cada clase, para luego clasificar el resto de píxeles en una categoría determinada atendiendo a sus ND. Resulta adecuado

seleccionar varias áreas de entrenamiento por clase para reflejar correctamente su variabilidad en la zona de estudio.

Una vez acabada la selección de las áreas de entrenamiento, el ordenador debe proceder a calcular las estadísticas elementales de cada categoría: media, rango, desviación típica, matriz de varianza – covarianza, etc., a partir de los ND de todos los píxeles incluidos en el área de entrenamiento de dicha clase. Este cálculo es aplicado a cada banda espectral. Las medidas extraídas a partir de los ND de cada área de entrenamiento definen a cada clase, por lo tanto es muy importante su correcta selección ya que de otro modo se forzaría al ordenador a clasificar áreas heterogéneas.

Un sencillo ejemplo ilustra lo descrito anteriormente. Disponemos de una imagen en la que se desean distinguir 3 clases: viñedo, campos de cereales y encinar. La primera opción a la hora de definir áreas de entrenamiento sería seleccionar una por cada categoría. A partir de estas áreas de entrenamiento, el ordenador calcularía una serie de parámetros estadísticos que serían los que definirían a esa determinada clase.

La selección de áreas de entrenamientos sería incorrecta si alguna de estas se situara entre dos o más categorías ya que al tratarse de un área heterogénea, sus medidas estadísticas serían una cierta media entre las distintas clases. Otro error que se podría cometer sería seleccionar únicamente como áreas de entrenamiento aquellas zonas de la cubierta donde esta sea muy homogénea ya que entonces estaríamos dejando pasar la variación real que tenga dicha cubierta. Por ejemplo, al clasificar el encinar deberíamos seleccionar como áreas de entrenamiento tanto zonas donde el encinar aparezca con una densidad mayor como zonas donde la densidad sea menor.

Respecto al tamaño que deben tener las áreas de entrenamiento, se requiere que tengan un tamaño de $m + 1$ píxeles por categoría, siendo m el número de bandas espectrales que intervienen en la clasificación. Es conveniente de todos modos superar ampliamente este mínimo. Además, es mejor elegir varias áreas de pequeño tamaño que una sola de mayores dimensiones. Otros métodos que se pueden utilizar son seleccionar píxeles aislados de cada categoría o señalar píxeles puros en torno a los cuales el

ordenador crea una parcela de modo automático en función de la distancia o la similitud espectral (o ambas) de los píxeles vecinos del inicialmente seleccionado.

b) Clasificación no supervisada

Este método de clasificación trata de definir las clases espectrales presentes en la Imagen. No implica ningún conocimiento previo del área de estudio por lo que la intervención humana se centra en la interpretación de los resultados.

Este método asume que los ND de la imagen se agrupan en una serie de conglomerados (o clusters) que se corresponden con grupos de píxeles con un comportamiento espectral homogéneo y que, por ello, deberían definir unas clases informacionales de interés. Por desgracia estas clases espectrales no pueden ser asimiladas siempre a las categorías temáticas que el usuario pretende deducir por lo que es labor de éste interpretar el significado temático de dichas categorías espectrales.

El método para definir los grupos con un comportamiento espectral similar es muy parecido a otras técnicas de clasificación automática de datos. Se basa en la selección de tres parámetros: variables que intervienen en el análisis, criterio para medir la distancia o similitud entre casos, y un criterio para agrupar los casos similares. En nuestro caso las variables serían las diferentes bandas espectrales. Los casos son los píxeles que componen la imagen y cada uno de ellos está definido por tantos ND como bandas tengamos. Lo que trata este método es encontrar grupos de píxeles con ND parecidos para asignarlos a alguna de las categorías temáticas que deseemos.

La delimitación de cada grupo espectral se inicia señalando dos criterios: uno que marque la similitud entre píxeles, y otro que marque las condiciones del proceso de agrupamiento. Para el primero, el método más utilizado se basa en la distancia euclídea aunque se pueden utilizar otros criterios como el de la distancia media o la de Mahalanobis. En cuanto al algoritmo de agrupamiento, el más extendido es el denominado ISODATA.

2.5.14.2 Fase de Asignación

En este momento vamos a exponer los principales algoritmos de clasificación. Desde un punto de vista estadístico, todos los algoritmos definen un área de dominio de cada clase en torno a su centro mediante un conjunto de funciones. Un determinado píxel será asignado a una clase si sus ND se encuentran dentro de los límites establecidos para dicha clase.

a) Clasificador de Mínima Distancia

El criterio más sencillo para clasificar un píxel en una categoría es incluirlo en la más cercana a él, es decir, en aquella que minimice la distancia entre ese píxel y el centroide de clase. Esta distancia no es una distancia geográfica sino espectral consecuencia de comparar los ND de cada píxel con los del centro de las distintas categorías, para todas las bandas que intervienen en el análisis.

Existen varias formas de medir esta distancia espectral entre píxeles y clases pero la más empleada es la distancia euclídea:

$$d_{ai} = \sqrt{\sum_{k=0}^n (X_{ak} - \bar{X}_{ki})^2}$$

Donde:

d_{ai} = distancia del píxel “a” a la clase “i”.

X_{ak} = componente “k” del píxel “a”.

\bar{X}_{ki} = componente k de la media de los píxeles de la clase i.

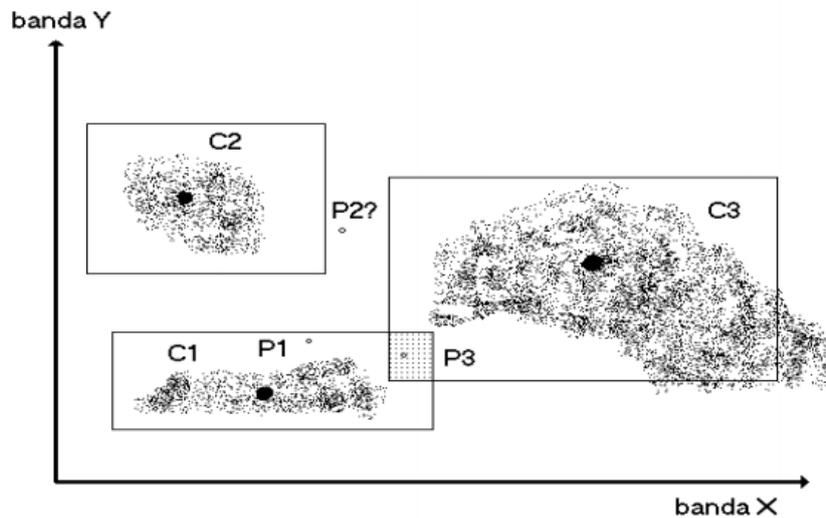
b) Clasificador de Paralelepípedos

En este método, el usuario fija un área de dominio para cada categoría teniendo en cuenta sus valores de centralidad y dispersión. Posteriormente cada píxel será asignado a una clase si sus ND están dentro del área de dominio de esa clase, para todas las bandas que intervienen en la clasificación. El píxel x será asignado a la clase A si sus ND en las distintas bandas (ND x,k) están incluidos en el área de dominio de esa clase:

$$\overline{ND}_{A,n} - R_{A,n} \leq ND_{x,n} \leq \overline{ND}_{A,n} + R_{A,n}$$

Para todo $n = 1, 2, 3, \dots, N_{bandas}$

$R_{A,n}$ = rango de dispersión señalado para la categoría A en cada banda n.



Fuente: Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales Renovables

Figura 21: Clasificador de paralelepípedos.

Este algoritmo es muy rápido de ejecutar ya que solamente necesita operadores condicionales del tipo IF... THEN. Pero presenta ciertos problemas inherentes al diseño de las áreas de dominio ya que pueden existir ciertos píxeles que queden sin clasificar y otros que se encuentren en zonas comunes a dos o más categorías. En este último caso el ordenador asignará este píxel a la clase que se encuentre antes en el algoritmo de

clasificación, aunque se puede utilizar conjuntamente el algoritmo de mínima distancia para evitar el solape. La solución para los píxeles sin clasificar es ampliar el rango de dispersión y repasar la definición espectral de las categorías ya que la presencia de píxeles no clasificados indica que las clases no están bien definidas o no incluidas en la leyenda de trabajo.

c) Clasificador de Máxima Probabilidad

Este método considera que los ND de cada categoría se ajustan a una distribución normal. Esto nos permite describir esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. Así podemos calcular la probabilidad de que un determinado píxel pertenezca a una categoría; el cálculo se realiza para todas las categorías definidas y el píxel se clasifica en clase a la cual tenga más probabilidad de pertenecer.

Este clasificador es el más complejo y, por lo tanto, el que mayor volumen de cálculo requiere, pero es el más robusto y fiable ya que se ajusta fielmente a la distribución original de los datos.

Para calcular la probabilidad asociada a un cierto ND se necesita la media y la desviación típica de cada categoría. En el caso de trabajar con una sola banda la probabilidad se calcula de la siguiente forma:

$$p(x/A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_A^2}} e^{\left\{-\frac{(ND_x - \overline{ND}_A)^2}{2\sigma_A^2}\right\}}$$

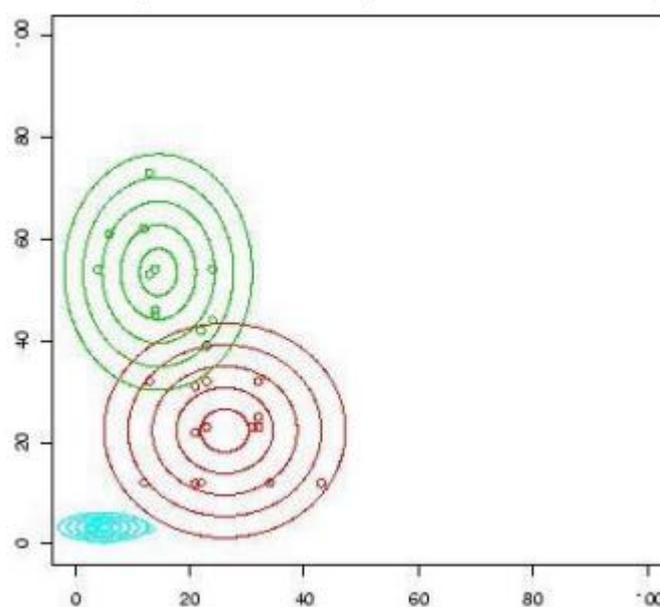
- $p(x/A)$ = probabilidad de que un cierto píxel x (definido por ND_x)
pertenezca a la clase A
- \overline{ND}_A = media de la clase A
- σ_A^2 = varianza de la clase A

Una vez determinada la probabilidad para todas las categorías el píxel será asignado a la clase A, sólo si:

$$p(x/A) \geq p(x/B)$$

$\forall A \neq B$, con $B = 1, 2, 3, \dots, m$; $m =$ número de categorías

Para el caso de dos bandas, los límites de las categorías tienen una forma elipsoidal (Fig. xx). Cada una de estas elipses es una línea de isoprobabilidad, es decir todos sus puntos tienen la misma probabilidad de pertenecer a la categoría asociada.



Fuente: Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales Renovables

Figura 22: Extensión a dos bandas del algoritmo de máxima probabilidad

Con más de dos bandas resulta imposible representar gráficamente este criterio de clasificación y se debe extender la fórmula de la probabilidad. Una vez que el ordenador haya asignado los píxeles puede establecerse algún criterio que permita asignarlos a una clase sólo si la probabilidad correspondiente es superior a determinado umbral. Este criterio asume que las categorías presentan una distribución normal; sin embargo, la hipótesis de que los datos de reflectividad siguen una distribución normal no siempre se cumple y debería verificarse siempre.

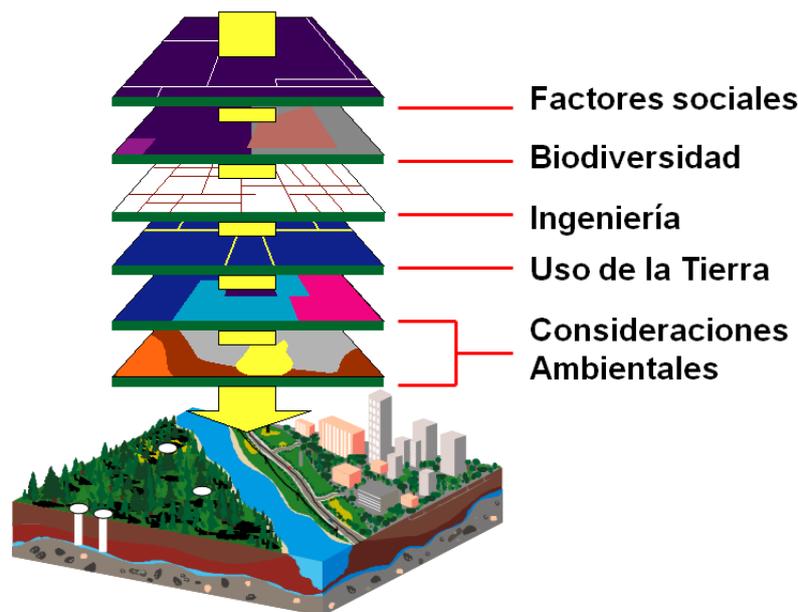
2.6 Sistema de Información Geográfica SIG

Peña (2006), Los S.I.G. son una nueva tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial, y que surgió como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato.

Es realmente complejo explicar el concepto de S.I.G. y no hay un consenso a la hora de definir un S.I.G., debido a que integra dentro de un mismo concepto tanto los componentes como las funciones. Asimismo, existen otras muchas definiciones de S.I.G., algunas de ellas acentúan su componente de base de datos, otras sus funcionalidades y otras enfatizan el hecho de ser una herramienta de apoyo en la toma de decisiones; pero todas coinciden en que se trata de un sistema integrado para trabajar con información espacial, herramienta esencial para el análisis y toma de decisiones en muchas áreas del conocimiento.

Como “Sistema de Información” se entiende la unión de la información y herramientas informáticas (programas o software) para su análisis con unos objetivos concretos. Por otra parte, al incluir el término “Geográfica” se asume que la información es espacialmente explícita, es decir, incluye la posición en el espacio.

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



Fuente: Peña (2006)

Figura 23: Ejemplo de SIG

2.6.1 Aplicaciones de los S.I.G.

Peña (2006), Un Sistema de Información Geográfica es una herramienta que permite la integración de bases de datos espaciales y la implementación de diversas técnicas de análisis de datos. Por tanto, cualquier actividad relacionada con el espacio, puede beneficiarse del trabajo con S.I.G. Entre las aplicaciones más usuales destacan:

- **Científicas:** ciencias medioambientales y relacionadas con el espacio, desarrollo de modelos empíricos, modelización cartográfica, modelos dinámicos y teledetección.
- **Gestión:** cartografía automática, información pública, catastro, planificación física, ordenación territorial, planificación urbana, estudios de impacto ambiental, evaluación de recursos y seguimiento de actuaciones.
- **Empresarial:** marketing, estrategias de distribución, planificación de transportes y localización óptima.

Aunque, todas estas disciplinas utilicen los S.I.G. para resolver cuestiones distintas, todas realizan y ejecutan tareas comunes, siendo estas:

Organización de datos: almacenar datos con el fin de sustituir una mapoteca analógica (mapas físicos en papel) por una mapoteca digital (mapas en el ordenador) posee ventajas obvias, entre las cuales pueden ser citadas una reducción en el espacio físico; el fin del deterioro de los productos en papel; la rápida recuperación de los datos; la posibilidad de producir copias sin pérdida de calidad; y otras más.

Visualización de datos: la posibilidad de seleccionar los niveles de información deseados; de acuerdo con el contexto, permite acoplar los mapas temáticos elegidos superándose cualquier producto en papel. La capacidad de análisis del ojo humano, a pesar de estar subestimada, es esencial en un estudio que implica información espacial.

Producción de mapas: en general los S.I.G. poseen herramientas completas para la producción de mapas, siendo bastante simples la inclusión de rejillas de coordenadas, escala gráfica y numérica, leyenda, flecha norte y textos diversos, siendo mucho más indicados para la cartografía que los simples sistemas C.A.D. (*Computer-Aided Design*).

Consulta espacial: posiblemente la función más importante de los S.I.G es la posibilidad de preguntar cuáles son las propiedades de un determinado objeto, o en qué lugares tienen tales propiedades. La interacción entre el usuario y los datos se convierte en dinámica y extremadamente poderosa.

Análisis espacial: consiste en el uso de un conjunto de técnicas de combinación entre los niveles de información (capas), con el fin de evidenciar patrones o establecer relaciones dentro de los datos que quedaban anteriormente ocultos al analista. Es una manera de inferir significado a partir del cruce de los datos.

Previsión: uno de los propósitos de los S.I.G. es el de verificación de escenarios, modificando los parámetros para evaluar cómo los eventos, naturales o no, ocurrirían si las condiciones fuesen diferentes, obteniendo un conocimiento más general de los objetos o el área en estudio.

Creación de modelos: la capacidad de almacenamiento, recuperación y análisis de datos espaciales convierte a los S.I.G. en plataformas ideales para el desarrollo y aplicación de modelos distribuidos espacialmente, y para la validación de escenarios hipotéticos.

2.6.2 Componentes de un S.I.G.

Peña (2006), Los componentes necesarios para llevar a cabo las tareas de un S.I.G. son los siguientes:

Usuarios: Las tecnologías S.I.G. son de valor limitado sin los especialistas en manejar el sistema y desarrollar planes de implementación del mismo. Sin el personal experto en su desarrollo, la información se desfasa y se maneja erróneamente, y el hardware y el software no se manipulan con todo su potencial.

Software: Los programas S.I.G. proporcionan las herramientas y funcionalidades necesarias para almacenar, analizar y mostrar información geográfica. Los componentes principales del software S.I.G. son:

- Sistema de manejo de base de datos.
- Una interface gráfica de usuarios (IGU) para el fácil acceso a las herramientas.
- Herramientas para captura y manejo de información geográfica.
- Herramientas para soporte de consultas, análisis y visualización de datos geográficos.

Actualmente la mayoría de los proveedores de software S.I.G. distribuyen productos fáciles de usar y pueden reconocer información geográfica estructurada en muchos formatos distintos.

Hardware: Los S.I.G. funcionan en un amplio rango de tipos de ordenadores desde equipos centralizados hasta configuraciones individuales o de red. Esta organización requiere de hardware específico para cumplir con las necesidades de cada aplicación.

Datos: El componente más importante para un S.I.G. es la información. Se requieren buenos datos de soporte para que el S.I.G. pueda resolver los problemas y contestar a las preguntas de la forma más acertada posible. La consecución de buenos datos generalmente absorbe entre un 60 y 80 % del presupuesto de implementación del S.I.G., y la recolección de los datos es un proceso largo que frecuentemente demora el desarrollo de productos que son de utilidad. Los datos geográficos y alfanuméricos pueden obtenerse por recursos propios u obtenerse a través de proveedores de datos. Mantener, organizar y manejar los datos debe ser política de la organización.

Métodos: Para que un S.I.G. tenga una implementación exitosa debe basarse en un buen diseño y en unas reglas de actividad definidas, que son los modelos y las prácticas operativas exclusivas en cada organización.

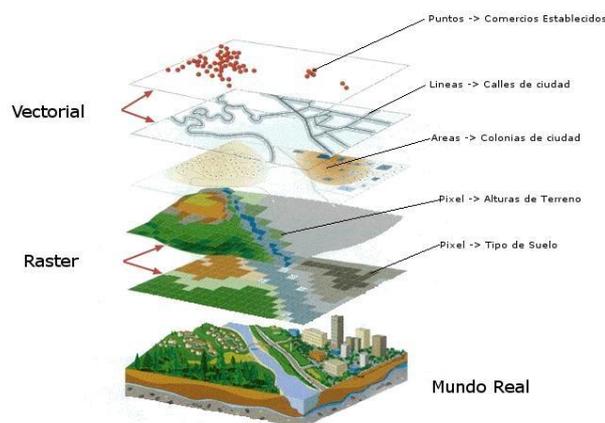
2.6.3 Modelo de Datos Espaciales en un SIG

2.6.3.1 Modelo Vectorial

La estructura del vector de datos es una abstracción del mundo real donde los datos de posición se representan en formas de coordenadas. En los datos vectoriales, las unidades básicas de información espacial son puntos, líneas y polígonos. Cada una de estas unidades está compuesta simplemente como una serie de uno o más puntos de coordenadas. Skidmore (2002).

2.6.3.2 Modelo ráster

La estructura ráster consiste en la representación de nuestro mundo real o la representación de este en una grilla compuesta de celdas (pixel). Esta serie de datos ráster, basados en celdas, está orientado para representar fenómenos tradicionalmente geográficos que varían continuamente en el espacio, como la elevación, inclinación o precipitación. Pero además pueden ser utilizadas para representar tipos de información menos tradicionales, tales como densidad de población, comportamiento del consumidor y otras características demográficas. Achuy (2006).



Fuente: Achuy (2006)

Figura 24: Modelo de datos ráster y vectorial

2.6.4 Ventajas y Requerimientos de un SIG:

Según Núñez y García (2000), las principales ventajas y requerimientos de un SIG son los siguientes:

- Los SIG posibilitan la integración de fuentes diversas tales como elementos cartográficos, datos estadísticos, base de datos tradicionales, fotografías aéreas e imágenes satelitales.
- Posibilidad de una gran variedad de modelados cartográficos con una mínima inversión de tiempo y dinero.
- Los modelos conceptuales pueden ser probados rápidamente y repetidas veces facilitando su evaluación.
- Los análisis de modificaciones pueden ser ejecutados eficientemente.
- La adquisición, procesamiento, análisis, modelados y los procesos de tomas de decisiones son integrados en un contexto común de flujo de información.
- Capacidad de manejar grandes y heterogéneas bases de datos referenciados especialmente.
- Capacidad de las bases de datos para responder a preguntas respecto de la existencia, localización y propiedades de una amplia gama de objetos espaciales.

- Eficiencia en el manejo de preguntas y respuestas, de manera que el sistema sea lo más interactivo posible.
- Flexibilidad y adaptabilidad a las diferentes necesidades de múltiples usuarios.

2.6.5 Interpolación

Achuy (2006), Interpolación es un procedimiento matemático utilizado para predecir el valor de un atributo en una locación precisa a partir de valores del atributo obtenidos de puntos vecinos ubicados al interior de la misma región. A la predicción del valor de un atributo en lugares fuera de la región cubierta por las observaciones se le llama extrapolación. Se utiliza interpolación para transformar un número finito de observaciones, obtenidas en base a ubicaciones geográficas precisas, a un espacio continuo de manera que el patrón espacial presentado por las observaciones puntuales pueda ser comparado con los patrones espaciales de otras variables bajo consideración.

La interpolación es necesaria:

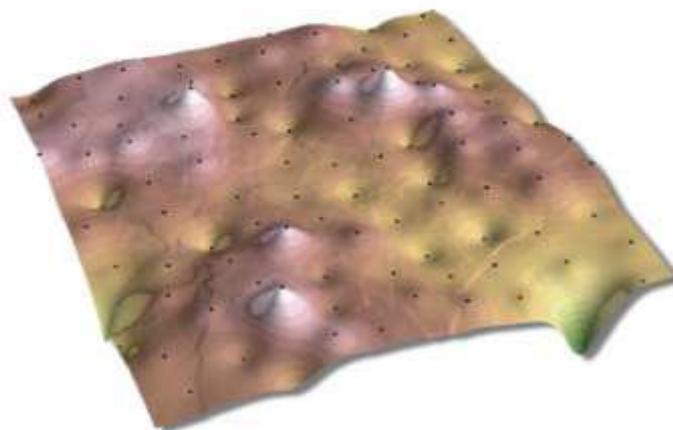
- Cuando la superficie rasterizada (GRID) tiene una resolución que es diferente de la resolución pedida.
- Cuando una superficie continua es representada por un modelo que es diferente al necesitado.
- Cuando los datos no cubren toda la región de interés de estudio.

2.6.5.1 Clases de Métodos de Interpolación

a) IDW “Inverse Distance Weighted” (Ponderación por Distancia)

El método IDW combina el concepto de vecindad entre sitios con disponibilidad de datos con un cambio gradual de las superficies definidas con una tendencia. Se supone que el valor del atributo Z en una posición donde el valor del atributo no es conocido es un promedio de los valores de sus vecinos pero donde los vecinos más cercanos tienen más peso o importancia que los más alejados. (FAO, 2003).

Inverse Distance Weighted



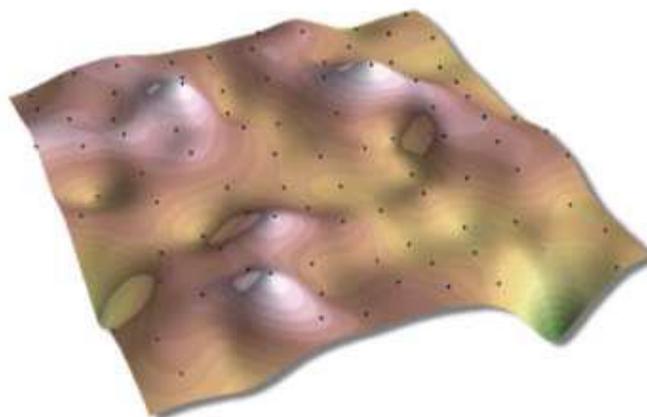
Fuente: Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales Renovables

Figura 25: Modelo IDW de interpolación.

b) Splines

La idea de la interpolación segmentaria o por Spline, es que en vez de usar un solo polinomio para interpolar los datos, podemos usar segmentos de polinomios y unirlos de la mejor forma posible para formar nuestro polinomio de interpolación.

Spline



Fuente: Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales Renovables

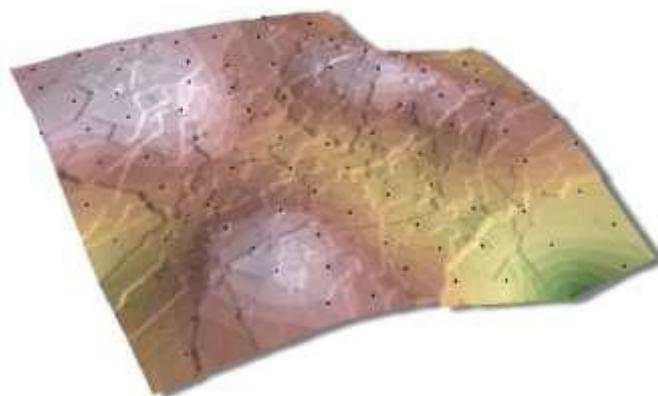
Figura 26: Modelo Splines de interpolación.

c) Kriging

Este método pertenece al grupo de los métodos geo-estadísticos ya que describe la correlación tanto espacial como temporal entre los valores de un atributo. Tradicionalmente se ha utilizado en las llamadas geo-ciencias (geofísica, hidrogeología, etc.), sin embargo, sus principios se aplican cada vez más en una amplia variedad de campos científicos como pesquerías, silvicultura, ingeniería civil, procesamiento de imágenes, cartografía, meteorología, etc. (FAO, 2003).

La Geo-estadística asume que los datos están correlacionados y que la continuidad se puede establecer para puntos, bloques o volúmenes. Por lo tanto, en esta disciplina, se utiliza el concepto de variable regional que describe fenómenos con una distribución geográfica y con una cierta continuidad espacial. Kriging es el método de cálculo de una variable regional en un punto, al interior de un área usando un criterio de minimización de la estimación de la varianza. Para ello se resuelve un conjunto de ecuaciones con información presente en un gráfico denominado variograma y las distancias relativas entre los datos y la posición del punto, donde el valor interpolado es requerido. (FAO, 2003).

Kriging



Fuente: Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales Renovables

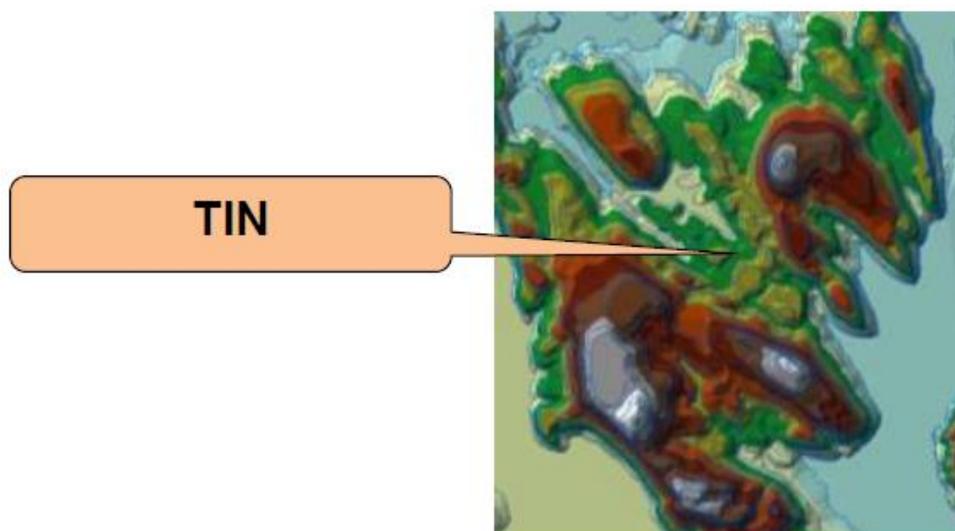
Figura 27: Modelo Kriging de interpolación.

d) Interpolación a partir de triángulos irregulares (TIN)

El modelo TIN surgió como una respuesta a la necesidad de buscar una estructura de datos alterna a la ráster utilizada hasta aquel momento para representar Modelos Digitales del Elevación (MDE) y a la insatisfacción por parte de los usuarios(as) con el software existente para crear isolíneas.

Esta estructura de datos se compone de un conjunto de triángulos irregulares adosados y que suele identificarse por las siglas de su denominación inglesa: triangulated irregular network, TIN. Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, y se adosan sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve.

El relieve puede representarse eficazmente mediante triángulos adosados al terreno, cada uno de los cuales se adapta a una zona con características de pendiente similares. La estructura TIN permite incorporar datos auxiliares como líneas de inflexión, red hidrológica o zonas de altitud constante.



Fuente: Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales Renovables

Figura 28: Modelo TIN de interpolación.

CAPITULO III

MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

3.1 Área de Estudio

3.1.1 Subcuenca Conduriri

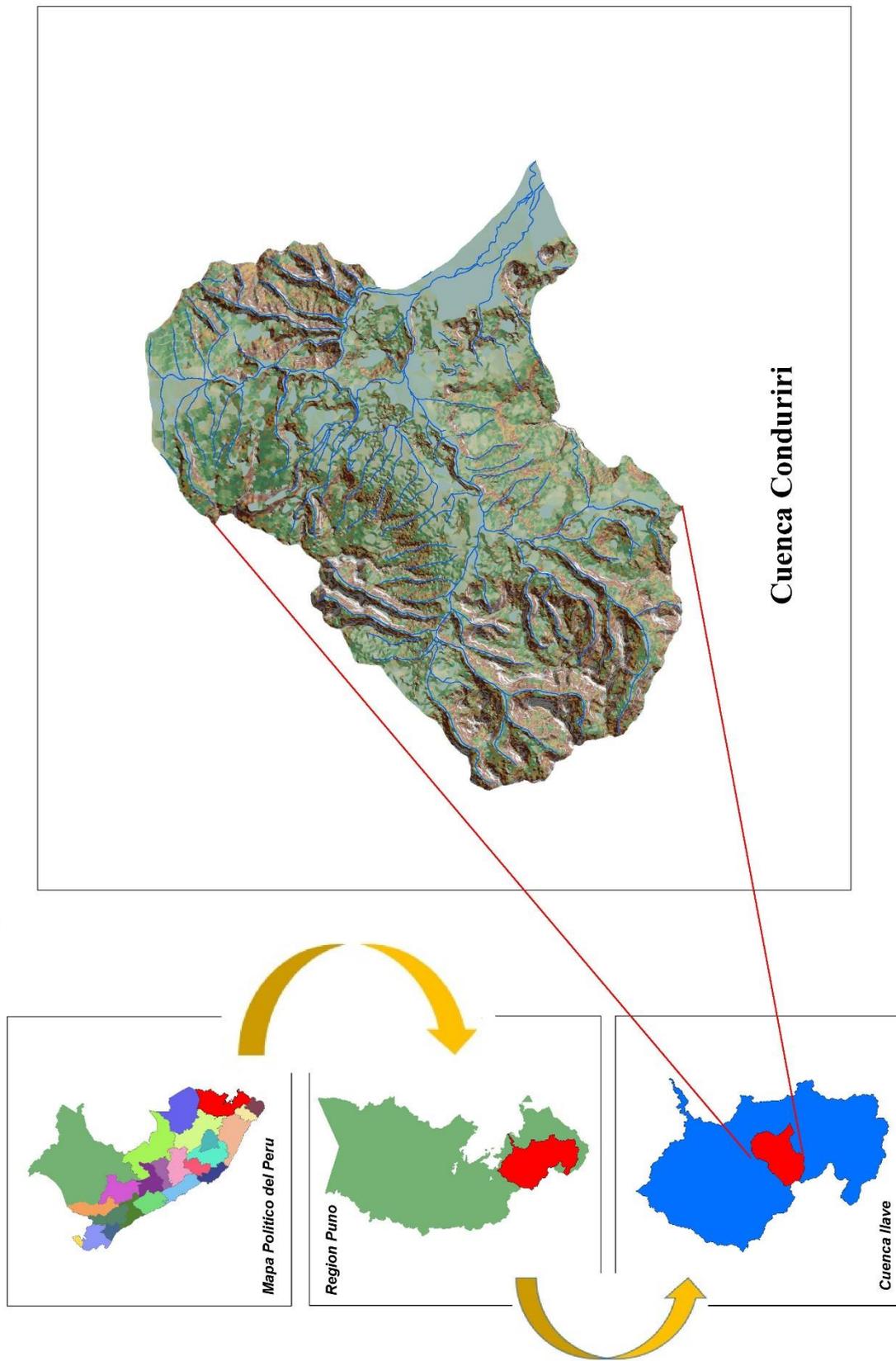
El área de estudio, comprende la subcuenca del río Conduriri presentada en la figura 29, la misma que se encuentra en la cuenca Ilave dentro de la provincia de El Collao departamento Puno, abarca los distritos de Ilave, Conduriri y Mazocruz. Geográficamente está localizada en la sierra sur del Perú, entre las coordenadas UTM, por el Este 407,670.00 y por el Norte de 8'167,351.00.

Hidrográficamente se encuentra ubicada en la vertiente del lago Titicaca, la misma que pertenece al sistema hídrico lago Titicaca, río Desaguadero. Limita por el este con la subcuenca Medio Bajo Ilave, por el oeste con la cuenca del río Tambo, por el norte con la subcuenca del río Uncallane y por el sur con las subcuencas Medio Ilave y Medio Alto Ilave.

Es una de las subcuencas que aporta directamente al cauce principal de la cuenca del río Ilave. La subcuenca Conduriri abarca una superficie de 607.82 Km², representa el 7.74% del área total de la cuenca del río Ilave. Cuya longitud del cauce principal del río es de 63.00 Km., el río principal nace desde la quebrada Chacacalaya - quebrada Chacacala - río Piaque - río Huanacamaya - río Conduriri, hasta la confluencia con el río Huenque.

El cauce del río Conduriri presenta una pendiente media de 1.64%. El cauce en su recorrido no presenta formas meándricas y divagantes a consecuencia de la alta pendiente del cauce. Las vías de acceso en esta subcuenca son ejes viales principales y secundarios que comunican con el departamento de Tacna, provincias y distritos del entorno a la Ciudad de Ilave.

Figura 29: Ubicación del Área de Estudio



Fuente: Elaboración propia

3.2 Materiales y Equipos

3.2.1 Materiales y Equipo de Campo

- GPS (Sistema de Posicionamiento Global) marca Garmin.
- Cámara digital marca Canon.
- Libreta de campo.
- Tablero
- Motocicleta
- Wincha de 50 m.
- Otros

3.2.2 Materiales y Equipo de Gabinete

- 01 Laptop Core i7.
- Impresora a color
- Papel bond A – 4 (80 gramos)
- Software vectorial Arcgis 10.2.2
- Software Envi 5.0 (tratamiento de imágenes)
- Otros: Windows 7, Office 2007 (Word, Excel)
- Calculadora y otros

3.2.3 Información Cartográfica e Imágenes de Satélite

3.2.3.1 Cartografía

Se utilizará cartas nacionales del Instituto Geográfico Nacional (I.G.N.) de la zona, a escala 1:100,000 y curvas de nivel a 1:25,000 obtenidas del “Ordenamiento Territorial Región Puno” con el siguiente detalle:

Cuadro 16: Cartas nacionales (IGN)

Hoja Catastral	Numero	Hoja Catastral	Numero
Puno	32 - V	Mazocruz	34 - X
Acora	32 - X	Huallire	34 - V
Pichacani	33 - V	Pizacoma	34 - Y
Ilave	33 - X	Tarata	35 - V
Juli	33 - Y	Rio Maure	35 - X

Fuente: Elaboración propia

3.2.3.2 Imágenes Landsat 8 OLI/TIRS

Se utilizara imágenes satelitales del sensor Landsat 8 OLI/TIRS, proporcionados por el **United States Geological Survey (USGS)**, estas imágenes están compuestas por diferentes bandas espectrales (ver anexo 5 y 6), que son útiles para estudio de cobertura terrestre: vegetación, suelos, forestación, nieve, agua, etc., a continuación se detallan las imágenes a utilizar:

Cuadro 17: Imágenes de satélite Landsat 8 OLI/TIRS

Imagen	Sensor	Resolución Espacial	Escena	Fecha de la Imagen	Localización
Landsat 8 OLI/TIRS	TM	30 mt X 30 mt	02 - 071	03/08/2014	Puno - Perú
		30 mt X 30 mt	02 - 072	03/08/2014	

Fuente: Elaboración propia

3.2.3.3 Datos de Elevación Digital ASTER GDEM

ASTER GDEM, es un proyecto desarrollado por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), con la finalidad de construir con Modelo de Elevación Digital de todo la superficie terrestre, liberado por medio de imágenes DEM después de haber sido validada su información.

Cuadro 18: Modelo de elevación digital

ASTGTM 2	Resolución Espacial	Localización
ASTGTM 2	30 mt x 30 mt	s 16 - w 070
ASTGTM 2	30 mt x 30 mt	s 16 - w 071
ASTGTM 2	30 mt x 30 mt	s 17 - w 070
ASTGTM 2	30 mt x 30 mt	s 17 - w 071
ASTGTM 2	30 mt x 30 mt	s 18 - w 070
ASTGTM 2	30 mt x 30 mt	s 18 - w 071

Fuente: *Elaboración propia*

3.2.4 Precipitación

Los datos de precipitación que se utilizara en la presente investigación serán reunidos y analizados de varias fuentes: SENAMHI, PELT y Ordenamiento Territorial Región Puno; se utilizaron un total de 11 estaciones, las mismas que se detallaran en el siguiente cuadro:

Cuadro 19: Estaciones meteorológicas

Nº	Estación	Tipo de Estación	Ubicación			Coordenadas	
			Región	Provincia	Distrito	Este	Norte
1	Capazo	CO	Puno	El Collao	Capazo	421784.00	8099507.00
2	Desaguadero	CO	Puno	Chucuito	Desaguadero	495721.00	8168156.00
3	Pampa Umalzo	CO	Moquegua	Mariscal Nieto	Moquegua	348359.00	8133726.00
4	Ichuña	CO	Puno	Sanchez Cerro	Ichuña	334026.00	8215750.00
5	Ilave	CO	Puno	El Collao	Ilave	431017.00	8221174.00
6	Juli	CO	Puno	Chucuito	Juli	450841.00	8208447.00
7	Laraqueri	CO	Puno	Puno	Pichacani	387724.00	8216009.00
8	Mazocruz	CO	Puno	Chucuito	Mazocruz	424735.00	8149039.00
9	Pizacoma	CO	Puno	Chucuito	Pizacoma	460749.00	8130671.00
10	Rincón de la Cruz Acora	CO	Puno	Puno	Acora	413238.00	8231916.00
11	Yunguyo	CO	Puno	Yunguyo	Yunguyo	492017.00	8196990.00

Fuente: *Ordenamiento Territorial Región Puno*

3.2.5 Suelos

La información de suelos que se utilizara para la presente tesis será del Proyecto: “Estudio de suelos y capacidad de uso mayor de la Región Puno”, desarrollado en

setiembre del 2014, por la Gerencia regional de recursos naturales y gestión del medio ambiente.

3.3 Metodología

La metodología seguida en la presente investigación se esquematiza en una serie de pasos descritos en la figura 30.

3.3.1 Fase Preliminar

3.3.1.1 Recopilación de la Información Básica

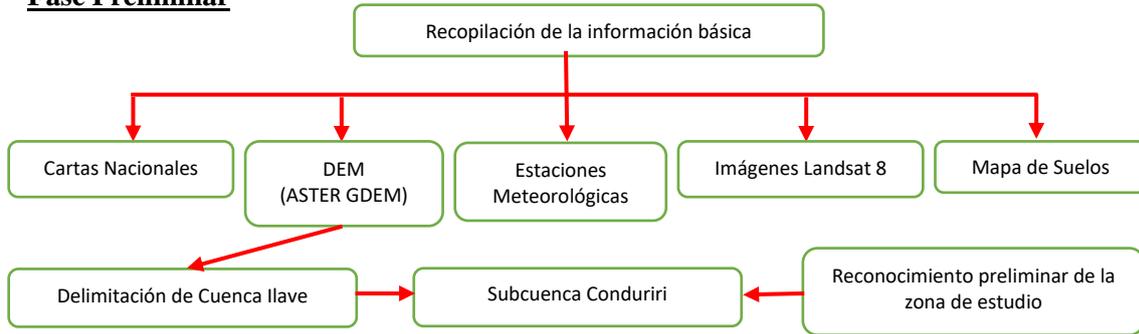
La primera actividad realizada fue la de recopilar datos relacionados con los procesos físicos de interés. La información recopilada de estudios realizados en la zona y otras fuentes, fue la siguiente; información climática, suelos, imágenes satelitales del sensor Landsat 8 OLI/TIRS de resolución espacial de 30 x 30 m, modelos de elevación digital DEM (ASTER GDEM) de resolución espacial 30 x 30 m, cartas nacionales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1: 100,000 y curvas de nivel a escala de 1: 25,000 proporcionadas por el Proyecto de Ordenamiento Territorial Región Puno.

3.3.1.2 Obtención del Área Delimitada de la Subcuenca Conduriri

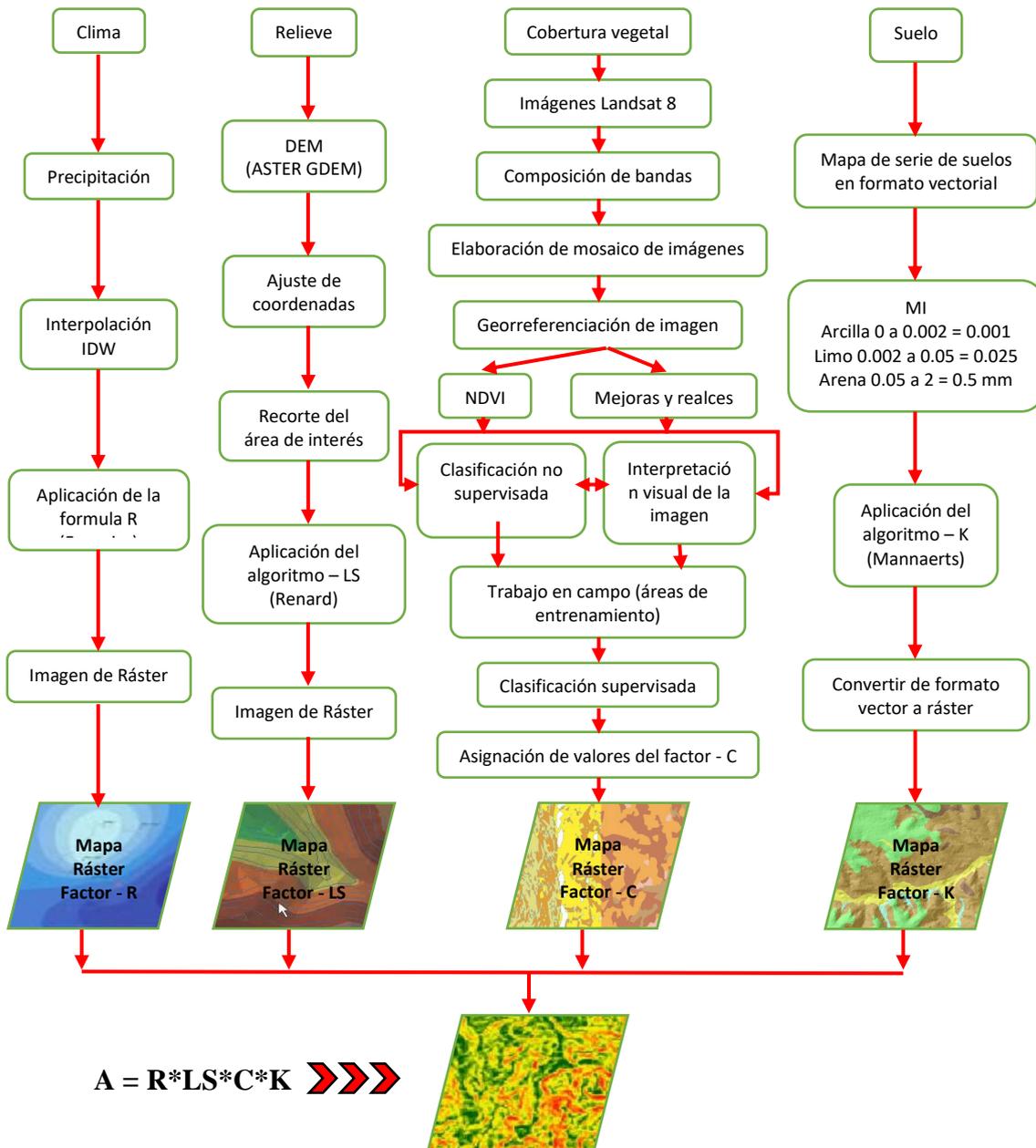
Para la obtención de la subcuenca Conduriri es necesario delimitar la Cuenca Ilave, ya que forma parte de esta. Al delimitarla obtendremos nuestra área de estudio para así poder analizar las demás variables.

Figura 30: Diagrama de la metodología desarrollada

Fase Preliminar



Procesamiento de variables y cálculo del factor erosivo (A)



Fuente: Elaboración propia

a) Delimitación Hidrográfica de la Cuenca Ilave

Como paso preliminar para la delimitación hidrográfica de la cuenca del río Ilave, se construyó un mosaico de los modelos de elevación digital (ASTER GDEM), en vista de que el área de estudio abarca seis (06) escenas, seguidamente la metodología que se desarrolló fue la siguiente:

b) Generación de Mapa de Dirección de Flujo

Antes de la generación de la dirección de flujo se ubican las depresiones en el mapa de modelo de elevación digital, para luego rellenar las imperfecciones existentes en la superficie del DEM. Para la creación del mapa flow direction, se realizaron los siguientes pasos:

1. Identificación de las depresiones en el DEM.
2. Llenado (FILL) de depresiones en el mapa DEM.
3. Creación del mapa de Dirección de Flujo.

c) Generación del Mapa del Flujo Acumulado

La capa de acumulación de flujo es la que permite visualizar la distribución de la red de drenaje. Las celdas que tienen los mayores valores de acumulación definen dicha red. Para la obtención del mapa de flujo acumulado se generó el mapa con la herramienta de hidrología “Flow Accumulation” del ArcToolbox, para calcular en cada una de las celdas del grid, el flujo acumulado sobre la misma, es decir, el número de celdas que vierten en ella. La capa de “Flow Accumulation” es la que permite visualizar la distribución de la red de drenaje. Las celdas que tienen los mayores valores de acumulación definen dicha red.

d) Generación de Redes Hidrográficas

Para la generación de la red hidrográfica es necesario seguir los siguientes pasos:

- **Generación de la Red Hidrográfica en Formato Ráster**

Para la generación del mapa de la red hidrográfica de la cuenca del río Ilave se utilizó el ráster de acumulación de flujo, porque este es el que permite visualizar la red de drenaje, pero para ello fue necesario que todos los valores menores a las 350,000 celdas acumuladas no fueran consideradas (CON).

- **Obtención de Tramos Independientes de la Cuenca del río Ilave**

Para la obtención de los tramos independientes de los ríos tributarios de la cuenca del río Ilave se utilizó la red hidrográfica en formato ráster, este mapa es necesario para la generación de todas las subcuencas.

- **Clasificación de la Red de Drenaje**

Para obtener el orden de la red de drenaje se utilizó el método de Strahler para generar el orden de la cuenca. Por lo que el orden de la cuenca del río Ilave es de 7 según el método, este método fue llevado a cabo con la herramienta de hidrología de ArcGis 10.2.2.

- **Conversión de Red de Drenaje en Formato Ráster a Formato Vectorial**

Se convierte la imagen ráster a un formato vectorial con extensión shp.

e) **Determinación de Subcuencas**

Para la generación de subcuencas con las áreas de drenaje de mayor importancia se siguió la siguiente metodología:

- **Generación de Puntos para Definir las Subcuencas**

La generación de estos puntos consiste en la digitalización de ellos a partir del cual se delimitaran las subcuencas.

- **Ajuste de puntos**

Ajustar los puntos digitalizados a las celdas cercanas que tienen el mayor valor de acumulación de flujo.

- **Generar las Subcuencas Utilizando la Herramienta “Watershed”**

Con esta herramienta se generan las subcuencas de toda la cuenca del río Ilave, (figura 32).

f) Corte de la zona de interés (subcuenca Conduriri)

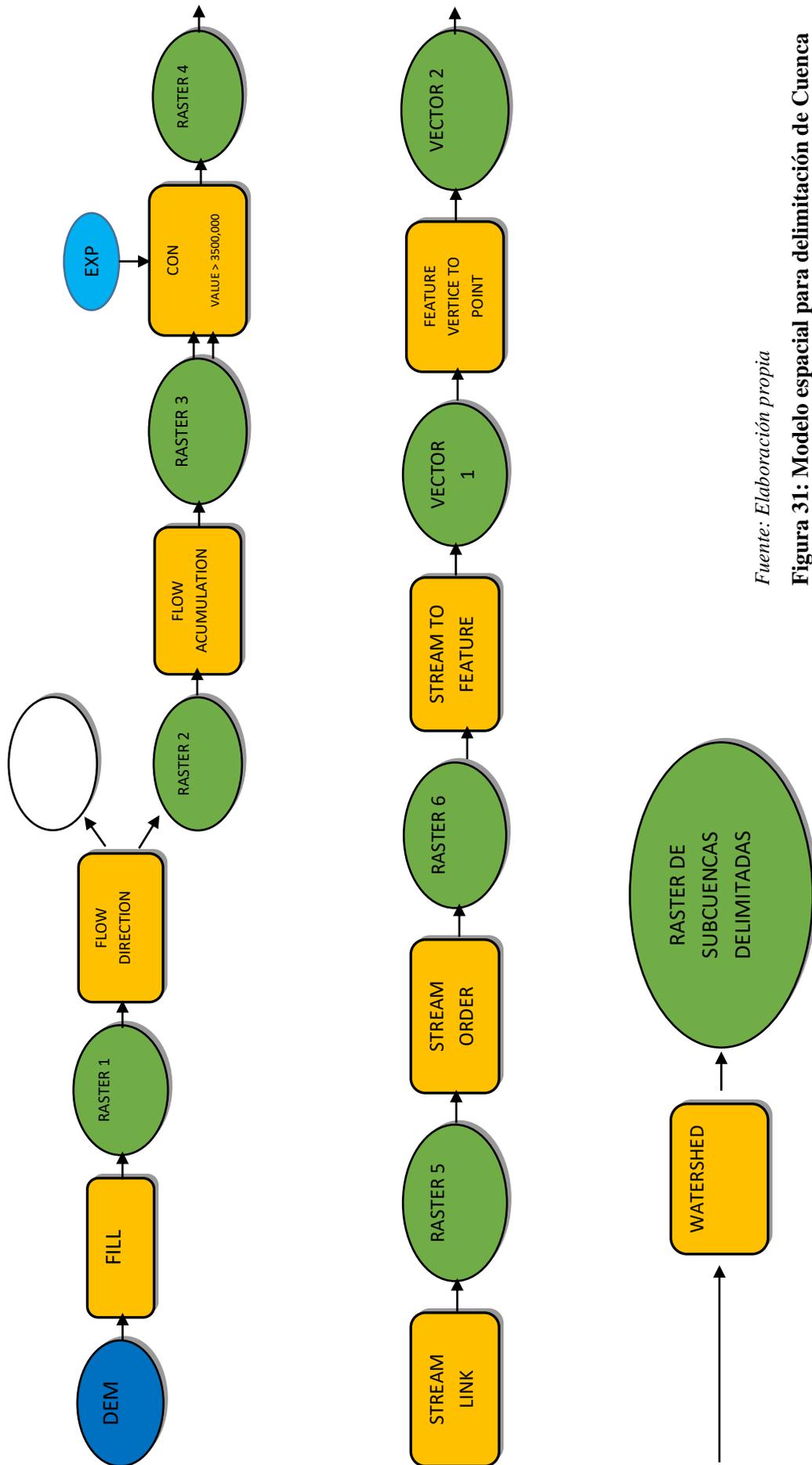
Ya delimitada y subdividida la cuenca Ilave en subcuencas en formato vectorial, se procedió con el recorte del área de interés (subcuenca Conduriri), realizado con la herramienta “clip” del ArcToolbox.

g) Diseño del Modelo Espacial para Delimitación de la Cuenca Ilave

Para el proceso de la obtención de la subcuenca Conduriri y la delimitación de la cuenca Ilave, se diseñó un modelo espacial con el software ArcGis v.10.2.2, con la herramienta “Model Builder” (Figura 31).

3.3.1.3 Reconocimiento Preliminar de la Zona de Estudio

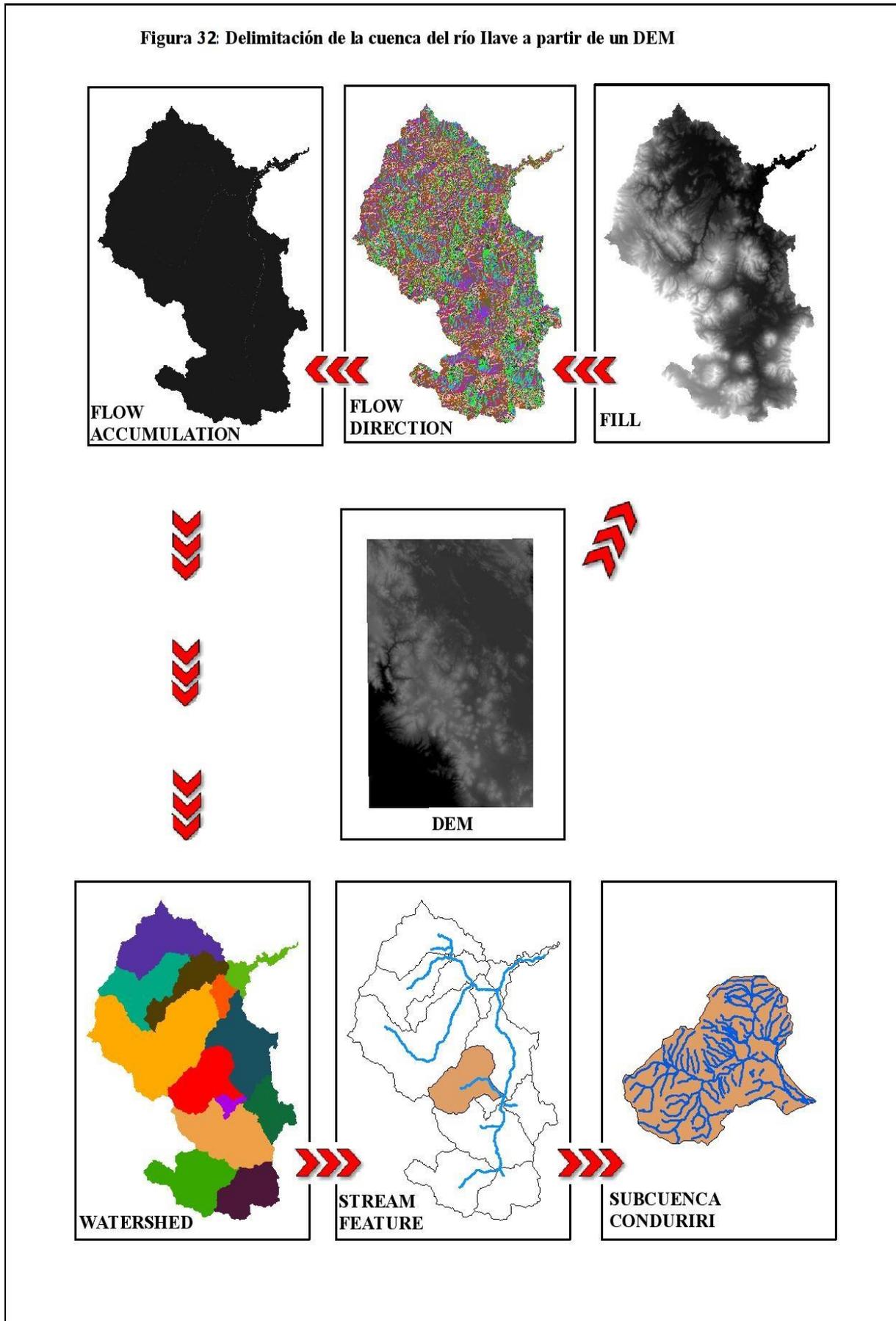
En esta fase se ha realizado el reconocimiento in situ de la mayor parte del área de estudio; se observó el estado en que se encuentran las diferentes zonas, principalmente en cuanto a cobertura vegetal, topografía del terreno y las zonas con problemas de erosión hídrica.



Fuente: Elaboración propia

Figura 31: Modelo espacial para delimitación de Cuenca

Figura 32: Delimitación de la cuenca del río Ilave a partir de un DEM



Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Procesamiento de las Variables

Para el cálculo de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la subcuenca Conduriri, se ha utilizado el modelo RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada), la cual es muy utilizada en diferentes partes del mundo, dada la facilidad de su aplicación.

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

Donde:

A = es la pérdida de suelo por unidad de superficie, que se obtiene por el producto del resto de los factores (tn/ha/año).

R = capacidad erosiva de las lluvias (MJ.mm/ha.h).

K = erosionabilidad de los suelos (tn.ha.h/ha.MJ.mm).

L = factor que mide el efecto de la longitud de pendiente (adimensional).

S = factor que mide el efecto de la inclinación de la pendiente (adimensional).

C = factor que mide el efecto de la cobertura o clase de cultivo y su manejo (adimensional).

P = prácticas de conservación de suelos.

3.3.2.1 Factor “R”, Erosividad de las Lluvias

Para obtener este factor se utilizó información de precipitaciones medias mensuales y anuales de 11 estaciones meteorológicas, de registros correspondientes al periodo de 1980 – 2014, para lo cual se siguió los siguientes pasos:

Se realizó la modelación espacial de la precipitación mensual y anual con una interpolación a partir de datos puntuales de las estaciones pluviométricas, el método de interpolación usado fue el IDW (Peso Inverso de la Distancia), a través del ArcGis v. 10.2.2.

Seguidamente con la herramienta “Model Builder” del software ArcGis v.10.2.2, se realizó el siguiente algoritmo (figura 33), con el cual se obtuvo la capa temática erosividad de las precipitaciones.

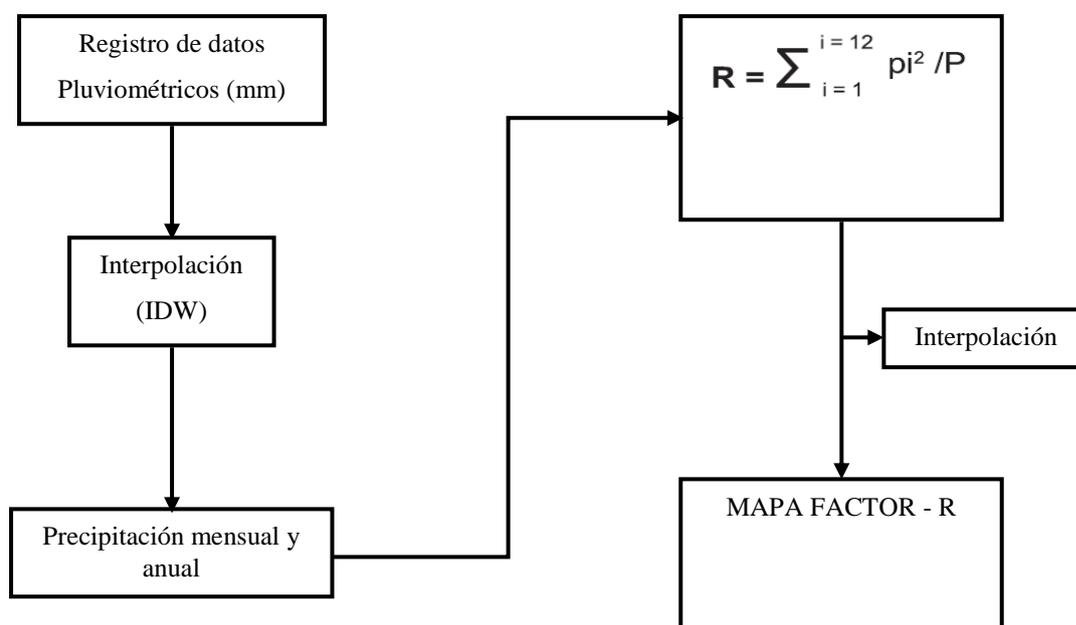
$$R = \sum_{i=1}^{i=12} p_i^2 / P$$

Donde:

R = es el factor de erosividad de las lluvias

$\sum p^2 / P$ = es el Índice Modificado de Fournier o Índice FAO. Donde p^2 es la precipitación media mensual y P es la precipitación media anual. Considera no solamente el mes de mayor precipitación sino también el resto de los meses.

Figura 33: Flujograma para la obtención del mapa de erosividad de la lluvia.



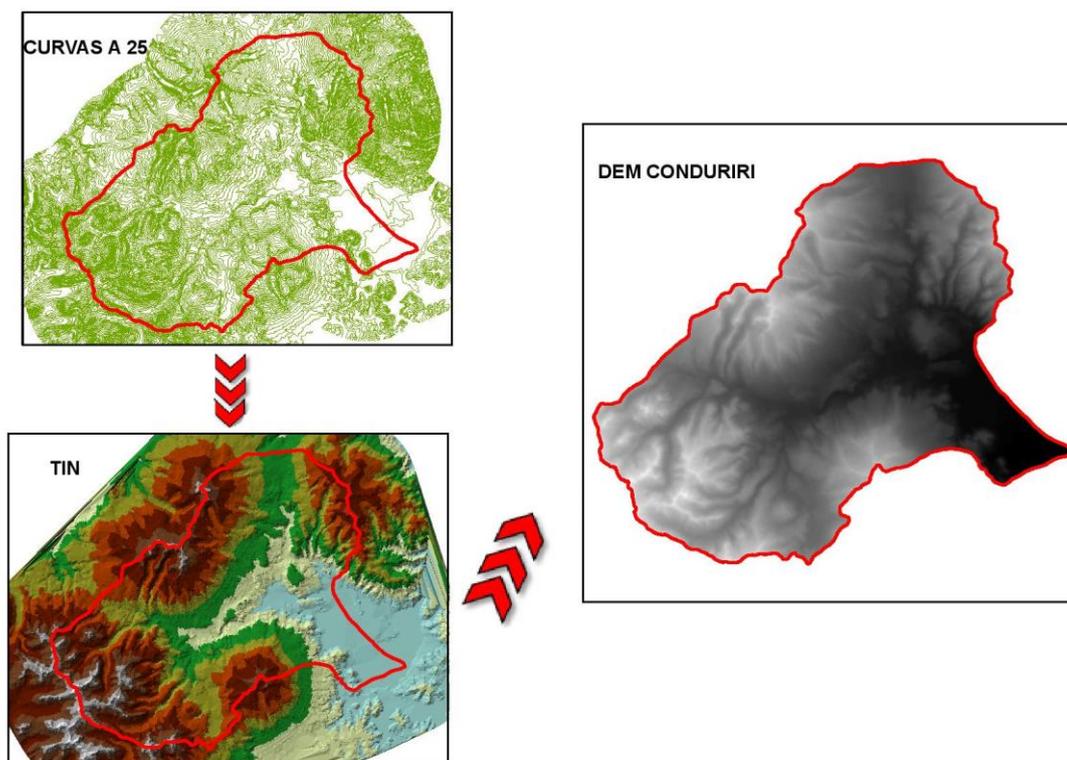
Fuente: Elaboración propia

3.3.2.2 Factor “LS”, Topografía

Para la obtención del factor LS, se partió de las curvas de nivel a escala de 1: 25 000, en coordenadas UTM WGS 84 zona 19S, obtenidas del Proyecto “Ordenamiento Territorial Región Puno”.

- Como primer paso se realizó el recorte del área de trabajo mediante la herramienta “clip” del ArcGis v.10.2.2, con el fin de acelerar el proceso.
- Con la herramienta “3D Analyst” del software ArcGIS, creamos un TIN a partir de las curvas de nivel, para la creación de la triangulación que representa la morfología de la superficie.
- Ya obtenido nuestro TIN, ahora lo convertiremos a un Modelo de Elevación Digital (DEM), para ello vamos a la herramienta “3D Analyst” y convertimos nuestro TIM a un Ráster.

Figura 34: Proceso para la obtención del DEM



Fuente: Elaboración propia

- Con nuestro DEM ya obtenido, se diseñó la modelación espacial a través de la herramienta “Model Builder” del software ArcGis v.10.2.2, se realizó el siguiente algoritmo (figura 40), con el cual se obtuvo la capa temática longitud y gradiente de la Pendiente, desarrollado con la metodología de Renard (1997).

El factor L: Donde λ es la longitud de la pendiente (m), m es el exponente de la longitud de la pendiente y β es el ángulo de la pendiente. La longitud de la pendiente se define como la distancia horizontal desde donde se origina el flujo superficial al punto donde comienza la deposición o donde la escorrentía fluye a un canal definido.

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m \qquad m = \frac{F}{(1+F)} \qquad F = \frac{\sin \beta / 0,0896}{3(\sin \beta)^{0,8} + 0,56}$$

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m \cdot D^{m+2} \cdot (22,13)^m}$$

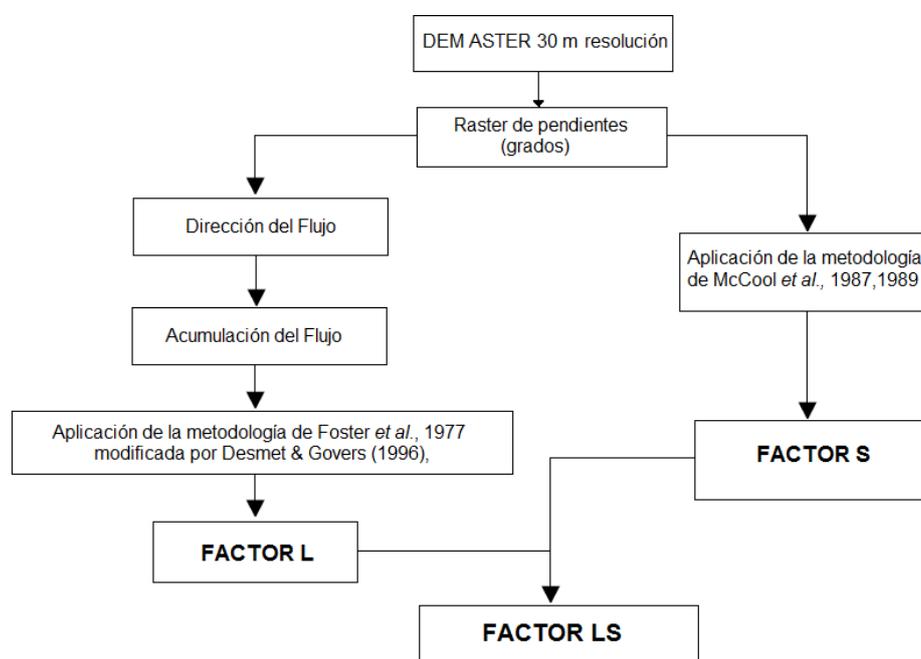
Donde A (i, j) [m] es el área aportadora unitaria a la entrada de un pixel (celda), D es el tamaño del pixel y x es el factor de corrección de forma.

El factor S: El ángulo β se toma como el ángulo medio a todos los subgrids en la dirección de mayor pendiente.

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

Cuando se aplica esta fórmula en el Ráster Calculator de ArcGis se debe tomar en cuenta que el ángulo deberá ser convertido a radianes (1 grado sexagesimal = 0,01745 radianes), para que pueda ser multiplicado por los demás componentes de las ecuaciones.

Figura 35. Flujograma para la obtención del mapa de LS.



Fuente: Elaboración propia

3.3.2.3 Factor “C”, Cobertura Vegetal

El factor C de cobertura vegetal indica la protección que la cobertura vegetal presta al suelo al interceptar las gotas de lluvia y amortiguar su energía de impacto disminuyendo el efecto erosivo. Para la determinación del mapa de cobertura vegetal de la subcuenca Conduriri se obtuvo a través del análisis de las imágenes de satélite obtenidas del sensor Landsat 8 de la zona, con resolución espacial de 30 mt, tomada el 03 de agosto del 2014. La metodología seguida fue la siguiente:

Se realizó la composición de bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 9 de las dos escenas Landsat 002 – 071 y 002 – 072, utilizando el software ENVI v.5.0, mediante la extensión; map – layer stacking.

Seguidamente se procedió a realizar el mosaico de las imágenes combinadas, en vista de que el área de la subcuenca se encuentra en el medio de las dos escenas, para

este procedimiento se utilizó el software ENVI v.5.0, mediante la extensión; map – mosaicking – georeferenced.

Para el siguiente paso se realizó la corrección geométrica o georreferenciación de la imagen (mosaico de imágenes), con el fin de situar correctamente cada uno de los puntos de las imágenes en sus coordenadas geográficas y puedan ser superpuestas al momento de realizar la integración del modelo final de erosión, la cual se realizó mediante el software ArcGis v.10.2.2, mediante la extensión Georeferencing, por medio de una distribución de puntos clave o puntos de control de manera homogénea en la cartografía de referencias y en la imagen a georreferenciar, para este caso a partir de la cartografía base del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1: 100, 000 proyección UTM zona 19S, datum WGS – 84, se georreferenciaron las imágenes que vienen originalmente con coordenadas y proyección diferente a las de la zona de estudio, se realizó el tema de hidrografía fluvial que son fácilmente identificables en la cartografía de referencia y en las imágenes, se ubicaron 160 puntos de control en la imagen (mosaico), distribuidos adecuadamente (intersección de los ríos). Una vez identificados dichos puntos en la imagen y en la cartografía de referencia, se comprobó la bondad del ajuste de los puntos de control elegidos, exigiendo que el error cuadrático medio se situara en valores inferiores del tamaño del pixel, esto es, 30 metros, de esta manera, se ha obtenido georreferenciar la imagen en el sistema de proyección UTM zona 19S y datum correspondiente a WGS – 84.

Fue necesario realizar mejoras y realces en la imagen satelital para el aspecto visual y su calidad, para de esta manera obtener clasificaciones más precisas, es así que se desarrolló ajuste de brillo y de contraste.

Antes de realizar la clasificación, para tener una mejor idea para aplicar las áreas de entrenamiento para la clasificación, se obtuvo el NDVI de la imagen, que es el índice de vegetación de diferencia normalizada el cual facilita enormemente la discriminación entre suelos descubiertos y suelos con vegetación, como también brinda información sobre el vigor vegetal de una zona determinada.

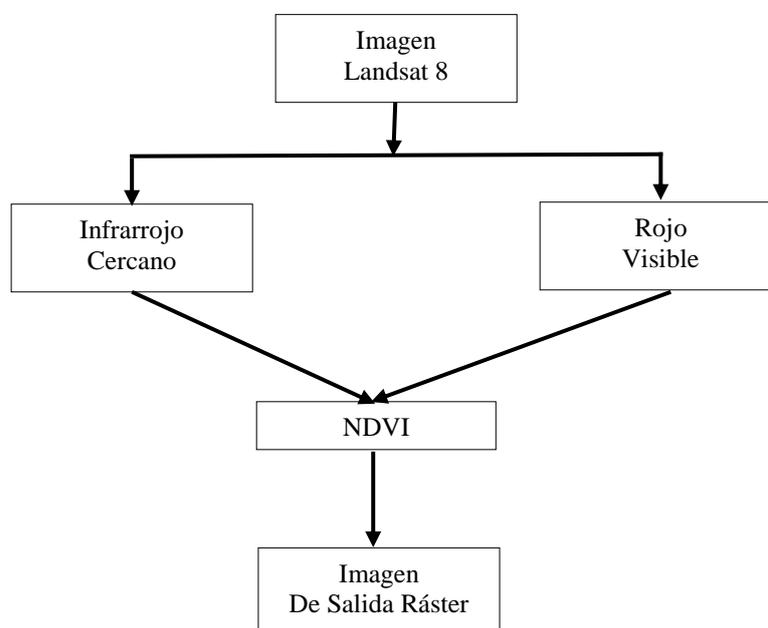
Se creó un algoritmo en el Model Builder del software ArcGis v.10.2.2, para generar el NDVI y que se presenta en la figura 49 a.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Banda 5} - \text{Banda 4}}{\text{Banda 5} + \text{Banda 4}}$$

Donde: Banda 5 = Infrarrojo cercano
 Banda 4 = Rojo visible

Esta fórmula permite obtener una imagen de tipo ráster con valores que van desde -1 a +1. El color negro con valores cercanos al cero, representan al suelo con actividad fotosintética nula o lo que significa que carece de vegetación alguna, el color gris que va de 0 a 0.5 representa a suelos con actividad fotosintética media; los de color blanco tienen valores cercanos al 1 y representan al suelo con alta actividad fotosintética como en los cultivos.

Figura 36: Flujograma para la obtención del mapa del factor C



Fuente: Elaboración propia

Al obtener los valores de NDVI que permite diferenciar de mejor manera los distintos cambios de cobertura vegetal en la imagen, se procedió a realizar una preclasificación de la imagen consistente en efectuar una clasificación no supervisada y una interpretación visual a fin de identificar zonas espectralmente homogéneas en las imágenes, con el objeto de facilitar la localización de las parcelas de entrenamiento. La clasificación no supervisada se realizó mediante el software ArcGis v.10.2.2, mediante la herramienta ArcToolbox – Spatial Analyst Tools – Multivariate – Iso Cluster Unsupervised Classification, este algoritmo utiliza el método de la distancia espectral mínima para formar las clases, se hicieron varios ensayos para decidir el número óptimo de las clases (clusters).

Con el resultado de la preclasificación se obtuvo información previa para utilizar en el reconocimiento de la zona en campo, es así que el paso siguiente fue realizar visitas a campo para identificar los diferentes tipos de cubierta vegetal, se han tomado fotografías de las áreas más representativas para el mejor reconocimiento y dicha información se relevó conjuntamente con su posición geográfica utilizando el sistema de posicionamiento global satelital (GPS), lo que permite ubicar su ubicación aproximada (± 100 m) en la imagen.

Con el conocimiento previo de la zona de estudio se procedió a mejorar la preclasificación de la cubierta vegetal mediante la aplicación de una clasificación supervisada utilizando el clasificador de máxima probabilidad (ArcGis v.10.2.2), donde fue posible delimitar sobre la imagen áreas de entrenamiento, que son píxeles que corresponden a patrones representativos de clase previamente ubicadas, reconocidas o corregidas en campo y que el computador procederá a calcular sus estadísticas en cada una de las bandas que tenga la imagen, completando y logrando una clasificación mejorada.

Finalmente a esta aplicación se le aplicó un filtro un filtro de 3x3 Low Pass con el fin de reducir el efecto de “sal y pimienta” de la clasificación, es decir, para eliminar píxeles aislados que se encuentran rodeados por píxeles de otra clase, se optó por este filtro ya que conserva al máximo la forma de las distintas coberturas.

Obtenido el ráster con diferentes clases de porcentaje de cobertura, se asignaron valores de C de acuerdo al tipo y porcentaje de cobertura según el cuadro 6.

3.3.2.4 Factor “K”, Erosionabilidad del Suelo

El factor K de erosionabilidad del suelo representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado. La información de suelos fue obtenida del Proyecto “Ordenamiento Territorial Región Puno”. Los valores del factor K, se obtuvieron mediante la ecuación de Mannaerts (1999), el cual relaciona el tamaño medio de las partículas de suelo a la pérdida del mismo por erodabilidad.

$$K = 0.0034 + 0.0405 * e^{\left[-0.5 * \left(\frac{\log Dg + 1.659}{0.7101}\right)^2\right]}$$

$$Dg = e^{(0.01 * \sum Fi * \ln(Mi))}$$

Donde:

K = Factor de erodabilidad del suelo $\left(\frac{t}{ha} * \frac{Mj}{ha} * \frac{mm}{hr}\right)$

Dg = Media geométrica del diámetro de las partículas (mm).

Fi = Fracción de las partículas primarias (%).

Mi = Promedio aritmético de los límites de tamaño de partículas (mm).

Los valores obtenidos para el factor K de erodabilidad del suelo se encuentran desarrollados en el anexo (3).

3.3.2.5 Factor “P”, Prácticas de Conservación de Suelos

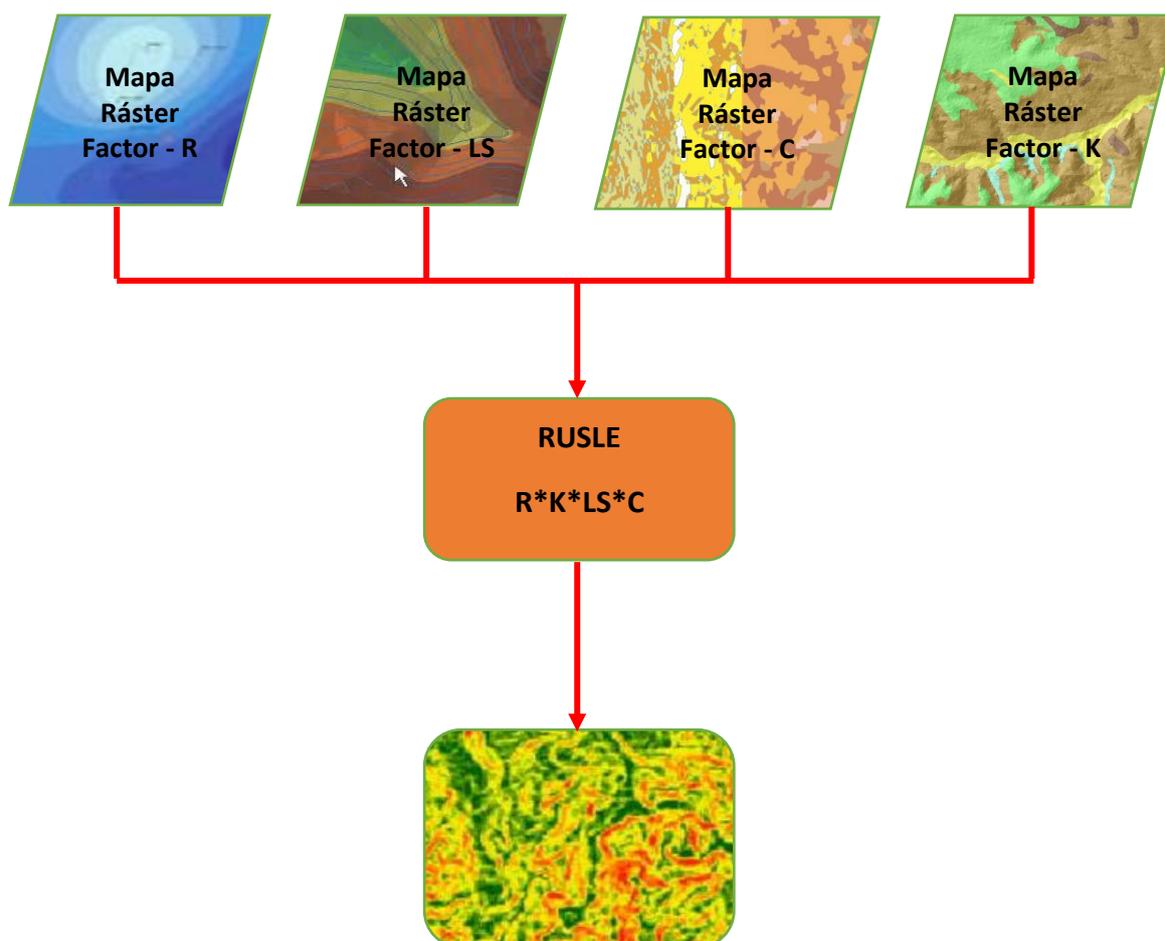
Debido a que en la zona de estudio no se realizan prácticas de conservación de suelos en extensiones considerables el factor P, para la presente investigación se ha considerado un valor de P = 1; lo que no representa ninguna influencia en el uso de la tierra.

3.3.3 Integración de los Factores

El cálculo de la erosión hídrica actual se basó en la aplicación de la metodología RUSLE, para poder llevar a cabo esta operación fue necesario contar con la información distribuida espacialmente de cada una de las variables que intervienen en el cálculo, en este caso los índices o factores de erosividad de las precipitaciones (R), erosionabilidad del suelo (K), longitud y gradiente de la pendiente (LS) y cobertura vegetal (C), ya cuantificados y en formato ráster, se combinan multiplicándose pixel a pixel.

La figura 37, Resume el modelo aplicado para la obtención de mapa de erosión hídrica actual de la subcuenca Conduriri.

La figura 37: Modelo para la evaluación de la erosión hídrica



Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Procesamiento de las Variables

4.1.1 Factor “R”, Erosividad de las Lluvias

Con ayuda de los registros de precipitación acumulada mensual y anual del período 1980 al 2014, se calcularon los valores de R para toda la subcuenca Conduriri aplicando la ecuación propuesta por Arnoldus (1978).

De la figura 38, se observa que el índice de erosividad o factor R, oscila entre 95.247 – 109.766 $Mj*mm/ha*h*año$ para toda la subcuenca Conduriri, obteniéndose los valores más altos en las zonas de mayor altura y mayor precipitación.

El Índice de Fournier Modificado (IFM) es considerado como un buen estimador de la erosividad de las lluvias para el modelamiento de la erosión hídrica, por esto se considera una buena metodología para aplicar en la subcuenca Conduriri.

Del mismo modo Ramírez (2010), nos dice que, este índice tiene muchas ventajas ya que emplea datos meteorológicos simples, lo cual facilitó mucho su aplicación en el presente trabajo, ya que la zona cuenta con varias estaciones meteorológicas que miden la cantidad de lluvia en mm, que es la base principal para la aplicación de esta metodología.

Además según la clasificación de Lobo et al. (2006), citado por Ramírez et al. (2007), la subcuenca Conduriri presentó un valor entre 90 a 120 por lo cual la erosividad de las precipitaciones puede ser clasificada como moderada.

En la figura 38 se muestra el diseño del modelo espacial para el cálculo de la erosividad de la lluvia (factor R).

Figura 38: Modelo Espacial para Obtener el Mapa del Factor de Erosividad

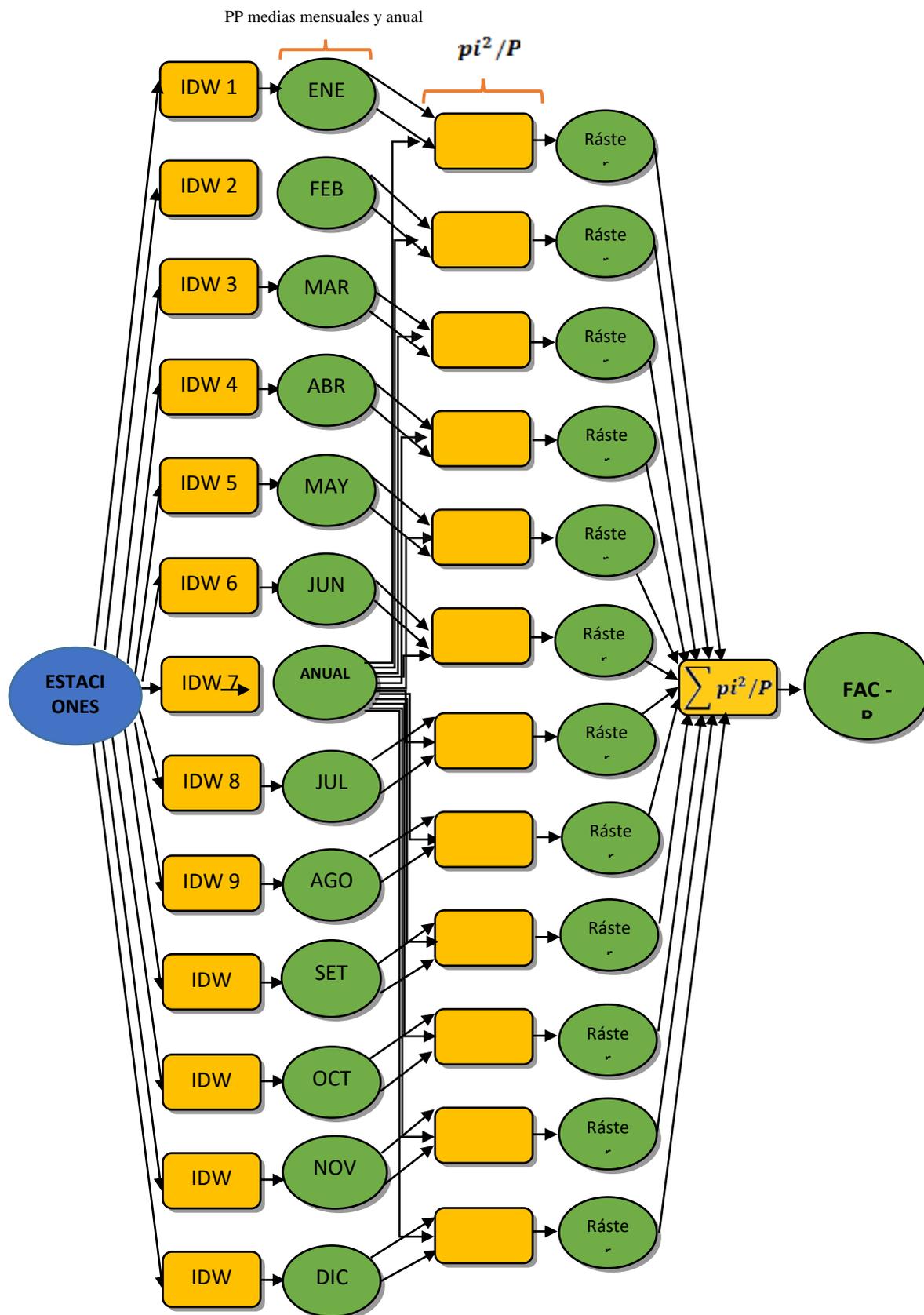
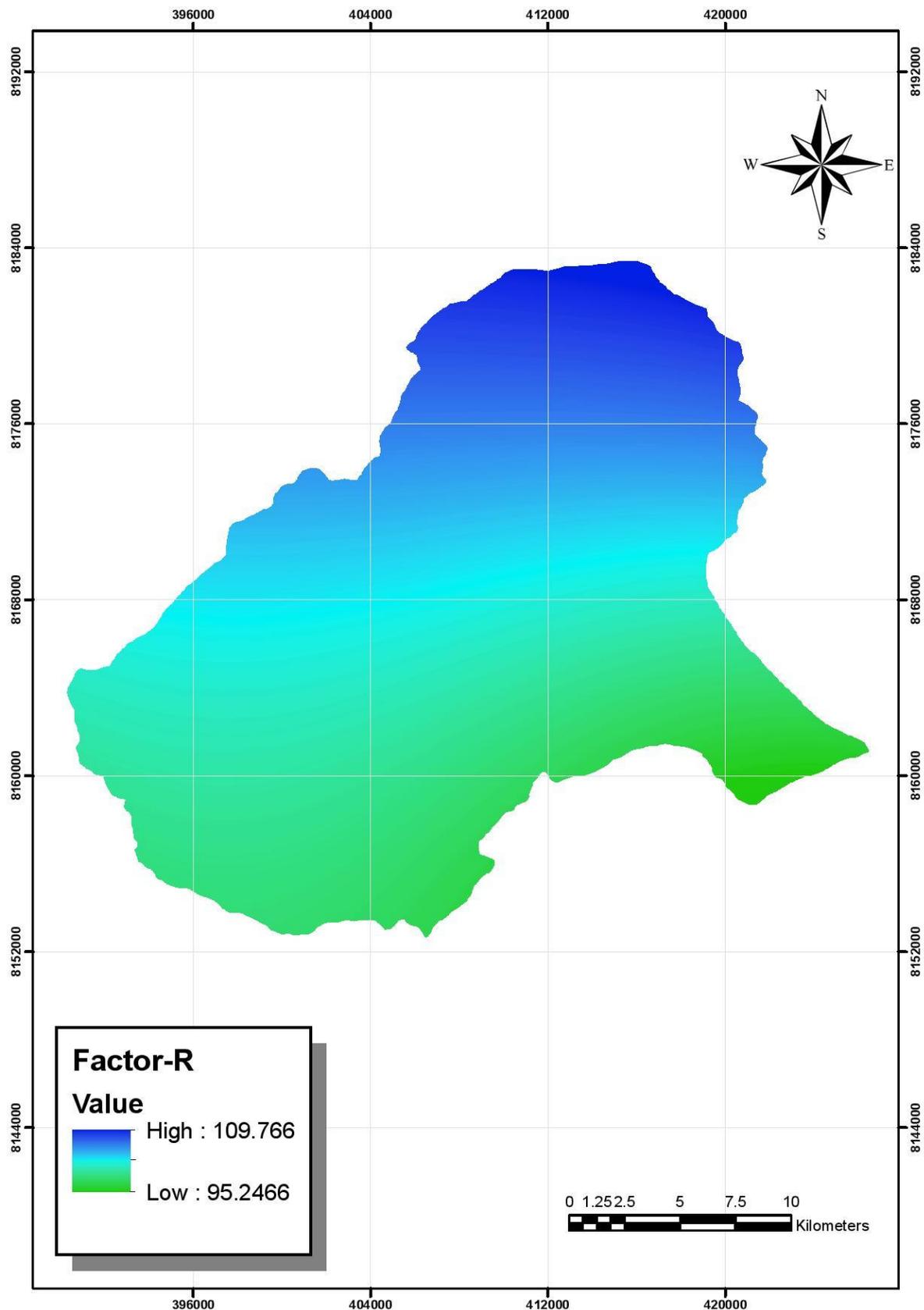


Figura 39: Distribución Espacial de la Erosividad de las Lluvias (Factor -

R)



4.1.2 Factor “LS”, Longitud y Gradiente de Pendiente

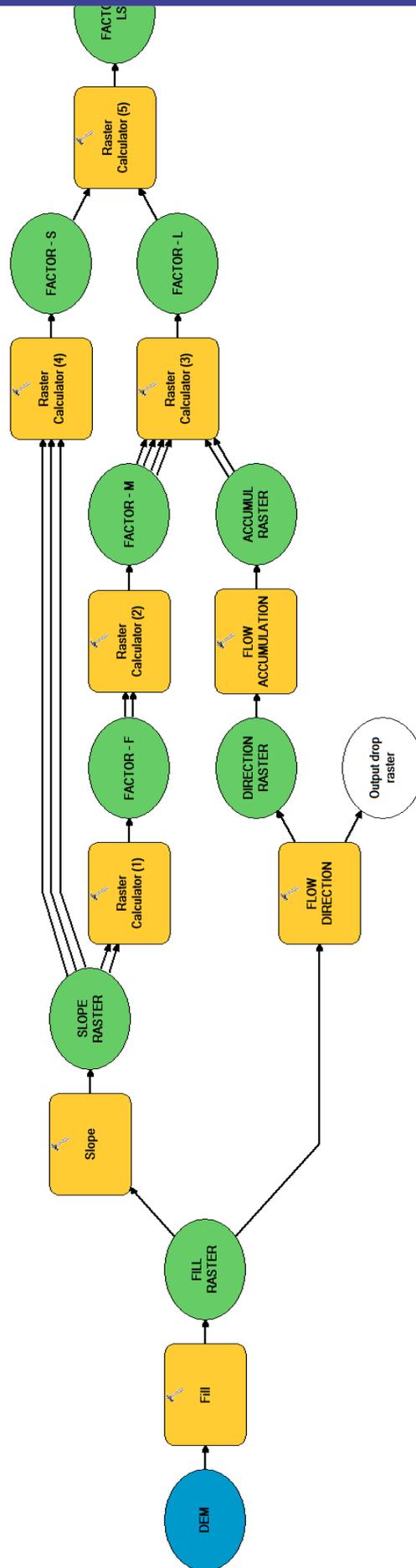
La pendiente es una de las variables que influye en la mayor o menor erosión hídrica de los suelos. El factor LS se calculó aplicando las ecuaciones usadas en RUSLE (Renard et al., 1997, citado por Velásquez, 2008), teniendo como punto de partida el DEM obtenido (figura 34), de 30m de resolución y el ángulo de inclinación del terreno.

En la figura 41, se muestra la distribución de pendientes en grados que van desde 0 a 60.65 encontrando áreas con pendientes considerables. En la figura 42, se muestran los valores de la longitud de pendiente (factor L) de la subcuenca Conduriri, que van desde 1 a 136.504. En la figura 43, se obtienen los valores de la gradiente de la pendiente (factor S), la cual varía desde 0.03 a 14.1418.

De la figura 44, se observa que los valores de LS según el método de Renard varían entre 0.03 – 755.029, los valores más altos se encuentran en las zonas de mayor longitud y pendiente, ya que mientras mayor sea la longitud, mayor será el recorrido de una gota de lluvia hasta llegar al punto donde se concentra el flujo junto al suelo desprendido; lo mismo sucede con la pendiente ya que, la pérdida de suelo se incrementa más rápidamente con pendientes muy escarpadas en comparación con el incremento en longitud de la pendiente, coincidiendo con Velásquez (2008).

En la figura 40, se muestra el diseño del modelo espacial para el cálculo de la longitud y gradiente de la pendiente (Factor LS).

Figura 40: Modelo Espacial para Obtener el Mapa de Factor de Longitud y Gradiente de Pendiente



- Ráster Calculator (1) = $((\text{Sin}(\text{\%Slope} \times 0.01745) / 0.0896) / (3 * \text{Power}(\text{Sin}(\text{\%Slope} * 0.01745), 0.8) + 0.56))$
- Ráster Calculator (2) = $\text{\% Factor_F} / (1 + \text{\% Factor_F})$
- Ráster Calculator (3) = $(\text{Power}(\text{\% Acumulation} + 900), (\text{\% Factor_M} + 1)) - \text{Power}(\text{\% Acumulation}, (\text{\% Factor_M} + 1)) / (\text{Power}(30, (\text{\% Factor_M} + 2)) * \text{Power}(22.13, \text{\% Factor_M}))$
- Ráster Calculator (4) = $\text{Con}(\text{Tan}(\text{\% Slope} * 0.01745) < 0.09), (10.8 * \text{Sin}(\text{\% Slope} * 0.01745) + 0.03), (16.8 * \text{Sin}(\text{\% Slope} * 0.01745) - 0.5)$
- Ráster Calculator (5) = $\text{\% Factor_L} * \text{\% Factor_S}$

Figura 41: Mapa de Pendientes en Grados de la Subcuenca Conduriri

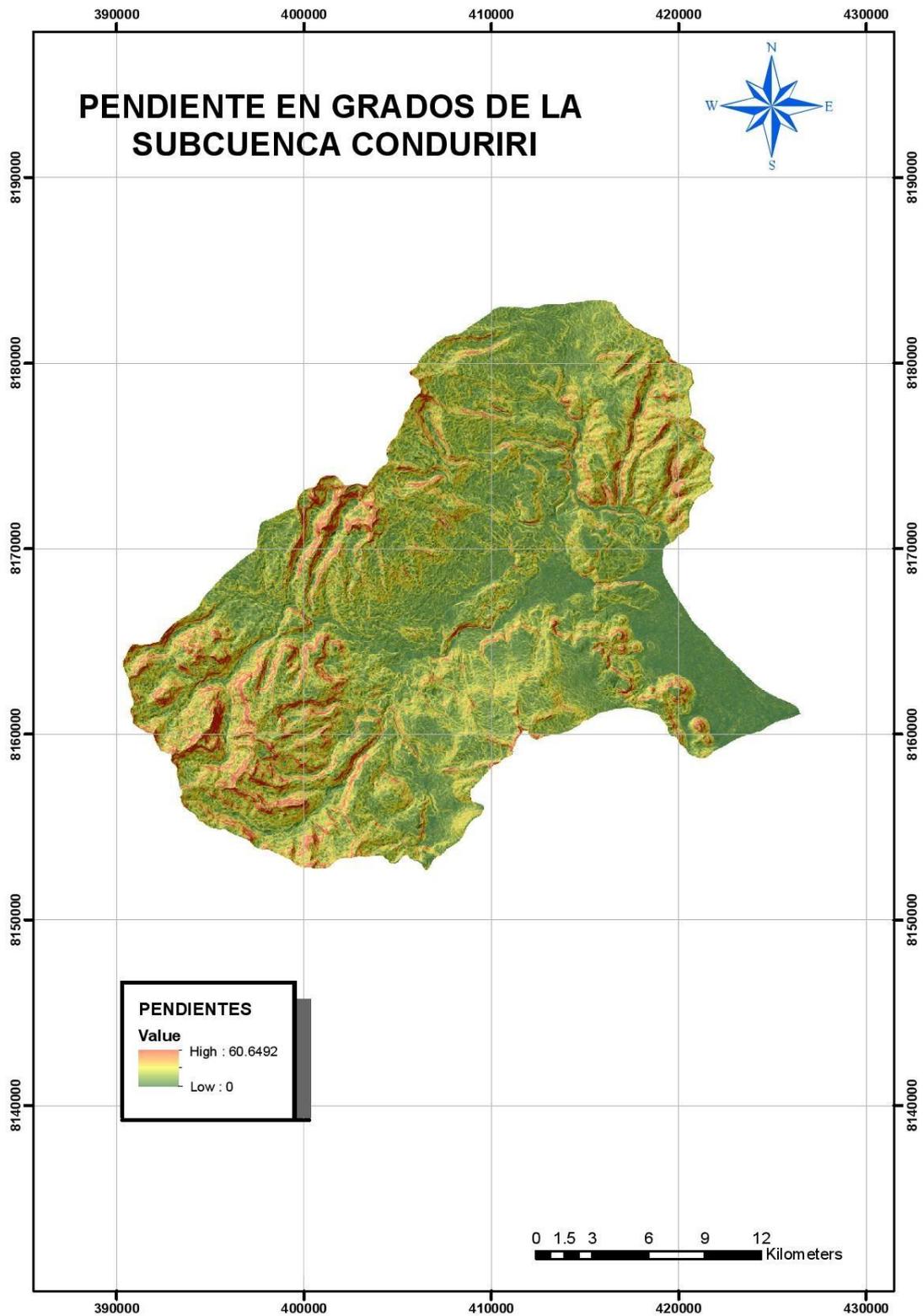


Figura 42: Mapa del Factor de Longitud de Pendiente (L) de la Subcuenca Conduriri

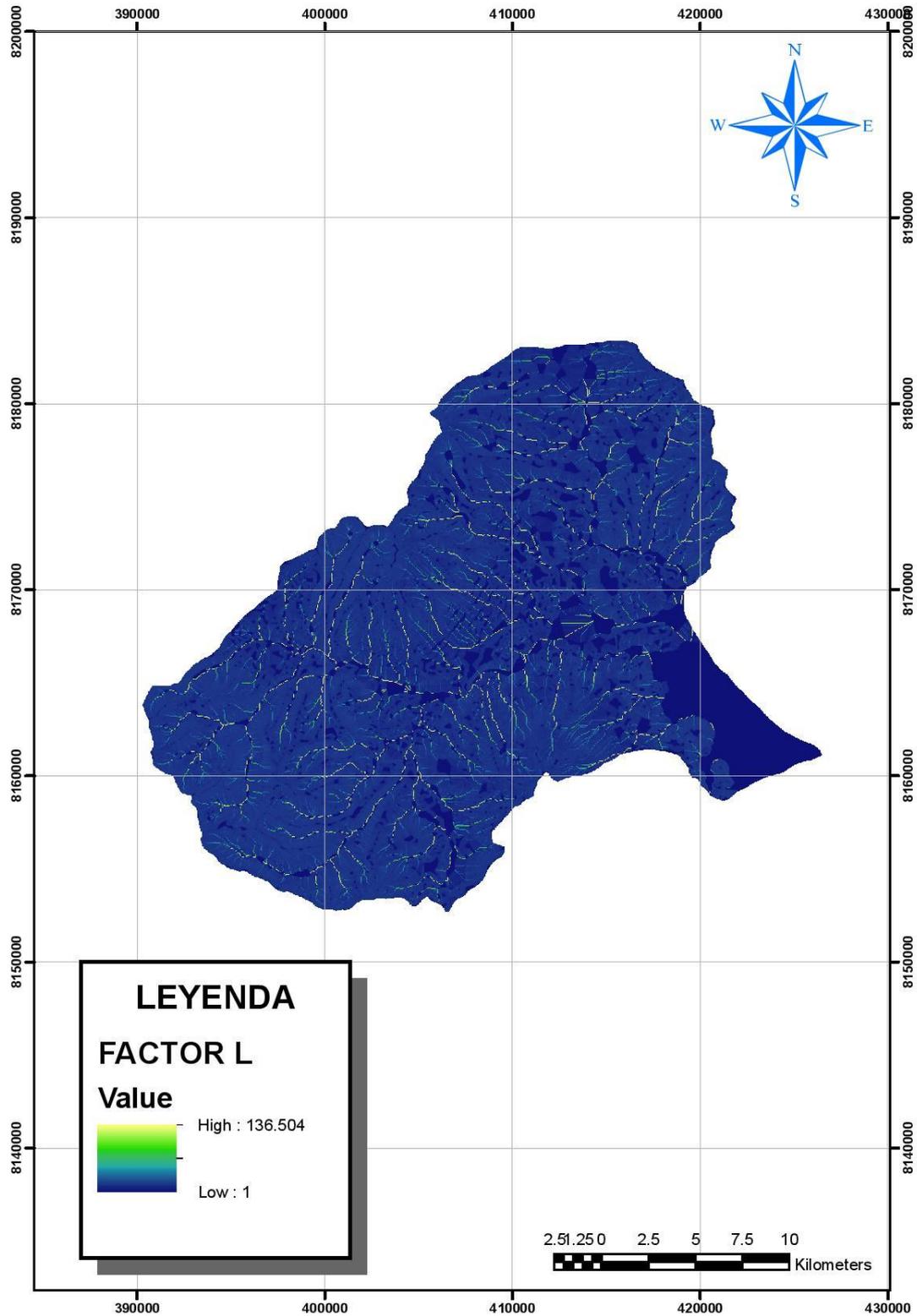


Figura 43: Mapa del Factor de Gradiente de la Pendiente (S) de la Subcuenca Conduriri

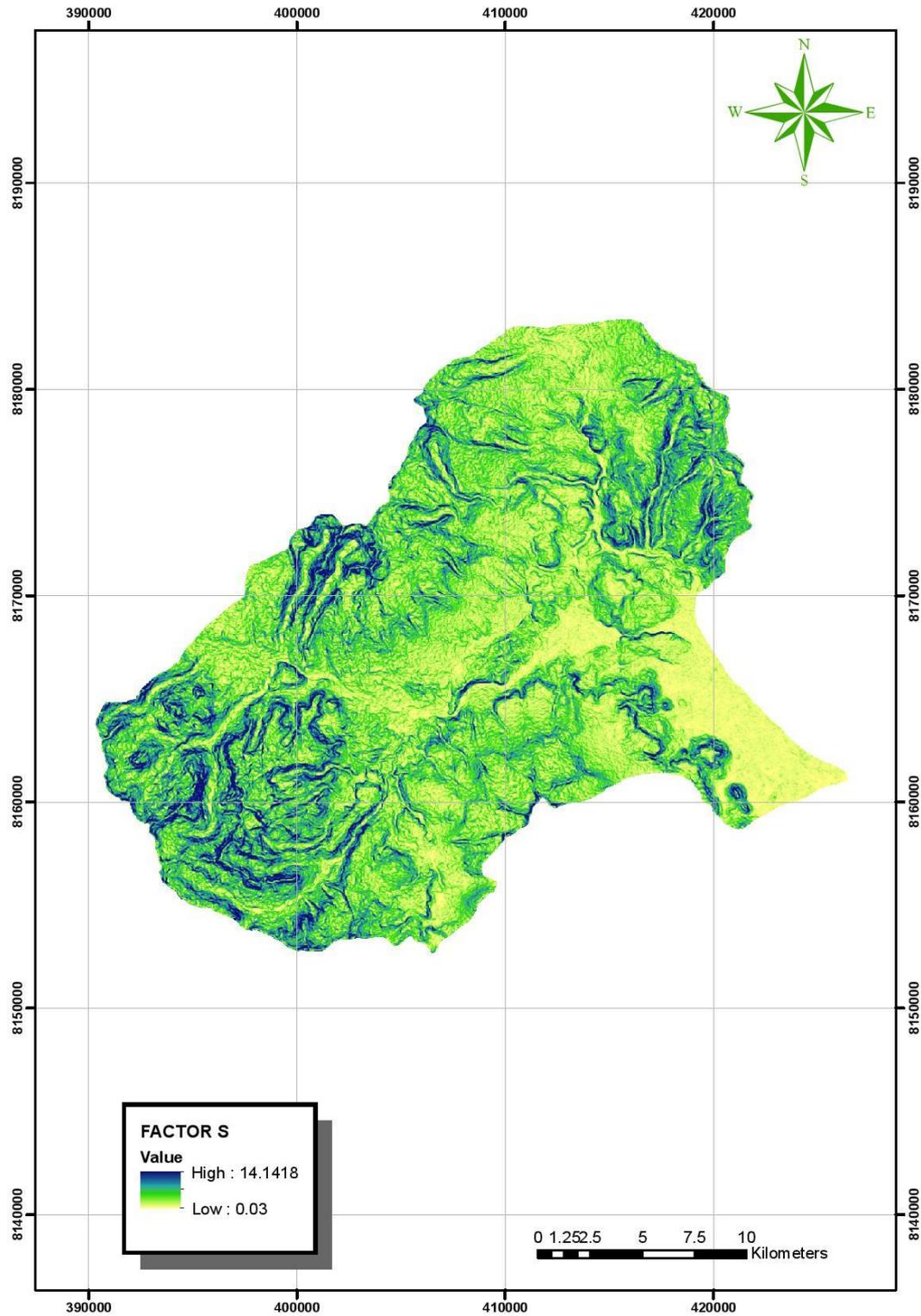
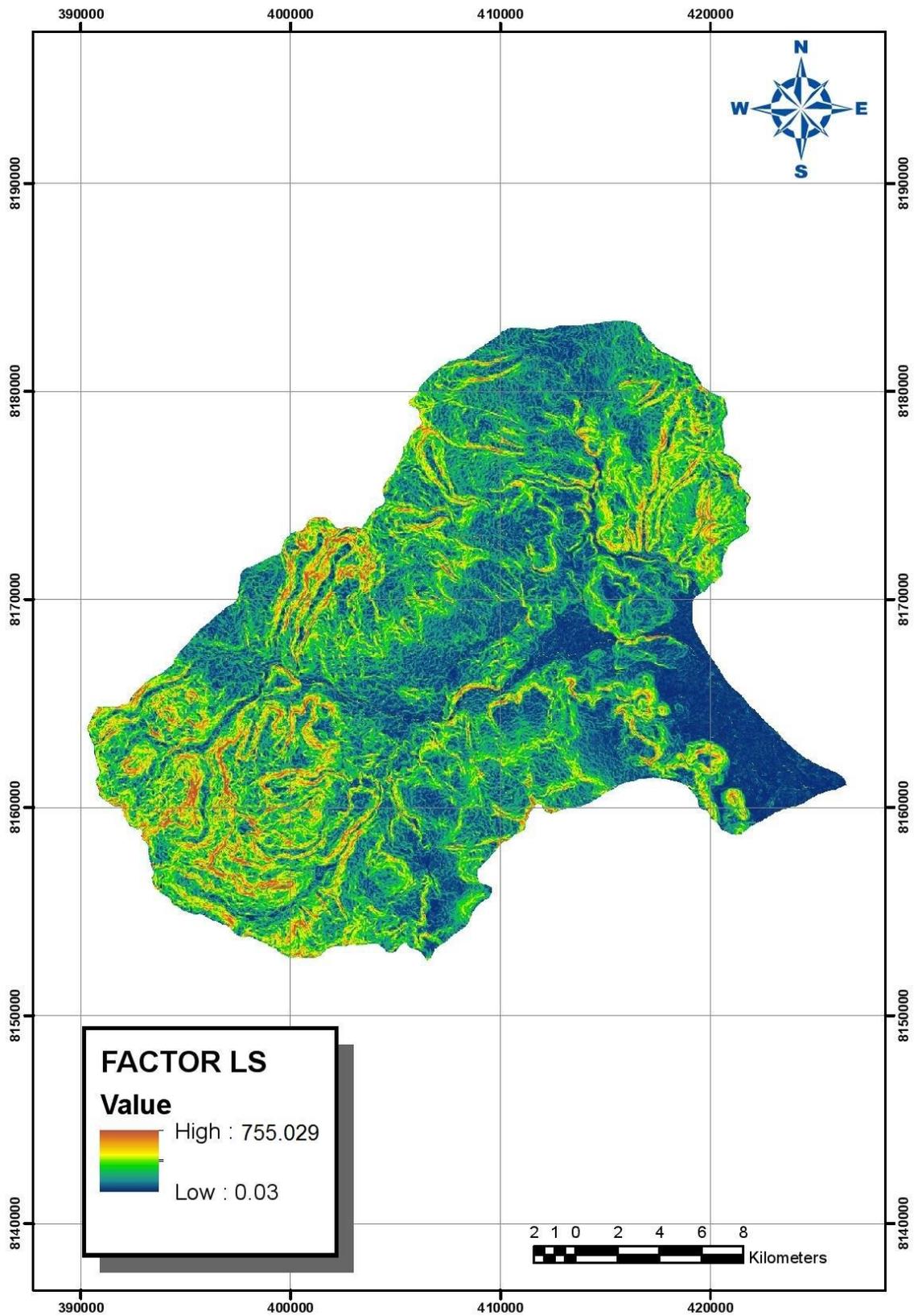


Figura 44: Distribución Espacial del Factor – LS

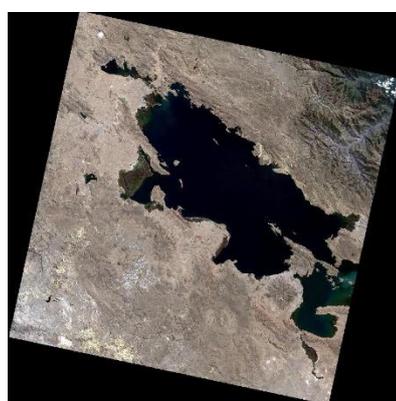


4.1.3 Factor “C”, Cobertura Vegetal

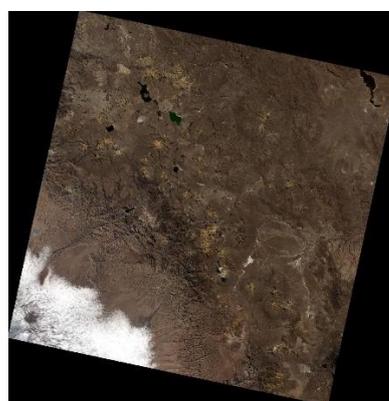
4.1.3.1 Composición de Bandas

En la figura 45, se muestra el resultado de la composición de las bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 9, de las dos escenas del sensor Landsat 8 OLI/TIRS (002 – 071 y 002 – 072).

Figura 45: Representación de las bandas espectrales (banda 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9) y composición en color natural (4/3/2)



002 – 071 (RGB - 432)



002 – 072 (RGB - 432)

4.1.3.2 Mosaico de Imágenes

En la figura 46, se muestra el resultado del mosaico de las dos escenas Landsat donde se encuentra la subcuenca Conduriri.

Figura 46: Mosaico de las escenas Landsat 002 – 071 y 002 – 072



4.1.3.3 Corrección Geométrica

La corrección geométrica de la imagen (mosaico) se realizó con el software ArcGis v.10.2.2, a partir de cartografía del Instituto Geográfico Nacional (red hídrica), se marcó 160 puntos de control de manera homogénea en la cartografía base y en la imagen, en este proceso se generó un error medio cuadrático inferior a un pixel cumpliendo con la condición, finalmente las imágenes quedaron georreferenciadas en el sistema de proyección UTM, zona 19S y datum geodésico WGS 84.

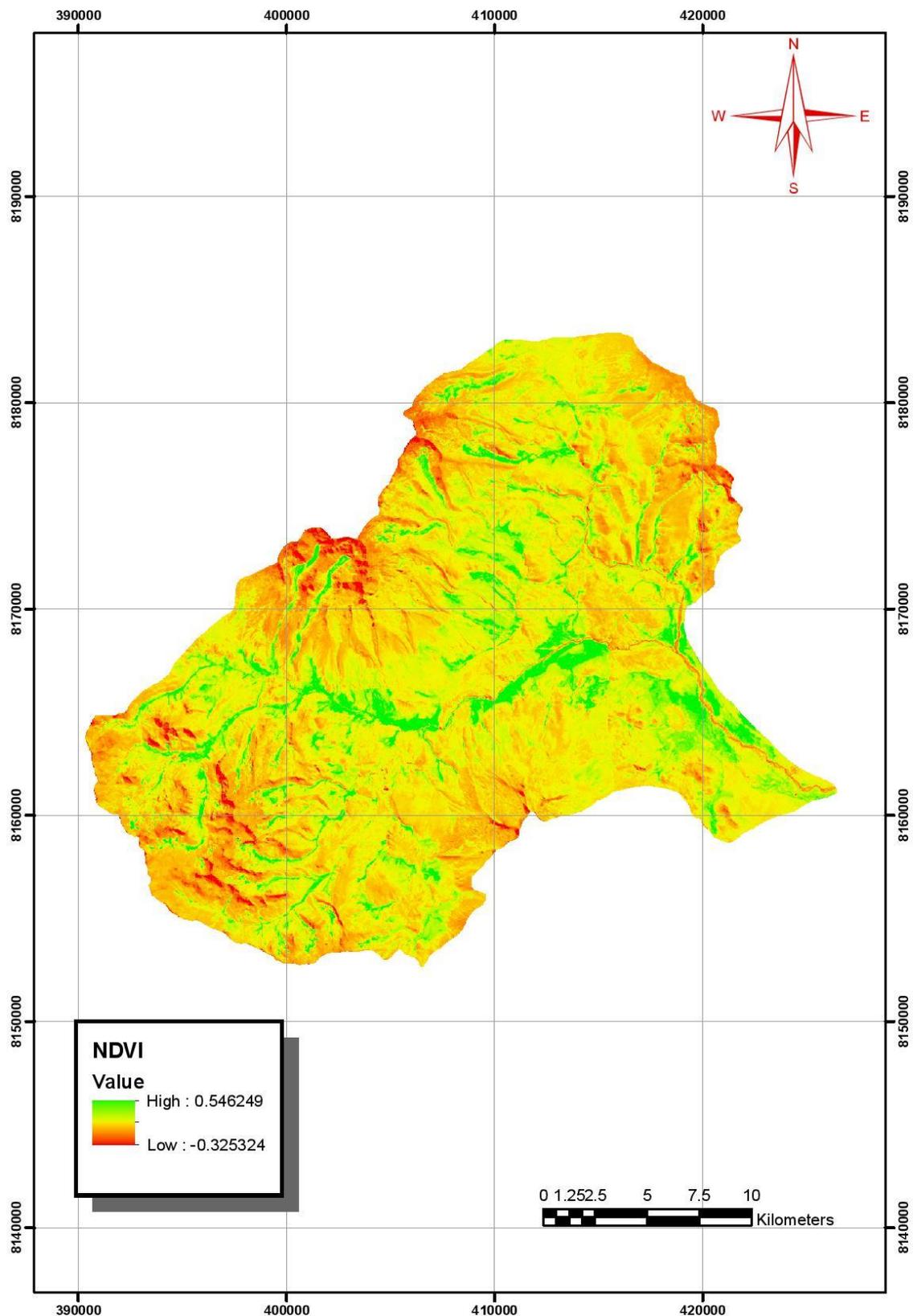
4.1.3.4 Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI)

Con el propósito de mejorar la discriminación entre las coberturas de uso del suelo y resumir un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto más pequeño, se aplicó el índice de vegetación de la diferencia normalizada. Los valores NDVI de la subcuenca Conduriri fluctúan entre -0.32 a 0.55, lo cual indica que la densidad vegetal es heterogénea, con sectores que tienen una gran cobertura y otros que poseen una escasa cobertura o suelo desnudo. Los valores cercanos a 0.55 se encuentran en las partes bajas de la cuenca, en torno a lecho de los ríos, con respecto a sectores ubicados en laderas y cumbres de media y alta montaña poseen índices bajo 0, como se puede observar en la figura 47. En la figura también se observa que la parte de color roja pertenece a las fuentes de agua y las de color verde corresponden a la vegetación más saludable. Se puede apreciar la escasa vegetación en la zona, esto hace que el suelo sea más propenso a la erosión hídrica.

4.1.3.5 Mejoras y Realces

Se aplicó el ajuste de brillo y contraste, el cual hace que las características importantes de los datos sean más identificables, facilitando la interpretación visual de la imagen.

Figura 47: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)



4.1.3.6 Clasificación No Supervisada

El proceso de clasificación no supervisada fue realizado aplicando el software ArcGis v.10.2.2, mediante la herramienta ArcToolbox – Spatial Analyst Tools – Multivariate – Iso Cluster Unsupervised Classification.

En base a esta clasificación se ha obtenido 5 clases, en la figura 48, muestra el resultado de la clasificación no supervisada.

La realización de esta clasificación genera algunos errores, especialmente en los bofedales y pajonales, además que no se pudo identificar la totalidad de las clases, sin embargo esta clasificación fue una herramienta importante al igual que la interpretación visual para continuar con la clasificación supervisada en vista de que facilito identificar las áreas de entrenamiento para el trabajo de campo.

El en cuadro 20, se muestran los tipos de cubierta vegetal, obtenidos de la clasificación no supervisada.

Cuadro 20: Tipos de Cubierta Vegetal (clasificación no supervisada)

Clase de Cubierta Vegetal	Valores C
Rocas	0
Ríos y Lagunas	0
Suelo desnudo y pajonal	0.42
Bofedales y Pastos	0.03
Nevados	0

Figura 48: Resultados de la Clasificación No supervisada

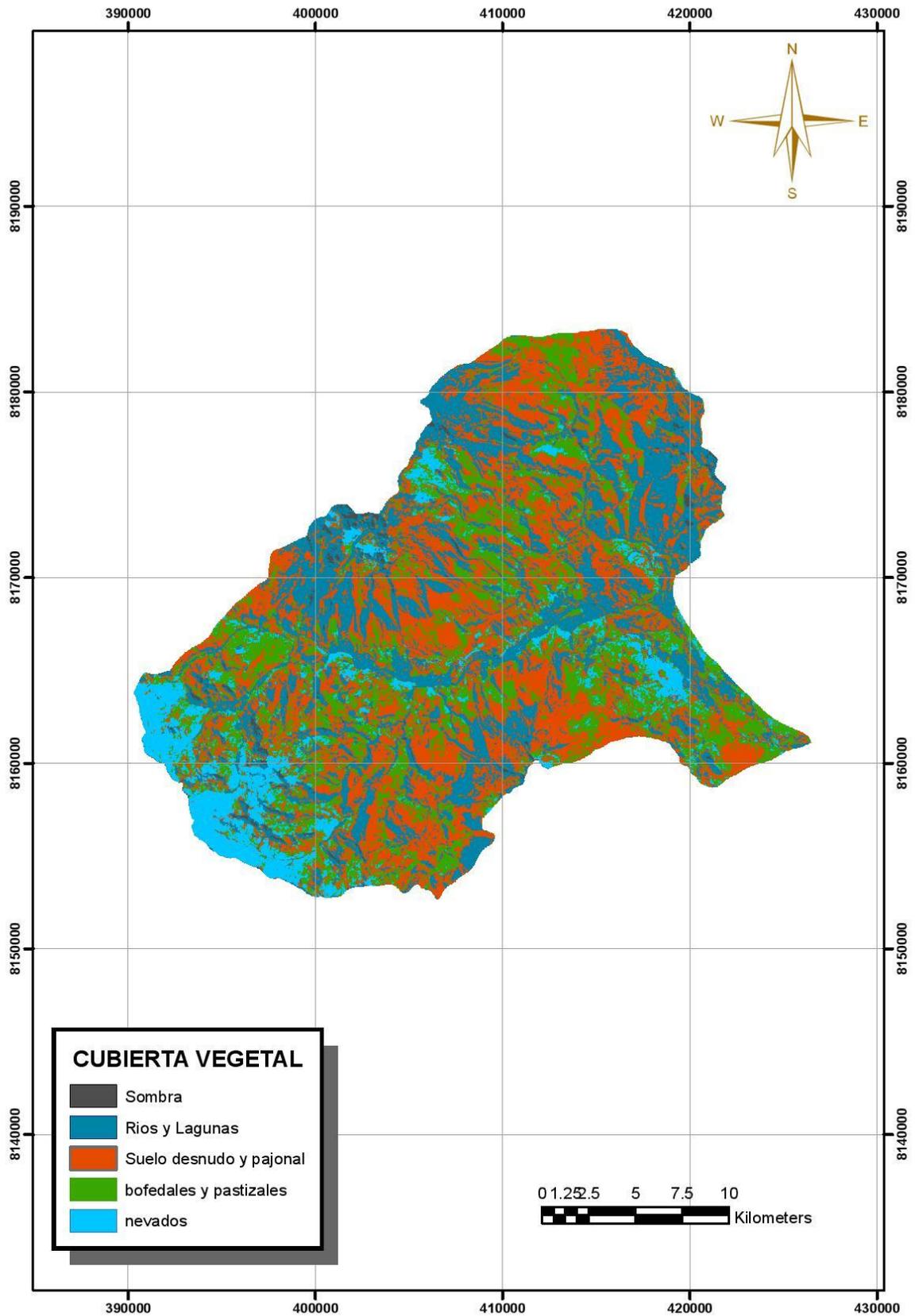
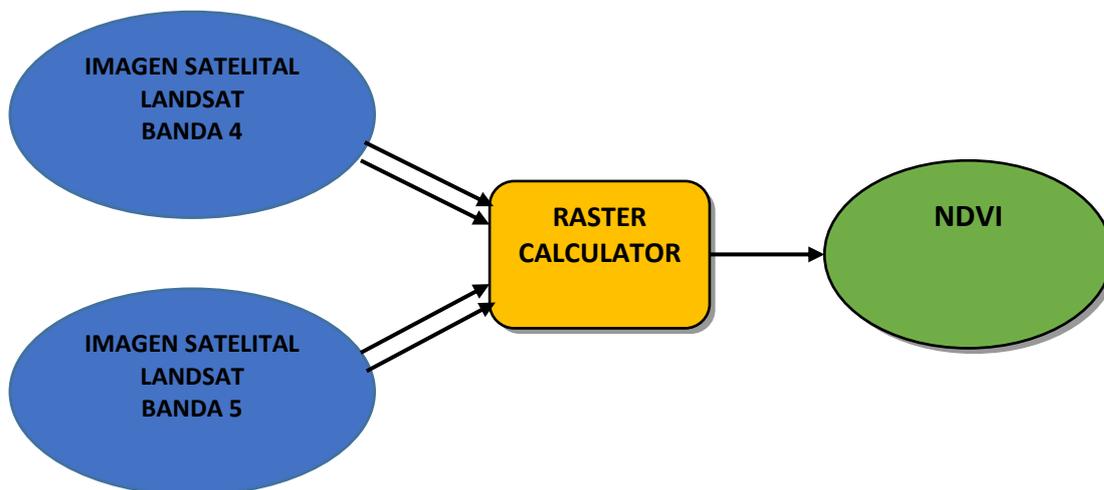


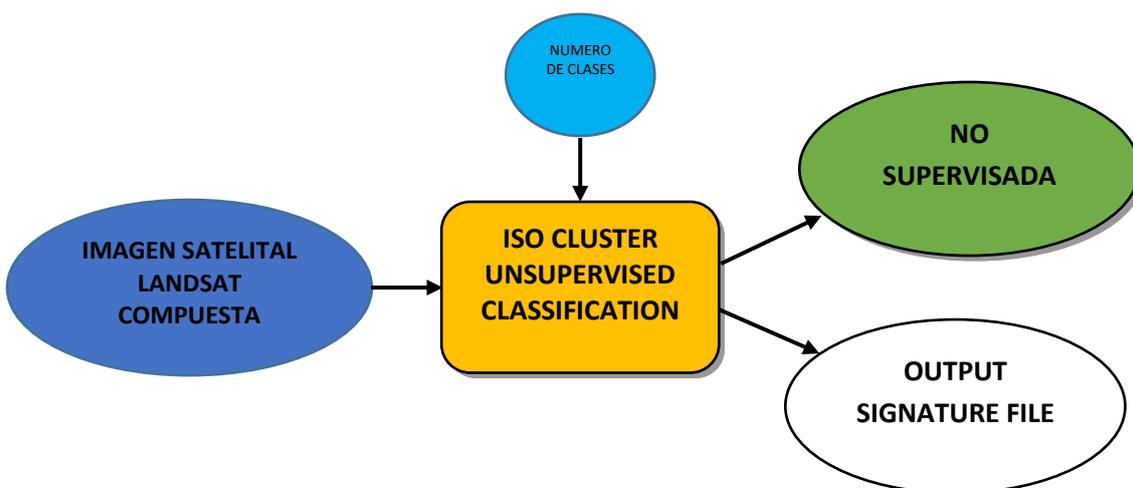
Figura 49: Modelo Espacial para Obtener el Mapa de Factor de Cobertura Vegetal

a) Modelo para Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)



RASTER CALCULATOR: Float ("Banda 5" – "Banda 4") / Float ("Banda 5" + "Banda 4")

b) Modelo para la Clasificación no Supervisada



4.1.3.7 Clasificación Supervisada

Producto del proceso de la clasificación supervisada se obtuvo el mapa de cobertura vegetal que se muestra en la figura 50. En el cuadro 21, se puede apreciar que el mayor porcentaje de la imagen corresponde a la clase de pajonal Ichu (45.35%), seguida por los terrenos con escasa vegetación (18.57%). Esto supone que hay un área considerable con vegetal escasa y por ende más susceptible a los agentes causantes de erosión.

Cuadro 21: Superficie ocupada por los tipos de cubierta vegetal

N°	Clase	Área <i>km²</i>	%	N°	Clase	Área <i>km²</i>	%
1	Área urbana	0.31	0.05	10	Pajonal de Chilligua	11.74	1.93
2	Áreas arenosas naturales	1.38	0.23	11	Pajonal de Chilligua y Crespillo	26.29	4.32
3	Bofedales	45.78	7.53	12	Pajonal de Ichu	275.65	45.35
4	Bosque de Eucalipto	0.25	0.04	13	Pastizal de Chiji	0.57	0.09
5	Bosque de Queñua	17.58	2.89	14	Pastizal de crespillo	77.40	12.73
6	Cuerpo de agua	1.21	0.20	15	Rio	2.26	0.37
7	Glaciar	0.71	0.12	16	Rocas con escasa vegetación	30.63	5.04
8	Matorral de Canlli	0.20	0.03	17	Terreno con escasa vegetación	112.89	18.57
9	Matorral de Tola e Ichu	3.04	0.50				
TOTAL						607.82	100

Fuente: Elaboración propia

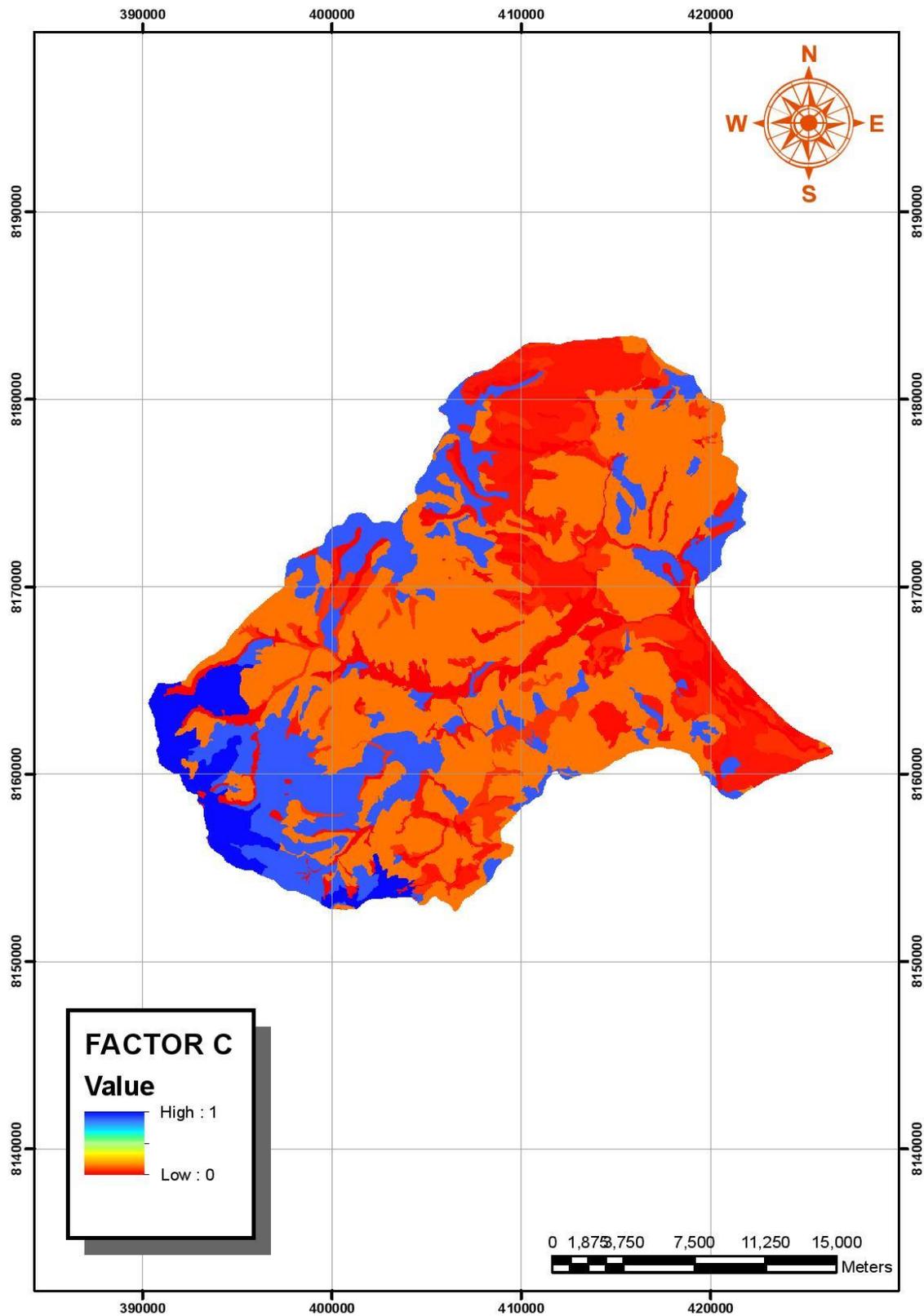
Los valores de C hallados en base al cuadro 22, van desde 0.003 a 1, correspondiendo los valores cercanos a 0.003 a zonas que representan densa cobertura (bofedales) y las áreas que presentaron índices bajos de protección (valores de C cercanos a 1), se encuentran en las partes altas de la cuenca, esto se debe a la escasa vegetación y a que presentan mayores porcentajes de suelo desnudo. El cuadro 22, muestra los valores de C de todas las unidades estudiadas.

Cuadro 22: Valores del factor C

Clase	Valores C	Clase	Valores C	Clase	Valores C
Área Urbana	0.003	Matorral de Canlli	0.036	Pastizal de Chiji	0.013
Áreas arenosas naturales	0.001	Matorral de tola e Ichu	0.036	Pastizal de Crespillo	0.011
Bofedal	0.003	Pajonal de Chilligua	0.12	Rocas con escasa vegetación	1
Bosque de eucalipto	0.003	Pajonal de Chilligua y Crespillo	0.03	Terreno con escasa vegetación	0.9
Bosque de Queñua	0.037	Pajonal de Ichu	0.12		

Fuente: Elaboración propia

Figura 50: Mapa de Cobertura Vegetal – C (Clasificación Supervisada) en Formato Ráster



4.1.4 Factor “K”, Erosionabilidad del Suelo

Los suelos dentro de la Subcuenca Conduriri elaborado por el Proyecto: “Estudio de suelos y capacidad de uso mayor de la Región Puno”, estudios realizados por el “Ordenamiento Territorial Región Puno” (2014), se muestran en el cuadro 23 y en la figura 51.

Cuadro 23: Características de las unidades de suelo en la Subcuenca Conduriri

N°	Unidad de Suelos	Textura	Área km^2	Porcentaje (%)
1	Miscelaneo Banco de arena	Arenosa	1.38	0.2270
2	Calacollo - Vizcachas	Moderadamente gruesa	0.18	0.0296
3	Chincheros - Chejemoco	Media	0.003	0.0005
4	Calacollo - Huaitire	Moderadamente gruesa	103.43	17.0165
5	Calacollo - Suches	Gruesa	13.2	2.1717
6	Calacollo - Miscelaneo (afloramiento lítico)	Moderadamente gruesa	206.03	33.8964
7	Calacollo - Cachiña	Media	204.54	33.6512
8	Miscelaneo (Afloramiento Lítico)	Moderadamente gruesa	71.36	11.7403
9	Miscelaneo (Tufo volcanico)	-	3.13	0.5150
10	Miscelaneo (Glaciar)	-	0.79	0.1300
11	Laguna	-	1.21	0.1991
12	Rio	-	2.26	0.3718
13	Area urbana	-	0.31	0.0510
TOTAL			607.823	100

Fuente: Ordenamiento Territorial Región Puno (2014)

En la figura 52, se muestra los valores de K para las asociaciones de suelo presentes en el área de estudio. El rango de valores de K oscila entre 0 a valores máximos cercanos a 0.41. En la subcuenca Conduriri los suelos no presentan un grado Alto de erodabilidad (valores de K mayores a 0.45), el 16.55% de los suelos presentan grado Bajo (valores de K entre 0.05 y 0.20) debido a la presencia de texturas finas o gruesas, los mismos ofrecen resistencia al desprendimiento de las partículas del suelo y escaso escurrimiento respectivamente, el 79.95% de los suelos presenta grado Moderado (valores de K entre 0.20 y 0.45) lo que nos indica que son suelos francos, por lo tanto la erosión hídrica es moderada debido a que el escurrimiento también es moderado.

Figura 51: Serie de Suelos registrados de la Subcuenca Conduriri

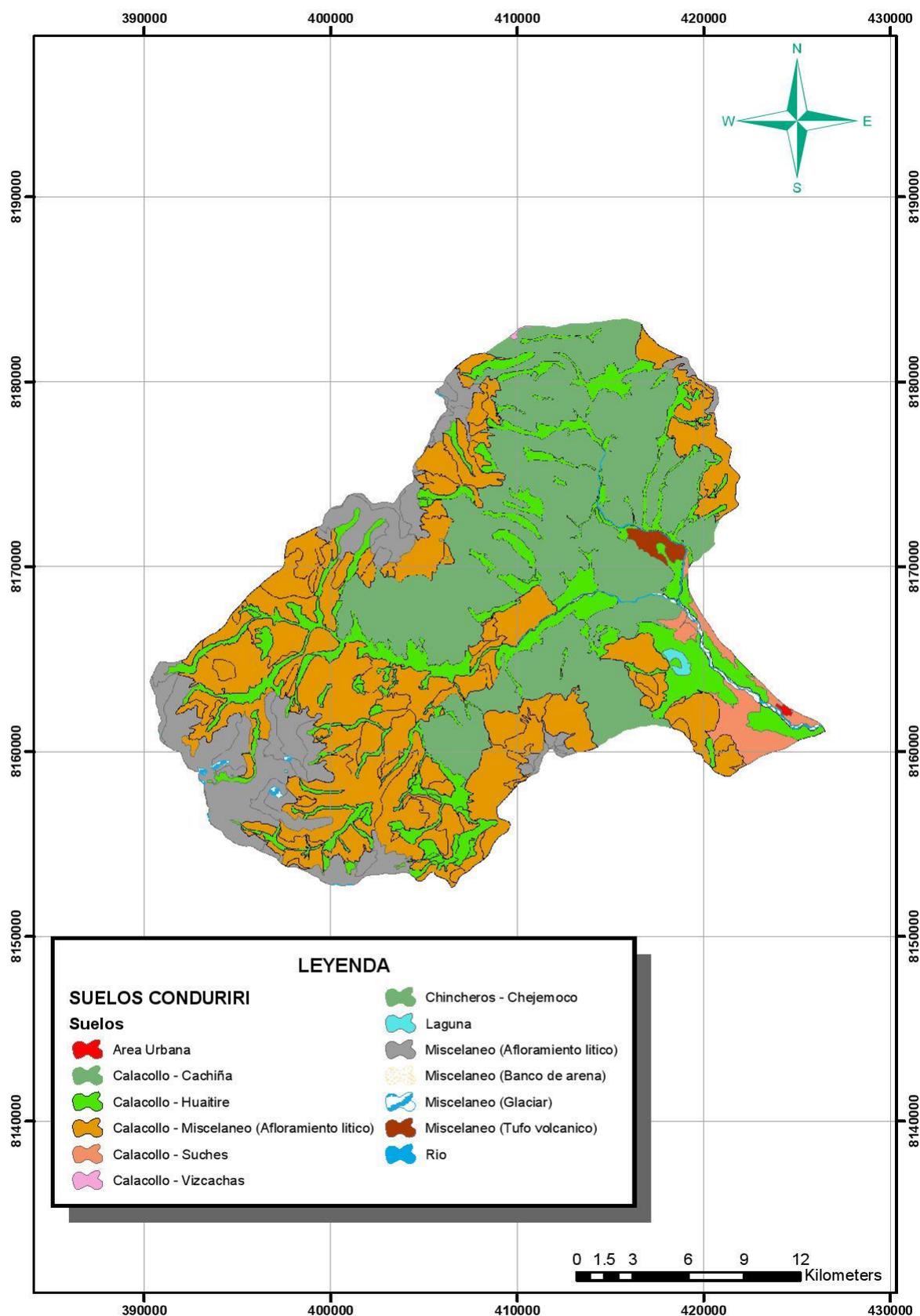
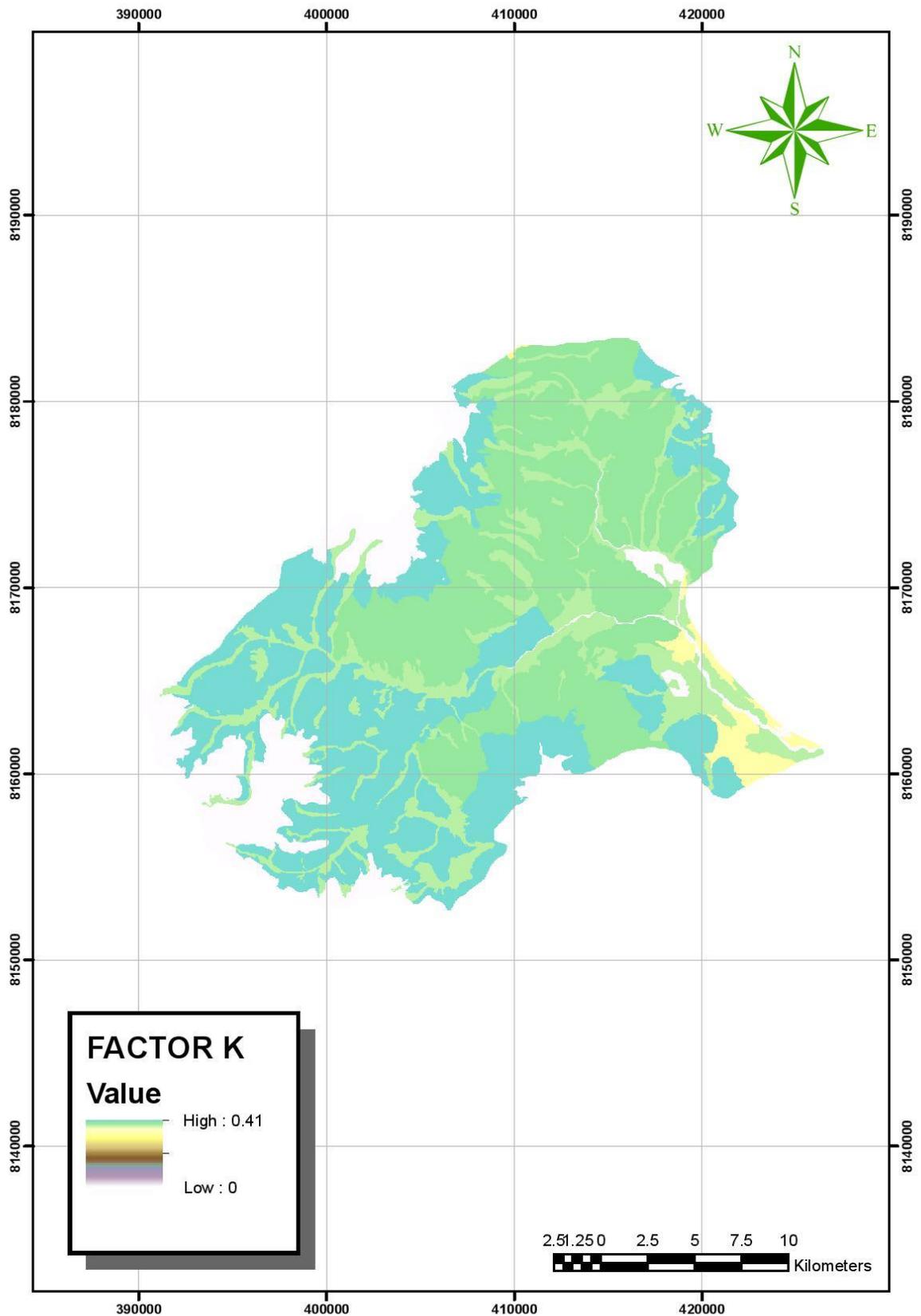


Figura 52: Susceptibilidad de los Suelos (Factor K)



4.2 Erosión Hídrica Actual en la Subcuenca Conduriri

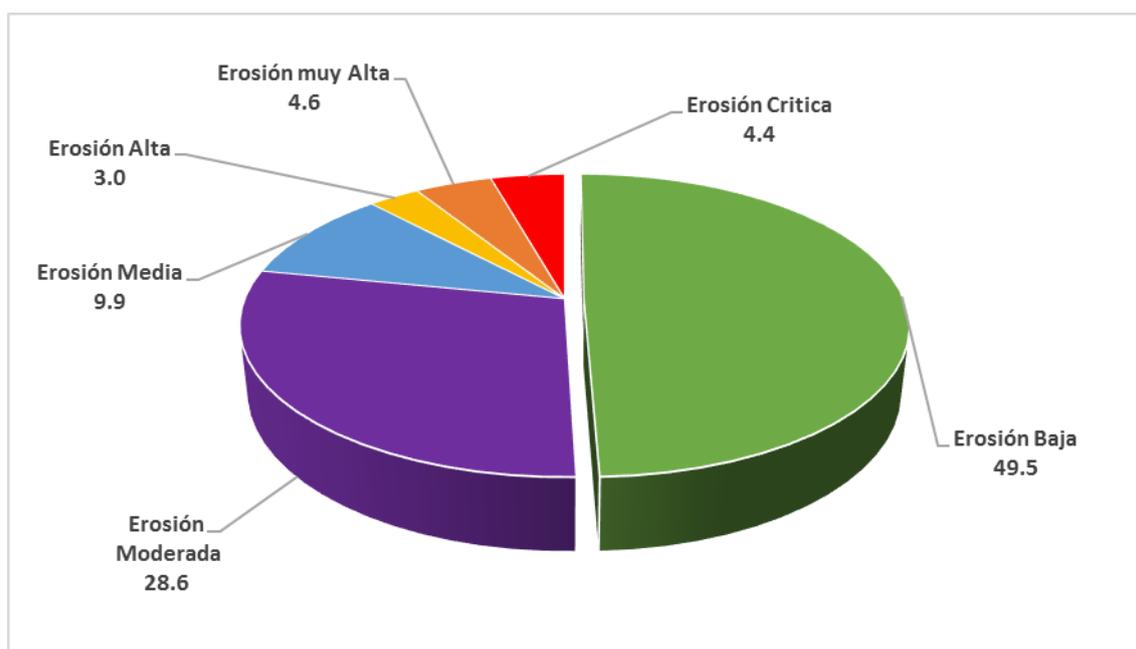
La figura 54, presenta espacialmente los resultados estimados de la erosión hídrica actual de la subcuenca Conduriri. Sus valores porcentuales y en superficie se presentan en el cuadro 24 y figura 53.

Cuadro 24: Superficie con grados de erosión de la subcuenca Conduriri

Grado de erosión	Perdida (tn/ha/año)	Área km^2	%
Erosión Baja	< 5	300.99	49.5
Erosión Moderada	5 -- 25	173.94	28.6
Erosión Media	25 - 50	60.27	9.9
Erosión Alta	50 - 100	18.46	3.0
Erosión muy alta	100 - 200	27.66	4.6
Erosión crítica	>200	26.50	4.4
TOTAL		607.82	100

Fuente: Elaboración propia

Figura 53: Distribución en Porcentajes de los Niveles de Erosión



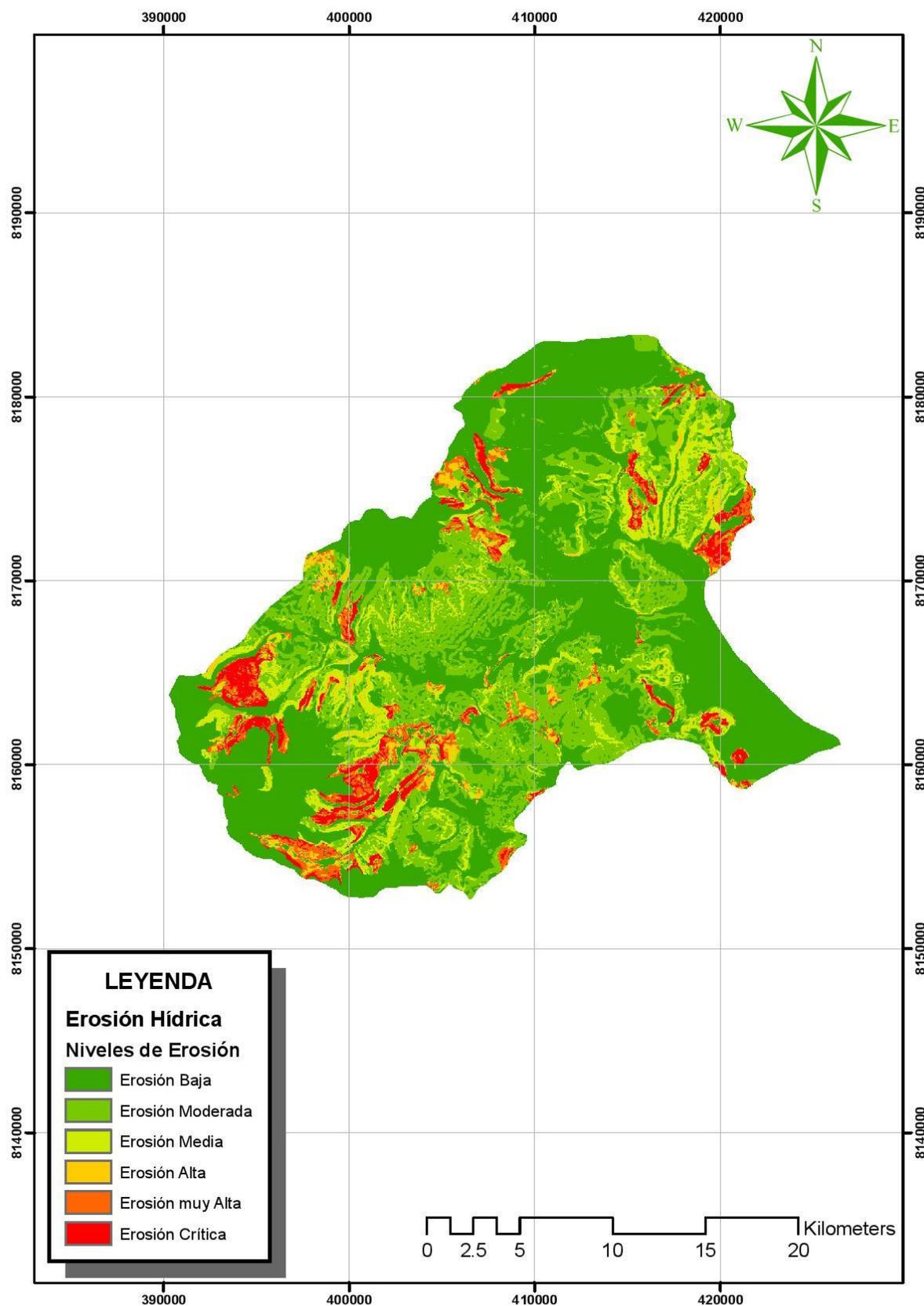
Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos nos muestran que en la subcuenca Conduriri el mayor porcentaje de superficie corresponde a la clase de erosión baja con un 49.5% que presenta aproximadamente 300.99 km^2 , ubicándose predominantemente en las partes baja y media de la subcuenca, mientras que en menores porcentajes se encuentran las clases de erosión alta con un 3% conformado por un área de 18.46 km^2 , erosión muy alta con un 4.6% conformado por un área de 27.66 km^2 y la erosión crítica con un 4.4% conformado por un área de 26.50 km^2 , distribuyéndose particularmente en las partes altas de la subcuenca. Los resultados reflejan que hay una mayor pérdida de suelo en áreas con pendientes más inclinadas y con un menor grado de cobertura vegetal; por otro lado, los suelos con nula o mínima pérdida por erosión se encuentran en áreas con pendientes muy leves y/o con una muy buena cobertura vegetal.

Respecto al valor máximo y mínimo de pérdida de suelo encontrado en la Subcuenca Conduriri para la situación actual es del orden de 612.78 tn/ha/año ; como el valor más alto, ubicado en una mínima superficie de la subcuenca y de 0.153 tn/ha/año ; como el valor más bajo de la pérdida de suelo, los cuales en algunos casos es inferior, en otros similar y en otros superiores a los reportados en la biografía consultada; por ejemplo, Quintanilla (2008), para la cuenca del río Caine del departamento de Cochabamba, reporta un valor máximo de pérdida de suelo de 1945 tn/ha/año . Ancco (2006), para la microcuenca del río Coraraca, ubicada dentro de la cuenca del río Ilave, encontró un 33.92% de la superficie con un riesgo de degradación por erosión hídrica muy alto ($>200 \text{ tn/ha/año}$) y una superficie de 6.15% con riesgo de degradación ligera ($<10 \text{ tn/ha/año}$).

Por otro lado Rafaellí (2003), menciona que la estimación cuantitativa precisa de la pérdida de suelo por erosión hídrica de una cuenca, resulta pues, improbable en práctica, a excepción de aquellos sitios en que se disponga información fehaciente para proceder al ajuste de la metodología, debido a la complejidad del proceso erosivo, a la cantidad de factores que influyen en el mismo y a la escala de los fenómenos en juego que involucran desde cuestiones tan puntuales como la cohesión de las partículas del suelo hasta parámetros de orden espacial, como la temperatura o las precipitaciones en la subcuenca.

Figura 54: Mapa de la Erosión Actual en la Subcuenca Conduriri



CAPITULO V

CONCLUSIONES

- Se determinó el índice de erosividad de las precipitaciones o Factor R, mediante el método IMF, con valores de 95.2 a 109.8 $Mj*mm/ha*h*año$, para toda la subcuenca Conduriri.
- Se determinó el índice de erodabilidad del suelo o factor K, con valores que oscilan entre 0 a 0,41 $tm*ha*h/ha*Mj*mm$.
- Se determinó el factor de longitud y gradiente de la pendiente o factor LS, con valores entre 0 a 755.029 para toda la subcuenca.
- Se determinó el factor de cobertura vegetal o factor C, obteniéndose 7 tipos de usos principales en la subcuenca: bofedales con 0.003, bosque de queñua 0.037, pajonal de chilligua 0.12, pajonal de chilligua y crespillo, pajonal de ichu, pastizal de crespillo y suelo desnudo con valor de 1.
- Los valores obtenidos a través de la metodología RUSLE, muestran que la subcuenca Conduriri posee, en un 4.4% de su superficie un riesgo de degradación por erosión hídrica crítica, degradación muy alta cubren un 4.6% de la subcuenca, los riesgos de degradación alta ocupan un 3%, degradación media un 9.9%, los riesgos de erosión moderada ocupan el 28.6% y erosión baja con un 49.5%.
- Los resultados alcanzados permiten obtener una visión general de manera cualitativa y cuantitativa de la variación espacial de los sectores más susceptibles en la erosión hídrica de la subcuenca Conduriri, constituyéndose en un instrumento de gestión fundamental a partir del cual se podrá realizar la planificación y conservación de la subcuenca en materia del recurso suelo.
- El uso de la información obtenido por teledetección y la utilización de los SIG, se constituyen en herramientas básicas para la obtención y evaluación de las variables que afectan la erosión del suelo.

CAPITULO VI

RECOMENDACIONES

- Concientizar a la población involucrada y a los responsables del manejo y gestión de los recursos naturales, para propiciar la conservación de los mismos.
- Elaborar un plan de restauración y conservación de la cobertura vegetal mediante el enriquecimiento de la flora con la instalación de especies de rápido crecimiento, y programas de restauración.
- Promover el manejo de actividades y el uso adecuado del suelo: aprovechamiento forestal sostenible y aplicación de buenas prácticas agrícolas.
- Se debe dar especial atención a corto plazo a las zonas que presentan los mayores grados de erosión, priorizando las partes altas de la subcuenca, las cuales presentan mayor susceptibilidad a la pérdida de suelo.
- Con el fin de disminuir el efecto del factor topográfico (LS), se deben establecer barreras vivas, muertas y construir zanjas de infiltración en contra del sentido de la pendiente con el fin de disminuir la velocidad del agua de escorrentía y con ello su capacidad erosiva y de esta forma se implementen medidas que mitiguen y controlen el proceso erosivo, para poder asegurar el recurso suelo para las futuras generaciones.
- Es importante la continuidad de este tipo de investigaciones con miras a una mejor clasificación que conlleve a un óptimo uso y manejo del suelo, con la adopción de prácticas de conservación de suelos a partir de las necesidades de cada cuenca. El éxito de la conservación de subcuencas y microcuencas no está asegurado si no se garantiza la actualización periódica de la información.

CAPITULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achuy, J. 2006. Sistemas de Información Geográfica. Lima, PE. Editorial Grupo Universitario, 321 p.
- Almorox, J. De Antonio, R. Saa. A. Diaz. M. y Gasco. J. M. 1994, Métodos de estimación de la erosión hídrica. Editorial Agrícola Espabila, S.A. Madrid ES. 436 p.
- Almoza, I., Schiettecatte, W., Medina, H., Alonso, G. 2007. Metodología para la estimación del factor erosividad de las precipitaciones en el modelo (RUSLE). Universidad Agraria de La Habana. La Habana – Cuba. 9pp.
- Alonso, G., Ruiz, M., Schiettecatte, W., Díaz, J., Almoza, Y. 2007. Riesgo de erosión hídrica en la cuenca hidrográfica La Guira, Rio Cuyaguaje, Cuba. Universidad Agraria de La Habana. La Habana – Cuba. 15pp.
- Ancco, Y. 2006. Modelamiento de la erosión hídrica en la microcuenca del río Coraraca – Ilave. Tesis pregrado Universidad Nacional del Altiplano Puno, PE. 98 p.
- Antezana, J. 2001. Calibración de los factores de erosión utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo revisado “RUSLE” en sistemas de producción agrícola de la cuenca Taquiña. Centro de Levantamientos Aeroespaciales y aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos. Taquiña – Bolivia. 77 pp.
- Arnoldus, Hj. 1978. An approximation of rainfall in the Universal Soil Loss Equation. New York, US. In M De Boodt and D. Gabriels (Editors).
- Barrios, A. Y Quiñonez, E. 2000. Evaluación de la erosión utilizando el modelo R (USLE) con apoyo de SIG. Aplicación en una microcuenca de los Andes Venezolanos. Revista Forestal Venezolana. Trujillo – Venezuela. 7pp.

- Brooks, K.N., Ffolliott, P.F., Gregerse, H.M., DeBano, L.F. 1997. Hydrology and the Management of Watersheds, Iowa State University Press/Ames, United States of America.
- Chuvieco, E 1990. Fundamentos de teledetección espacial. 2 ed. Madrid, ES.RIALP, 450 p.
- Edeso, J., Marauri, P., Merino, A., González, M. 1997. Determinación de la tasa de erosión hídrica en función del manejo forestal: la cuenca del río Santa Lucía. Larrualde, 20. Pág. 67 – 104.
- FAO y PNUMA. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, IT. 86 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia) (1994). Erosión de suelos en América Latina. Roma, Italia.
- Fernández, IA; Herrero, E. 2001. El satélite Landsat. Valladolid, ES.s.e., 37p.
- Foster, g. R. y Meyer L. D. 1972. A closed-form soil erosion equation for upland areas. En Shen H. W. (ed). Sedimentation. Dept. Civil Engng. Colorado state Univ., Fort Collins CO. 138P.
- Foster, G.R. y Meyer L.D. 1975. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. En Present and prospective Technology for predicting sediment yields and sources. ARS Publication ARS-S-40 US: 207 p.
- Foster, G.R. 1987. User requirements. USDA Water Erosion Prediction Project. Draft 6.3. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. West Lafayette, Indiana.

- Foster y Dabney, S. 1995, Agricultural tillage systems: water erosion and sedimentation. Farming for a Better Environment Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IA 234p.
- Foster, G.R. y Lane, L.J. 1981. Simulation of erosion and sediment yield from field-sized areas. En Lal y Russell (eds.) Tropical Agricultural Hydrology. Chichester, Wiley: 375-394p.
- Foster, G.R. Lane, L.J. Nowlin, J.D. Laflen, J.M. y Young, R.A. 1981. Estimation erosion and sediment yield on field-sized areas. 1981 Transaction of the ASAE: (1253-1262)
- Foster, G.R. 1982. Modelling de erosion process. (Capítulo 8) en Hydrologic Modelling of Small Watersheds. Edit. C.T. Haan, H.P. Johnson, and D.L. Brakensiek. St. Joseph, Michigan: ASAE
- Foster, G.R. Young, R.A. y. Neibling W.H 1985. Sediment composition for nonpoint source pollution analyses. Transaction of the ASAE 139 p.
- Foster, G.R. 1987. User requirements en USDA Water Erosion Prediction Project (WEPP) US.
- Fournier. F. 1960. Climatet erosion: la relation entre *l'erosion* du soil par *l'eau* et precipitations atmospheriques. Paris. Presses Universitaires de France.
- García, J. 2006. La erosión: Aspectos conceptuales y modelos. *In* Hidrología de superficie y conservación de suelos. Material de clase 2007. ES. 146 p.
- García, J., 2005. Modelos paramétricos. Modelos USLE. Modelos RUSLE. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid – España. 51 pp.
- Greenland, DJ; Lal, R. 1975. Soil conservation and management in the humid tropies. New York, US. Bresboni, 283 p.

- Guanca, AV. 2010. Determinación de la erosión hídrica de los suelos de la cuenca del Río Pilcomayo – Salta, AR. Universidad Nacional de Salta, 158 p.
- Hellin, J. 2004. De erosión de suelos a suelos de calidad, Revista Agroecológica LEISA, N.º 19(4): 70 – 71.
- Hill, J; Hostert, P; Tsiourlis, G; Kasapidis, P; Udelhoven, TH; Diemer, C. 1998. Monitoring 20 years of increased grazing impact on the greek island of crete with earth observation satellites. Journal of Arid Environments. N.º 39: 165 – 178.
- Hudson, N. 1997. Medición sobre el terreno de la erosividad del suelo y la escorrentía. Boletín de suelos del FAO N°68. Roma – Italia. 25 pp.
- Hudson, N. 2006. Conservación del suelo. Editorial Reverté S.A. Reimpresión. Barcelona – España. 290 pp.
- Instituto Nicaragüense De Estudios Territoriales (INETER), Agencia Suiza Para El Desarrollo Y La Cooperación. 2005. Erosión Hídrica: mapa de amenazas. Managua – Nicaragua. 52 pp.
- Iturrate, E. 1998. Curso básico de teledetección con ENVI. (En línea). Consultado 19 nov. 2014. Disponible en <http://www.innovanet.com.ar/gis/TELEDETE/TELEDETE/pant 1.htm>.
- Kappelle, M. 2009. Erosión de Suelos. s.l. Fundación global democracia y desarrollo, 5 p.
- Kirby, M.J. y MORGAN, R.P.C. 1984. Erosión de suelos. Editorial Limusa S.A. México D.F – México. 367 pp.

- Laura, L. 2010. Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la Cuenca del Rio Juramento – Salta. Tesis Ing. Salta, AR. Universidad Nacional de Salta, 103 p.
- López Bellido. L. 1991. Cultivos Herbáceos. Cereales. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, ES.sp
- López, T; Aidé, M; Sactena, N. 1998. The effect of land use on soil erosion in the uadiana wetershed in Puerto Rico. In: Caribbean Journal of Science. PR. 307 p.
- Montesinos, S. 1990. Teledetección: Su utilización en la cuantificación y seguimiento de recursos hidráulicos aplicados al regadío. Madrid, ES.s.e., 108 p.
- Moreno, DA; Renner, I. 2007. Gestión integral de cuencas; la experiencia del proyecto regional cuencas andinas. I ed. Lima, PE. s.e., 234 p.
- Morgan, R.P.C., Morgan, D.D.V. y Finney. H.J. 1984. A predictive model for the assessment of son erosion risk. Journal of Agricultural Engineering Research. 245-253 p.
- Morgan. R.P.C. 1994. Soil erosion and conservation. Addison Wesley Longman Limited, London.
- Morgan, R.P.C. Quinton, J.N. y Rickson, R.J. 1994. Modelling methodology for soil erosion assessment and soil conservation design. the EUROSEM approach. Outlook in Agriculture US. 23p.
- Morgan, R. 1997. Erosión y conservación del suelo. Madrid, ES. 355p
- Morgan, RPC. 2005. Soil erosion and conservation. 3 ed. Blackwell Publishing Ltd, Maiden, US. 299 p.
- Núñez, J. (2001). Manejo y conservación de suelos. 1 ed. Editorial Universidad Estatal a Distancia, San José, CR 253 p.

- Núñez, V; García, P. 2000. Uso de herramientas de los sistemas de información geográfica (SIG) en la ordenación de cuencas hidrográficas. Salta, AR. s.n.t.
- Ocampo, R., Medina, C., Lovatón, G. 1996. Programa de conservación de suelos y forestación. Manual de conservación de suelos. Asociación Arariwa. Cuzco – Perú. 30 pp.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial, CH). 2006, El clima y la degradación de tierras. Génève, CH. Departamento del programa Mundial sobre el Clima, 32 p.
- Pérez, SJ. 2001. Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando Sistemas de información geográfica. Tesis Ing. Universidad Industrial de Santander, Bogotá, CO. 77 p.
- Poesen, J.W., Boardman. Wilcox, J B. y Valentin, C 1996, Water erosion monitoring and experimentation for global change studies. J. Soil Water Conserv. 386-390 p.
- Ramírez, L. 2010. Estimación de la pérdida de suelos por erosión hídrica en la cuenca del río Juramento-Salta. Universidad Nacional de Salta. Salta – Argentina. 104 pp.
- Ramírez, F., Hincapié, E., Sadeguián, S., Pérez, U. 2007. Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del Departamento de Caldas. Caldas – Colombia. 14pp.
- Ramos, CL. 2001. Modelamiento ambiental para el análisis de susceptibilidad erosiva en la cuenca media y alta del río Cañete y determinación del mapa de erosión. Lima, PE. 26 p.
- Ramos, C. 2009. Modelamiento ambiental para análisis de susceptibilidad erosiva en la cuenca del Chancay Lambayeque y determinación del mapa de erosión. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lambayeque – Perú. 40 pp.

- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies. G.A. y Porter, J.P. (1991), RUSLE, Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation US*. 46 p.
- Rodríguez, OE. 2004. Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales. Bogotá, CO. s.n.t.
- Rodríguez, F. 1995. El recurso del suelo en la amazonia peruana, diagnóstico para su investigación. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. Iquitos – Perú. 60 pp.
- Rodríguez, M., Florentino, A., Gallardo, J., García, R. 2004. Sistemas de Información geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en Badajoz-España aplicando la metodología USLE. *Agronomía Tropical* v. 54 n. 4. Maracay.
- Romero, FS. 2006. La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental, *Revista Científica de la Sociedad Española de Acuicultura*. N.º 24: 13 – 41.
- Roose, C.W., Williams. JR., Sander, G.C. y Barry. DA. 1983. A mathematical model of erosion and deposition process. I. Theory for a plane element. *Soil Science Society of America Journal US* 991-995 p.
- Skidmore, A. 2002. *Environmental modeling with GIS and Remote Sensing*. New York, US. British Library Catalogzllng in Publication Llatu, 259 p.
- Sobrino, JA; Raissouni, N; Kerr, Y; Oliosio, A; Lopez, MJ; Belaid, A; El Kharraz, MH; Cuenca, J; Dempere, L. 2000. *Teledetección*. Valencia, ES. Editorial Universidad de Valencia, 467 p.
- Suarez, J. 2001. Control de erosión en zonas tropicales. División Editorial Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, CO. 545 p.

- Tejerina, FG. 2010. Determinación de la Erosión Hídrica Potencial de los Suelos de la Alta Cuenca del Río Bermejo (Salta) Implementado en formato SIG. Tesis Ing. Salta, AR. Universidad Nacional de Salta, 145 p.
- Torres, E; Cortes, J; Mejía, E; Exebio, A; Santos, AL; Delgadillo, ME. 2003. Evaluación de la degradación de los suelos en la cuenca el Josefino, Jesús María, Jalisco. Revista TERRA Latinoamericana. N°. 1: 117-126 p.
- Vásquez, A. 2000. Manejo de cuencas alto andinas. Tomo 1. Escuela superior de administración de aguas “Charles Sutton”, Lima, PE. 516 p.
- Vega, L. 2008. Evaluación de la erosión hídrica superficial por parcelas experimentales en suelos desnudos de la región de Coquimbo. Tesis. Chile. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales, Escuela de Ingeniería Forestal. Talca, CL. 138 p.
- Vega, M. B.; Febles, J. M. 2005. Evaluation of the rainfall erosion in cattle regions from the central part of Havana province. Cuban Journal of Agricultural Science. US. s.p.
- Velásquez, S. 2008. Erosión de suelos utilizando la EUPSR (RUSLE). Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Cantón de Coronado – Costa Rica, 54 pp.
- Wischmeier. W.H; Johnson. CB., y Cross. B.V. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. Journal of Soil and Water Conservation. N.º 26: 189 – 193.
- Wischmeier. W.H; Smith, DD. 1978. Predicting rainfall erosion losses. USDA Agricultural Research Service Handbook, 537.

CAPITULO VIII

ANEXOS

Anexo 1: Fotografías de la salida al campo

Anexo 2: Precipitación total mensual – promedio multimensual (1980 – 2014), estaciones empleadas en el presente estudio.

Anexo 3: Cálculos realizados para la obtención de los datos de erodabilidad del suelo (factor K).

Anexo 4: Bandas originales de la escena 002 – 071 (Fecha: 03/08/2014)

Anexo 5: Modelos de elevación digital: 22 – 16 y 23 – 16.

Anexo 6: Bandas originales de la escena 002 – 072 (Fecha: 03/08/2014)

Anexo 1: Fotografías de la salida a campo





Anexo 2: Precipitación total mensual – Promedio multimensual (1980 - 2014)

Estaciones empleadas en el presente estudio.

N°	ESTACIÓN	MESES												Total Anual
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
1	Acora	189.3	138.2	137.0	49.0	11.2	8.2	4.9	12.7	23.4	50.0	52.9	93.8	770.7
2	Capazo	155.6	132.2	96.2	24.1	2.1	5.5	2.8	3.2	2.3	11.1	26.7	84.6	546.4
3	Ichuña	141.6	122.1	80.1	32.3	3.7	3.5	3.5	5.7	7.4	16.2	33.3	74.5	523.9
4	Ilave	183.1	138.4	125.8	50.9	9.4	7.2	5.6	13.9	21.9	40.7	56.0	86.6	739.4
5	Juli	202.7	172.5	154.2	57.5	12.0	6.9	5.7	15.8	23.7	41.9	57.0	111.0	860.9
6	Laraqueri	180.1	156.7	117.5	50.0	7.9	6.1	3.4	11.4	17.1	35.2	58.1	103.1	746.7
7	Mazocruz	134.5	119.1	87.8	25.9	5.0	2.8	3.1	7.7	6.5	17.9	29.6	70.5	510.4
8	Pampa Umalzo	87.7	83.5	68.7	18.6	2.1	1.1	1.9	4.6	4.6	4.6	12.3	39.6	329.3
9	Pizacoma	165.8	133.6	100.7	29.6	4.2	5.0	4.5	9.0	8.0	17.9	32.0	94.7	604.9
10	Yunguyo	182.6	137.5	119.0	45.3	14.3	11.0	7.7	17.5	26.5	47.6	58.5	101.4	768.8

Anexo 3: Cálculos realizados para la obtención de los datos de erodabilidad del suelo (factor K).

SUELO	Calacollo - Vizcachas							
Fracción	Rango de tamaños (mm)	Fi(%)	Mi(mm)	ln(Mi)	Fi.ln(Mi)	Dg (mm)	log (Dg)	Factor - K ((t/ha*hr/ha*1/(MJ*mm)))
		[%]	[mm]					
Arcilla	0 - 0.002	13	0.001	-6.91	-89.80			
Limo	0.002 - 0.05	35	0.026	-3.65	-127.74			
Arena	0.05 - 2	52	0.5	-0.69	-36.04			
				Σ	-253.58	0.0791963	-1.101295	0.33152

SUELO	Chincheros - Chejemoco							
Fracción	Rango de tamaños (mm)	Fi(%)	Mi(mm)	ln(Mi)	Fi.ln(Mi)	Dg (mm)	log (Dg)	Factor - K ((t/ha*hr/ha*1/(MJ*mm)))
		[%]	[mm]					
Arcilla	0 - 0.002	10	0.001	-6.91	-69.08			
Limo	0.002 - 0.05	41	0.026	-3.65	-149.64			
Arena	0.05 - 2	49	0.5	-0.69	-33.96			
				Σ	-252.68	0.0799161	-1.097366	0.33022

SUELO	Calacollo – Huaitire							
Fracción	Rango de tamaños (mm)	Fi(%)	Mi(mm)	ln(Mi)	Fi.ln(Mi)	Dg (mm)	log (Dg)	Factor - K ((t/ha*hr/ha*1/(MJ*mm)))
		[%]	[mm]					
Arcilla	0 - 0.002	14.5	0.001	-6.91	-100.16			
Limo	0.002 - 0.05	44.3	0.026	-3.65	-161.68			
Arena	0.05 - 2	41.2	0.5	-0.69	-28.56			
				Σ	-290.40	0.0548035	-1.261191	0.38018

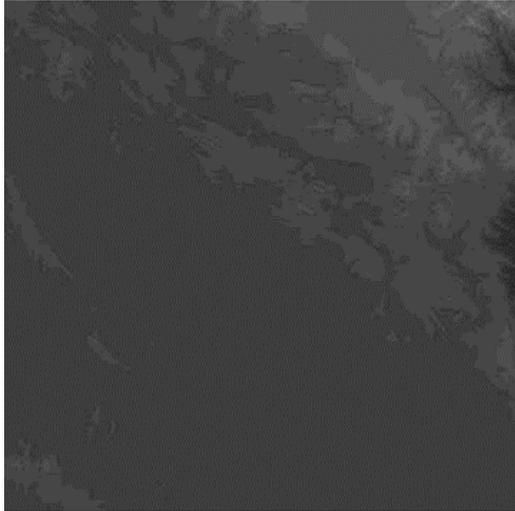
SUELO	Calacollo – Suches							
Fracción	Rango de tamaños (mm)	Fi(%)	Mi(mm)	ln(Mi)	Fi.ln(Mi)	Dg (mm)	log (Dg)	Factor - K ((t/ha*hr/ha*1/(MJ*mm)))
		[%]	[mm]					
Arcilla	0 - 0.002	12.7	0.001	-6.91	-87.73			
Limo	0.002 - 0.05	38.3	0.026	-3.65	-139.78			
Arena	0.05 - 2	49	0.5	-0.69	-33.96			
				Σ	-261.47	0.0731863	-1.13557	0.34265

SUELO	Calacollo - Afloramiento Litico							
Fracción	Rango de tamaños (mm)	Fi(%)	Mi(mm)	ln(Mi)	Fi.ln(Mi)	Dg (mm)	log (Dg)	Factor - K ((t/ha*hr/ha*1/(MJ*mm)))
		[%]	[mm]					
Arcilla	0 - 0.002	16	0.001	-6.91	-110.52			
Limo	0.002 - 0.05	50	0.026	-3.65	-182.48			
Arena	0.05 - 2	34	0.5	-0.69	-23.57			
				Σ	-316.57	0.0421829	-1.374864	0.40784

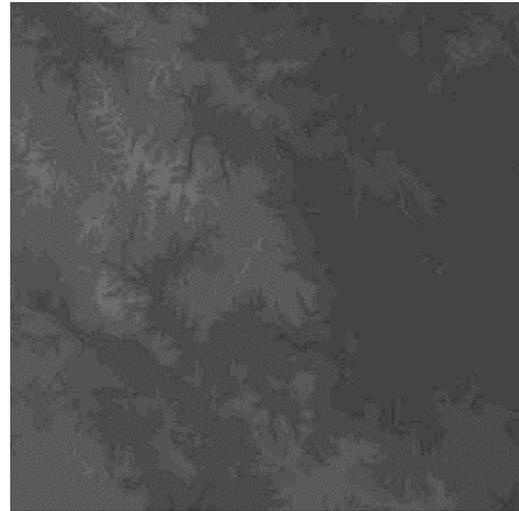
SUELO	Calacollo – Cachiña							
Fracción	Rango de tamaños (mm)	Fi(%)	Mi(mm)	ln(Mi)	Fi.ln(Mi)	Dg (mm)	log (Dg)	Factor - K ((t/ha*hr/ha*1/(MJ*mm)))
		[%]	[mm]					
Arcilla	0 - 0.002	24	0.001	-6.91	-165.79			
Limo	0.002 - 0.05	29	0.026	-3.65	-105.84			
Arena	0.05 - 2	47	0.5	-0.69	-32.58			
				Σ	-304.20	0.0477373	-1.321142	0.39566

Anexo 4: Modelos de elevación digital ASTER GDEM

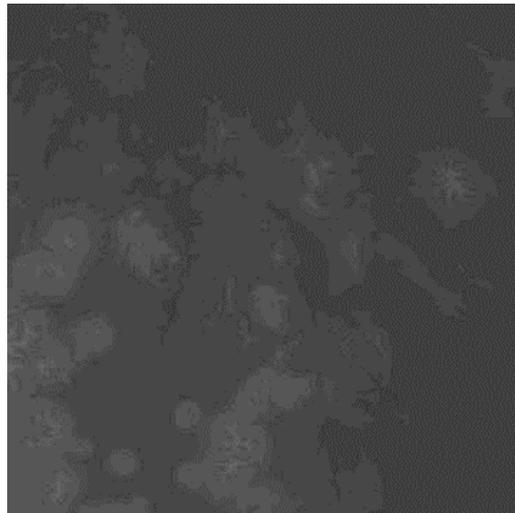
S16 – 070



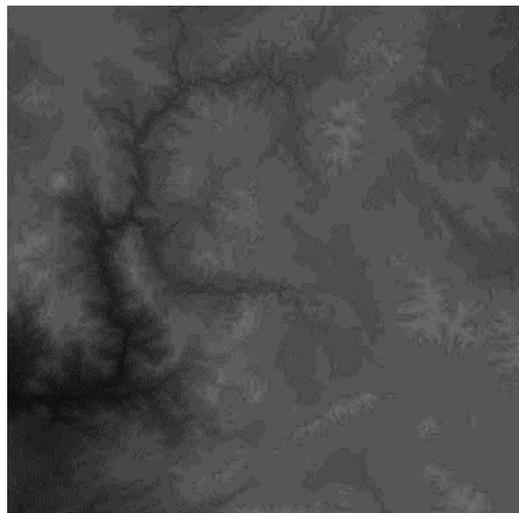
S16 – 071



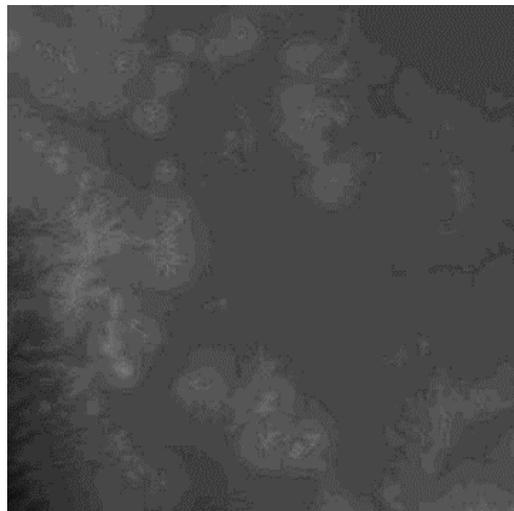
S17 – 070



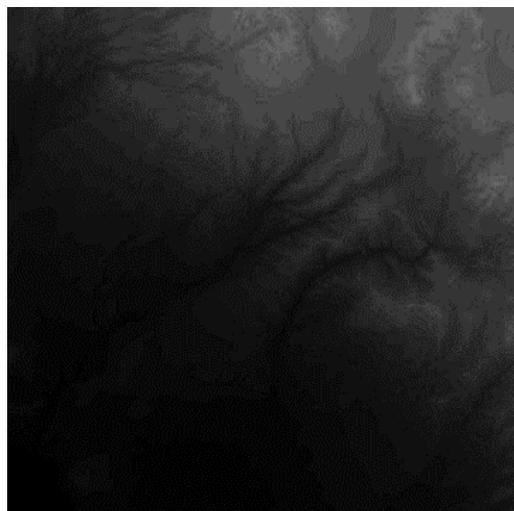
S17 – 071



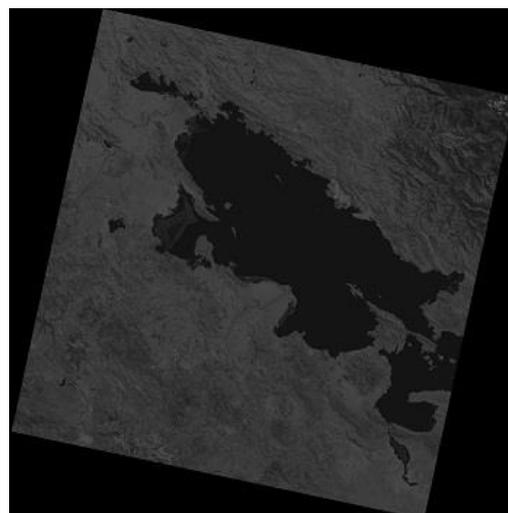
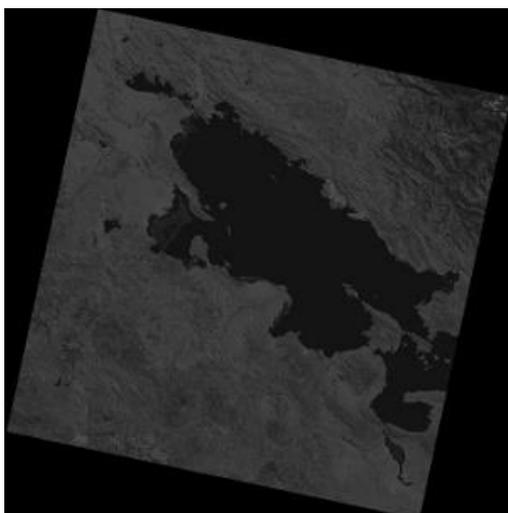
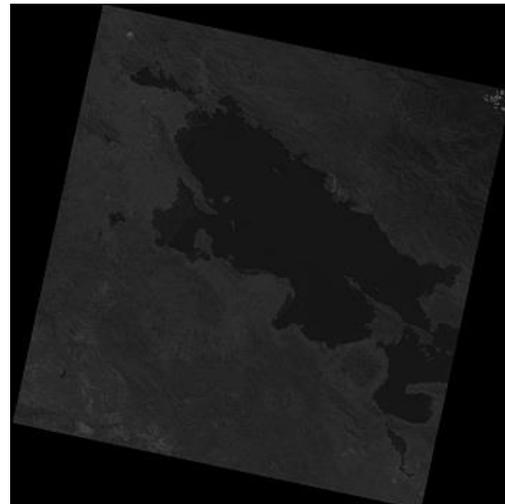
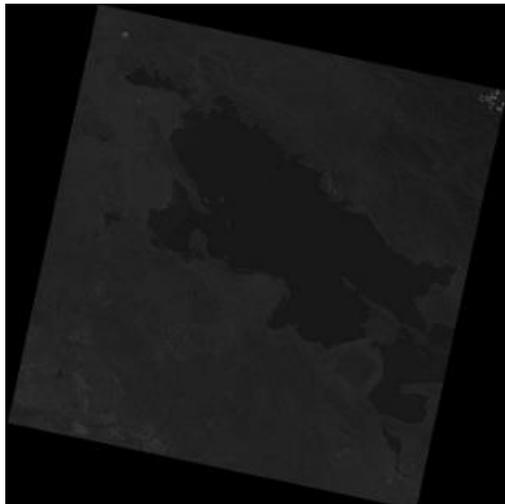
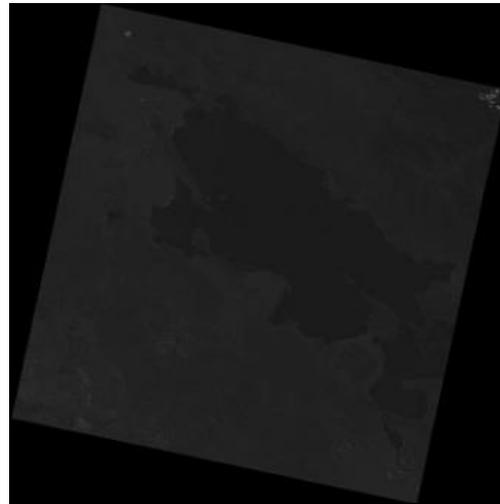
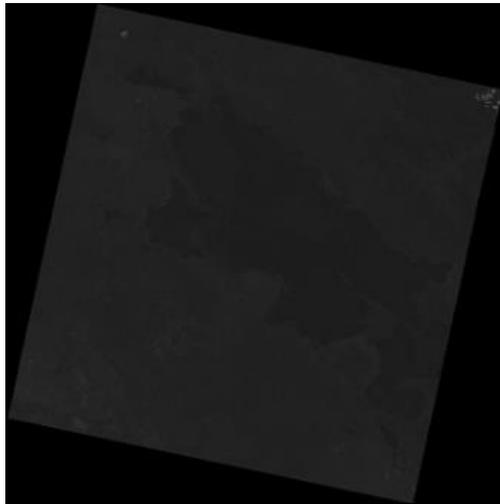
S16 – 070



S16 – 071



Anexo 5: Bandas originales de la 002 – 071



Anexo 6: Bandas originales de la 002 – 071

