

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRIA EN GESTIÓN INTEGRAL DE
CUENCAS HIDROGRÁFICAS



**“DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS EN LA CUENCA
APORTANTE DEL EMBALSE AGUADA BLANCA-AREQUIPA,
APLICANDO USLE Y TECNICAS GEOESPACIALES”**

Presentada por:

JAVIER EDUARDO ZÚÑIGA HUACO

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE EN
GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

Lima-Perú

2017

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRIA EN GESTIÓN INTEGRAL DE
CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**“DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELOS EN LA CUENCA
APORTANTE DEL EMBALSE AGUADA BLANCA-AREQUIPA,
APLICANDO USLE Y TECNICAS GEOESPACIALES”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

JAVIER EDUARDO ZÚÑIGA HUACO

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg.Sc David Ascencios Templo
PRESIDENTE

Mg.Sc. Cayo Ramos Taipe
PATROCINADOR

Mg.Sc. Sebastián Santayana Vela
MIEMBRO

Mg.Sc. Rocío del Pilar Pastor Jáuregui
MIEMBRO

DEDICATORIA

A la memoria de mi madre Reina, padre Luis y hermano Jesús, por sus consejos sabios, buenos principios y apoyo en los momentos difíciles desde mis estudios de pregrado, que sin ellos no hubiera sido posible culminar mis estudios de maestría.

“Uno no muere cuando pierde la vida, uno muere cuando lo olvidan”

AGRADECIMIENTOS

A los funcionarios y técnicos de la Secretaria Técnica del Consejo de Recursos Hídricos Quilca – Chili, en especial al Ing. Jaime Gutiérrez, Ing. Johnny Castro Patiño, Ing. Ronal Fernández Bravo, Ing. Roland Valencia Manchego, Ing. Gladys Celci y Cesar Pino por el apoyo brindado en el trabajo de campo e información facilitada de la cuenca Quilca - Chili.

A los colegas Ing. Lusden Coaguila y Mg.Sc. Valdemar Medina, por el apoyo brindado y facilidades dadas en el Laboratorio de la UNSA para los correspondientes análisis de las muestras de suelo de la vigente tesis de maestría.

A los miembros del jurado del presente trabajo de investigación en especial al Mg.Sc. Cayo Ramos Taipe y Mg.Sc Rocío Pastor Jáuregui, por la revisión y aportes para mejorar progresivamente el plan y desarrollo de la tesis.

A los compañeros de trabajo y amigos en especial al Ing. Carlos Giraldo, Ing. Javier Segovia, Ing. Julio Alegría, Ing. Alfredo Llaja, Ing. José Carlos Angulo e Ing. Carlos Damiani.

A mi familia por su comprensión, paciencia y apoyo, en especial a mi madre Reina Flor Huaco de Zúñiga, hermanos, tíos (as) (Daniel, Hilda, Guillermo, Guma) y primos (Percy, Jesús, Guillermo, Adriel, Miguel, Eloy); para seguir por la senda de los estudios y apoyo para poder culminar mis estudios de posgrado.

INDICE GENERAL

	Pág.
INDICE GENERAL	i
INDICE DE CUADROS	iv
INDICE DE FIGURAS	v
INDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	x
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 ANTECEDENTES	4
2.2 PERDIDA DE SUELO	7
2.3 ECUACIÓN UNIVERSAL DE LA PÉRDIDA DE SUELOS (USLE)	11
2.3.1 Factor lluvia o índice de erosividad pluvial (R)	12
2.3.2 Factor topográfico (LS)	13
2.3.3 Factor de erodabilidad del suelo (K)	14
2.3.4 Factor cobertura vegetal (C)	16
2.3.5 Factor de prácticas de conservación (P)	19
2.4 NIVELES DE EROSIÓN DE SUELOS SEGÚN USLE	20
2.5 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA-SIG	21
2.6 SEDIMENTACIÓN Y BATIMETRIA	24

III.	MATERIALES Y METODOS	29
3.1	UBICACIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO	29
3.2	MATERIALES Y EQUIPOS	31
3.3	METODOS	33
3.3.1	Determinación de pérdidas de suelo	33
a.	Factor lluvia o índice de erosividad pluvial (R)	37
b.	Factor geomorfológico o topográfico (LS)	39
c.	Factor de erodabilidad del suelo (K)	39
d.	Factor cobertura vegetal (C)	44
e.	Factor de prácticas de conservación (P)	46
3.3.2	Sedimentación en el embalse aguada blanca	47
3.3.3	Superposición de mapas del modelamiento	48
a.	Mapa de isoyetas	48
b.	Mapa de pendientes	51
c.	Mapa de erosionabilidad	54
d.	Mapa de cobertura vegetal	57
e.	Superposición de mapas	62
3.3.4	Modelo NDVI 2014-MC78 imagen satelital Landsat TM 10	65
3.3.5	Modelo NDVI 2001-MC80 imagen satelital Landsat TM 7	67
3.3.6	Proceso de erosión y sedimentación del embalse Aguada Blanca	69
a.	Erosión en la cuenca aportante Aguada Blanca del 2002-2006	70
b.	Erosión en la cuenca aportante Aguada Blanca del 2006-2010	71
c.	Erosión en la cuenca aportante Aguada Blanca del 2010-2015	72
d.	Erosión en cuenca aportante con actividades de conservación - Prospectivo	73
3.3.7	Calibración de los coeficientes del modelo geoespacial	76
a.	Factor de lluvia (R)	77
b.	Factor topográfico (LS)	78
c.	Factor de erodabilidad del suelo (K)	79
d.	Factor de cobertura vegetal (C)	81

IV.	RESULTADOS Y DISCUSION	89
4.1	COEFICIENTE DE LOS FACTORES – USLE	89
4.1.1	Factor de lluvia (R)	89
4.1.2	Factor topográfico (LS)	89
4.1.3	Factor de erodabilidad del suelo (K)	90
4.1.4	Factor cobertura vegetal (C)	91
4.2	NIVELES DE EROSIÓN EN MODELOS	91
4.2.1	Coefficientes USLE calibrados en modelos	91
4.2.2	Índice de precipitación estandarizado	97
4.2.3	Erosión en modelo MC78	98
4.2.4	Erosión en modelo MC80	100
4.2.5	Erosión de la cuenca aportante Aguada Blanca	101
a.	Erosión en cuenca aportante Aguada Blanca del 2002-2006	103
b.	Erosión en cuenca aportante Aguada Blanca del 2006-2010	103
c.	Erosión en cuenca aportante Aguada Blanca del 2010-2015	105
d.	Erosión en cuenca aportante Aguada Blanca – escenario prospectivo	107
4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO - MC78 y MC80	109
4.5	ANÁLISIS DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN DEL EMBALSE	
	AGUADA BLANCA	113
4.5.1	Análisis de erosión y sedimentación en la cuenca aportante del 2002-2006	114
4.5.2	Análisis de erosión y sedimentación en la cuenca aportante del 2006-2010	115
4.5.3	Análisis de erosión y sedimentación en la cuenca aportante del 2010-2015	116
4.5.4	Comparación de sedimentación en la cuenca aportante y en embalse A. Blanca	117
4.5.9	Escenarios de erosión en la cuenca aportante Aguada Blanca	119
V.	CONCLUSIONES	125
VI.	RECOMENDACIONES	127
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	129

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Estimaciones de la erosión bruta y la que llegaría a la laguna	6
Cuadro 2: Superficie afectada por erosión, según niveles de erosión	9
Cuadro 3: Superficie erosionada, intensidad y agente del proceso erosivo	10
Cuadro 4: Coeficientes del factor LS	14
Cuadro 5: Infiltración del agua con diferentes coberturas vegetales	16
Cuadro 6: Resultados del valor C mediante diferentes metodologías	17
Cuadro 7: Índices del factor de cobertura vegetal C	18
Cuadro 8: Grados de erosión según su intensidad	20
Cuadro 9: Niveles de erosión	21
Cuadro 10: Precipitación promedio anual de estaciones base y factor R	38
Cuadro 11: Índice del NDVI y su relación con cubierta vegetal	45
Cuadro 12: Comparación de volúmenes en el embalse Aguada Blanca	47
Cuadro 13: Comparación de bandas de imágenes de satélite Landsat 7 y 8	58
Cuadro 14: Calibración del coeficiente 0.52 en base erosión medida en campo	80
Cuadro 15: Calibración del coeficiente 0.39 en base erosión medida en campo	81
Cuadro 16: Calibración del índice 0.46 en base medición en campo	82
Cuadro 17: Calibración del coeficiente $C = 0.51$	82
Cuadro 18: Calibración del coeficiente $C = 0.46$	84
Cuadro 19: Calibración del coeficiente $C = 0.27$	85
Cuadro 20: Factor R según Isoyetas determinadas	89
Cuadro 21: Factor LS según DEM	90
Cuadro 22: Factor K según análisis de suelo	90
Cuadro 23: Factor C según cobertura vegetal	91
Cuadro 24: Resultados de los índices R, LS, K y C en el ámbito de estudio	92

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Elementos básicos del SIG	22
Figura 2: Ámbito de estudio en la región de Arequipa	29
Figura 3: Ubicación de la cuenca aportante Aguada Blanca	30
Figura 4: Cuenca Aguada Blanca georeferenciada y embalses	31
Figura 5: Regla de medición en campo y coordenadas UTM con GPS	34
Figura 6: Coordenadas UTM de regla milimetrada y medición de erosión, en tormenta	34
Figura 7: Herbazal abierto, sobrepastoreada, R18 (NDVI: 0048 - 0.077)	35
Figura 8: Pajonal andino, predominancia de tola, R45 (NDVI: 0.116 - 0.18)	35
Figura 9: Calicata para la extracción de la muestra de suelo	36
Figura 10: Densidad aparente, método cilindro en zona evaluada, R35	36
Figura 11: Medición de limo y arcilla por el método del hidrómetro de Bouyucos	37
Figura 12: Factor erodabilidad_R27	42
Figura 13: Factor erodabilidad_R32	43
Figura 14: Evaluación en campo de coberturas vegetales	46
Figura 15: Isoyetas con coordenadas UTM en los 159 puntos	49
Figura 16: Isoyetas, haciendo uso herramienta <i>raster interpolation/Spline</i>	50
Figura 17: Isoyetas agrupando en estratos, proceso del <i>Dissolve</i>	51
Figura 18: Pendientes en formato <i>raster</i> , proceso <i>Slope</i>	52
Figura 19: Pendiente reclasificado en 09 rangos, proceso <i>Reclassify</i>	53
Figura 20: Pendientes en formato <i>shape file</i> , proceso <i>Dissolve</i>	53
Figura 21: Delimitación del polígono R13, con mapa geológico y geomorfológico	55
Figura 22: Delimitación del polígono R32 con mapa geológico y geomorfológico	56
Figura 23: Erosionabilidad, con los diferentes polígonos y coeficientes de F-K	56
Figura 24: Combinación de las bandas multiespectrales 654 landsat TM 10	58
Figura 25: Cuenca Aguada Blanca formato raster, proceso <i>create subset</i>	59
Figura 26: Índices del NDVI de imagen satelital landsat TM10, 2014	60
Figura 27: Coberturas vegetales, suelo, agua en formato raster de la cuenca	60

Figura 28: Cobertura con NDVI reclasificadas en 07 clases, proceso <i>reclassify</i>	61
Figura 29: Coberturas vegetal, en base NDVI 2014 y tabla alfanumérica	62
Figura 30: Superposición del mapa de isoyetas y pendientes del modelo-MC78	63
Figura 31: Superposición del mapa erosionabilidad y coberturas, modelo MC78	64
Figura 32: Erosión USLE del MC78, proceso producto del factor: R.LS.K.C	64
Figura 33: Mapa de isoyetas con los coeficientes del factor R	66
Figura 34: Proceso del mapa final de erosión en 06 tipologías mediante <i>Dissolve</i>	67
Figura 35: Mapa de cobertura vegetal según clasificación natural del NDVI 2001	68
Figura 36: Coeficientes del factor C según los índices del NDVI 2001	68
Figura 37: Niveles de erosión y áreas correspondientes del MC80	69
Figura 38: Área de influencia de sedimentación de Aguada Blanca, 2002-2006	70
Figura 39: Proceso del recorte de los diferentes atributos del modelo_MC80	71
Figura 40: Proceso del recorte de los diferentes atributos del modelo_MC78	71
Figura 41: Área de influencia de sedimentación de Aguada Blanca en fase III	72
Figura 42: Mapa final de fase III con sus reportes principales de erosión	73
Figura 43: Reclasificación manual de los índices del NDVI 2014	74
Figura 44: Mapa de coberturas con su tabla de atributos, NDVI y factor C	74
Figura 45: Recorte del area de influencia de sedimentación del embalse	75
Figura 46: Mapa consolidado de conservación, niveles de erosión	76
Figura 47: Correlación entre el factor R y la precipitación	78
Figura 48: Factor “LS” según la pendiente del terreno	79
Figura 49: Cubierta inapreciable	83
Figura 50: Regresión del coeficiente cubierta inapreciable $C = 0.51$	83
Figura 51: Regresión del coeficiente de herbazal abierto $C = 0.46$	83
Figura 52: Herbazal abierto- Canlly	84
Figura 53: Pajonal andino –Ichu	85
Figura 54: Regresión del coeficiente pajonal andino, predomina Ichu, $C = 0.27$	86
Figura 55: Pajonal Andino con preponderancia de <i>Parastrephia lepidophylla</i> (Tola)	86
Figura 56: Regresión del coeficiente pajonal andino – tola, $C = 0.22$	86
Figura 57: Bofedal	87
Figura 58: Regresión del coeficiente Turbera, $C = 0.01$	87

Figura 59: Evaluación N°1, con factores K y C en mapa de Intersec K_C_MC78	93
Figura 60: Calibración N°1, suelos medianamente estable y herbazal abierto	93
Figura 61: Evaluación N°13, con resultados del Factor K y C	94
Figura 62: Calibración N° 13, en zona de turbera	94
Figura 63: Evaluación N°32, con resultados del Factor K y C	95
Figura 64: Calibración N°32, suelo volcánico erosivo con textura franco limoso	95
Figura 65: Evaluación N°44, con resultados del Factor K y C	96
Figura 66: Calibración N°44, pajonal andino con primacía de <i>Calamagrostis – Stipa</i>	96
Figura 67: Mapa de cobertura vegetal con su tabla de atributos	97
Figura 68: Nivel de erosión del MC78 - (ha)	98
Figura 69: Resultados de areas de erosión mayores de 200 T/ha/año	99
Figura 70: Nivel de erosión del MC80 - (ha)	100
Figura 71: Erosión crítica mayor de 200 T/ha/año_MC80	101
Figura 72: Niveles de erosión en fase I (ha)	102
Figura 73: Niveles de erosión en fase II (ha)	102
Figura 74: Niveles de erosión en fase III (ha)	103
Figura 75: Resultados de niveles de erosión en la fase I	104
Figura 76: Niveles de erosión a la llegada del embalse Aguada Blanca	104
Figura 77: Resultados del valor máximo, medio y erosión total en fase III	105
Figura 78: Resultados de las áreas de coberturas vegetales en fase III	106
Figura 79: Niveles de erosión a llegada del embalse en fase III	106
Figura 80: Áreas de coberturas vegetales de escenario M78-C1	107
Figura 81: Resultados de niveles de erosión con sus correspondientes áreas	108
Figura 82: Niveles de erosión en M78-C1 (por ciento)	108
Figura 83: Nivel de erosión de modelos MC78 y MC80 - (ha)	110
Figura 84: Erosión crítica en campo que presentan grandes cárcavas	111
Figura 85: Erosión muy alta, visualizando claramente la degradación de suelos	111
Figura 86: Erosión media en suelos estables con supremacía de ichu	112
Figura 87: Erosión baja en zonas de bofedales con gran densidad de coberturas	113
Figura 88: Erosión en cada etapa (T/año)	113
Figura 89: Tasa erosión media (T/ha/año)	114

Figura 90: Niveles de erosión en fase I (ha)	114
Figura 91: Niveles de erosión en fase II (ha)	115
Figura 92: Niveles de erosión en fase III (ha)	116
Figura 93: Volumen ($\text{Hm}^3/\text{N}^\circ$ años)	117
Figura 94: Volumen promedio anual ($\text{Hm}^3/\text{año}$)	119
Figura 95: Comparación de la erosión en fase I y III	120
Figura 96: Comparación de coberturas MC78 y M78-C1	121
Figura 97: Niveles de erosión y actividades de conservación (ha)	122
Figura 98: Comparación del modelo - MC78 y M78-C1	123

INDICE DE ANEXOS

- Anexo 1: Data de estaciones base y correlaciones del factor R
- Anexo 2: Análisis de suelo y determinación del factor K
- Anexo 3: Fotos de evaluación de cubierta vegetal y suelos en campo
- Anexo 4: Batimetría del embalse Aguada Blanca
- Anexo 5: Información de precipitación generada en función a la altitud
- Anexo 6: Delimitación de polígonos del mapa de erosionabilidad
- Anexo 7: Procesos ampliados del modelo-MC80
- Anexo 8: Calibración ampliada de los coeficientes USLE del modelo-MC78
- Anexo 9: Resultados del modelo – MC78
- Anexo 10: Índice de Precipitación Estandarizada y PPN
- Anexo 11: Mapas de erosión georeferenciados del modelo-MC78
- Anexo 12: Mapas de erosión georeferenciados del modelo-MC80
- Anexo 13: Mapas de erosión georeferenciados en fase I, II y III
- Anexo 14: Mapas georeferenciados en escenario prospectivo-M78-C1.

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo determinar la pérdida de suelo, en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca aplicando el método USLE y técnicas geoespaciales; estableciendo los diferentes niveles de erosión bajo dos modelos, el primero denominado MC78, debidamente calibrado y basado en el método USLE y NDVI de imagen satelital 2014 y el segundo modelo denominado MC80 basado en USLE e imágenes Landsat del 2001. Con métodos afines se determinó el mapa del **modelo retrospectivo**, con la erosión de la cuenca aportante y su relación con la sedimentación del embalse bajo tres fases; el primero concerniente al mapa de erosión ocurridas entre el 2002 al 2006, el segundo alusivo a la erosión 2006 - 2010 y el tercero del 2010 – 2015; de manera similar se formuló el **modelo prospectivo**, con actividades de conservación. Los resultados muestran los coeficientes consistentes del factor de: lluvia R, erodabilidad K y cobertura vegetal C (calibrados con $r^2 > 80$ por ciento). El modelo MC80 expresó una tasa promedio anual de **128.96 T/ha/año**, mientras que el modelo MC78 una tasa promedio de **145.50 T/ha/año**; mostrando una cuenca erosiva con tendencia a la desertificación, que está por encima del patrón de erosión recomendada por ICONA (1991) de 12.5 T/ha/año y la FAO 11.2 T/ha/año. Los niveles de erosión fueron diferenciados, en cada una de las tres etapas del proceso de erosión de la cuenca aportante del embalse, la fase I alcanzó una tasa de erosión media de **125.15 T/ha/año**, la fase II **154.94 T/ha/año** y la fase III **162.73 T/ha/año**; revelando una tendencia creciente de 30 por ciento. En un escenario deseado, con el incremento de su cobertura vegetal (M78-C1), su tasa media de erosión disminuiría en un 28% (**116.74 T/ha/año**); reduciéndose la tasa media anual de sedimentación del embalse de 0.42 Hm³/año a 0.30 Hm³/año y prolongando su operación de **17 a 23 años** (con 75 por ciento del volumen útil).

Palabras claves:

Cobertura vegetal, ecuación universal de pérdida de suelos, erosión, índice de vegetación de diferencia normalizada, sedimentación, modelo de erosión calibrado.

SUMMARY

The present thesis aims to determine the soil loss in the basin of the Aguada Blanca reservoir, applying the USLE method and geospatial techniques. The different levels of erosion have been determined in two geospatial models. The first one named MC78 properly calibrated and based on the USLE and NDVI method of satellite image 2014 and the second model called MC80 based on USLE and Landsat images of 2001. With similar methods it was determined the map of the retrospective model of the erosion of the basin and its relation with the sedimentation of the reservoir under three phases; The first one concerning the map of erosion occurred between 2002 and 2006, the second referring to erosion 2006 - 2010 and the third one of 2010 - 2015; A prospective model with conservation activities was formulated. The results show the consistent value of coefficients of factor: rain "R", erodability "K" and vegetation cover "C" (calibrated with $r^2 > 80$ percent). The MC80 model expressed an average annual rate of 128.96 T / ha / year, while the MC78 model had an average rate of 145.50 T / ha / year; Showing an erosive basin with a trend towards desertification, which is above the erosion pattern recommended by ICONA (1991) of 12.5 T / ha / year and FAO 11.2 T / ha / year. Erosion levels were differentiated in each of the three stages of the erosion process of the reservoir basin, phase I reached an average erosion rate of 125.15 T / ha / year, phase II 154.94 T / ha / year And phase III 162.73 T / ha / year, revealing an upward trend of 30 percent. In a desired scenario with the increase of its vegetation cover (M78-C1), its average erosion rate would decrease by 28% (116.74 T / ha / year); Reducing the average annual sedimentation rate of the reservoir from 0.42 Hm³ / year to 0.30 Hm³ / year and extending its operation from 17 to 23 years (with 75 percent of the useful volume).

Keywords:

Plant cover, universal equation of soil loss, erosion, normalized difference vegetation index, sedimentation, calibrated erosion model.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN

La erosión es una de las causas principales de la desertificación que se viene intensificando en los últimos años en algunas cuencas del Perú, que afecta al ambiente y a una serie de actividades socioeconómicas, no estando ajena a tal realidad la cuenca del río Quilca-Chili; desconociéndose los niveles de erosión en la cuenca referida, designada unidad hidrográfica nivel tres según la metodología Pfafstetter, aprobada por la Autoridad Nacional del Agua.

El ámbito del presente trabajo de investigación se ubica en la parte alta de la cuenca del río Quilca-Chili en la región de Arequipa, donde existen problemas de erosión y sedimentación del embalse de Aguada Blanca; por eso se tiene como objetivo **determinar la pérdida de suelos en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca aplicando el método USLE y técnicas geoespaciales**, con el fin de proponer medidas de conservación que atenúen la erosión y sedimentación referida.

La colmatación del embalse Aguada Blanca disminuyó considerablemente la capacidad útil de almacenamiento; desconociendo las causas de la erosión y transporte de sedimento del área de influencia (cuenca aportante del embalse). Los problemas de sedimentación del embalse vienen desde años atrás; mostrándose evidente el año 2002 cuando se ejecutó la batimetría por EGASA, encontrándose un volumen útil de 31.087 Hm³ de un total de 43 Hm³ de capacidad de diseño del embalse.

Otro problema que también motivó la presente tesis fue la mala calidad de agua por los altos niveles de sedimento en suspensión en periodo de máximas avenidas, teniendo como implicancia la restricción del agua potable por horas para la población de la ciudad de Arequipa; asumiendo como hipótesis que la causa principal de ambos problemas referidos está en los altos niveles de erosión de suelos producidos aguas arriba de la ciudad (cuenca aportante de Aguada Blanca); sin embargo por aspectos metodológicos de evaluación y análisis del problema (relación causa - efecto), se ha priorizado investigar los niveles de

erosión de la cuenca aportante con el propósito e importancia de atenuar el problema de la sedimentación del embalse Aguada Blanca que resulta estratégico para mejorar el servicio en cantidad y calidad del agua para la ciudad de Arequipa.

No existen trabajos de investigación con la erosión de suelos y relacionados con la sedimentación de embalses en la cuenca señalada, pero existen estudios realizados en otros ámbitos en relación a los niveles de erosión como el trabajo de investigación de Ramos (2001) en la cuenca media y alta del río Cañete y el de Clérico y García (2001) para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay, los mismos y otros que son ampliados en el ítem de antecedentes.

Los niveles de erosión encontrados en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca son altos por encima del patrón de erosión (mayores 11.2 T/ha/año según FAO y 12.5 ICONA; por ausencia de cobertura vegetal, pendiente fuerte, sobrepastoreo y otros; siendo transportados una parte de los mismos al embalse, poniendo en serio riesgo su operación (más del 40 por ciento del volumen útil sedimentado) y limitando el tiempo de servicio al sistema hídrico para lo cual fue diseñada. Por otro lado, la presente tesis tiene como propósito alcanzar alternativas de conservación con el fin de bajar los niveles crecientes de sedimentación del embalse y contribuir en mitigar la desertificación de la cuenca.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Estimación de la pérdida de suelos en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca, aplicando la Ecuación Universal de Pérdida del Suelos (USLE) y técnicas geoespaciales.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estimar los coeficientes del factor de erosión pluvial (R) con los niveles de precipitación en los diferentes pisos altitudinales que se presenta aguas arriba del embalse de Aguada Blanca y que favorece al incremento de la erosión en el área de influencia.
- Estimar los coeficientes del factor topográfico que influyen en la erosión del suelo, dado por la inclinación de la pendiente (S) y longitud de la pendiente (L).

- Estimar los índices del factor de la erosionabilidad (K) del suelo con su resistencia al proceso de degradación en el ámbito del área de estudio (aguas arriba del embalse de Aguada Blanca).
- Establecer índices del factor de la cobertura vegetal (C) que influye en la pérdida de suelo, según las especies arbustivas y pasturas que se encuentran en el ámbito de estudio.
- Proponer medidas de conservación (P), como medida de atenuación de la pérdida de suelo en la cuenca en estudio.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

En el ámbito de estudio no se cuenta con trabajos de investigación relacionados a la erosión del suelo con la metodología propuesta; sin embargo se han realizado trabajos similares aplicando el método de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos de manera geoespacial con sistemas de información geográfica (SIG) en otros ámbitos a nivel nacional e internacional, los cuales se pasan a describir de manera resumida.

Ramos (2001), desarrolló el trabajo de investigación con el fin de estimar la tasa de erosión en la cuenca media y alta del río Cañete, tomando como soporte informático el ArcInfo y el ArcView. El modelo propuesto fue un modelo de tipo técnico-geoespacial basado en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) y la información secundaria sobre la distribución espacial de estas variables en la zona del proyecto. El 84.87 por ciento (unos 374,788.78 km²) tienen pérdidas importantes de suelo. En todos los casos, son zonas sometidas a explotación agropecuaria intensiva, a un sobrepastoreo intenso, estando ubicados en zonas muy frágiles, sumado a ello la deforestación de los árboles nativos. Suelen estar dominadas por pendientes fuertes y presentan litologías o recubrimientos favorables al desmantelamiento erosivo. El 54.24 por ciento de la cuenca equivalente a 231 843.050 Km² se encuentra en situaciones alarmantes (erosión crítica).

Montes et al. (2001) publicaron metodología para la estimación del riesgo de erosión hídrica en cuencas hidrográficas utilizando un sistema de información geográfica. El riesgo fue evaluado mediante el análisis multiplicativo de cuatro factores incluidos en la USLE. Los factores considerados involucran la potencialidad erosiva de la lluvia y el escurrimiento (factor R), la susceptibilidad del suelo a la erosión (factor K) y el efecto del grado (factor S) y la longitud de la pendiente (factor L). Los resultados obtenidos muestran total concordancia al coincidir las regiones ya erosionadas actualmente con aquellas encontradas con un riesgo muy alto de erosión. Los resultados sirvieron también para la planeación de un programa de manejo y conservación del recurso suelo de la cuenca.

Tazvitya (2001); los cambios que se prevén en las magnitudes y frecuencias de inundaciones y los problemas asociados con la erosión y la deposición de sedimentos. Estos problemas hidrológicos tienen impactos severos en el medio, principalmente el aumento de la carga de sólidos en cursos de agua, o la contaminación de fuentes no localizadas, incrementando las inversiones dirigidas a los proyectos de protección de inundaciones. Se estudian las ocupaciones de suelos, las características pluviales e hidrológicas, características topográficas y prácticas de conservación en las cuencas de la provincia de Ourense, como factores que regulan la erosión hídrica. El estudio identifica las subcuencas con más problemas potenciales de erosión para acometer obras de restauración hidrológica-forestal. Se relacionan los mapas elaborados con el uso de los sistemas de información geográfica, utilizando tanto imágenes de satélite como datos de campo de las propiedades de suelos que determinan la escorrentía y la susceptibilidad a la erosión, con la calidad de agua y la producción de sedimentos.

ICONA (1988a), presenta un modelo basado en la caracterización de cuencas mediante el modelo de predicción USLE. Según el mapa de estados erosivos en España se calcula que el 18.2 por ciento del territorio español comprende una erosión extrema (2.2 por ciento), muy alta (5.1 por ciento) y alta (10.9 por ciento), siendo uno de los países de la Unión Europea con mayor riesgo de desertificación por erosión.

Sainz de Regoyos (2003), en su tesis doctoral realiza un análisis amplio de la erosión hídrica, la sedimentación y se apoya de modelo informáticos, alcanzando resultados importantes en los siguientes puntos que muestran relación con el presente trabajo de investigación.

En la estrategia española de desarrollo sostenible y el programa de acción nacional de lucha contra la desertificación se consigna como la primera causa de deterioro del medio rural es la desertificación y en el área mediterránea, son los procesos de erosión hídrica los que provocan la degradación del suelo y la desertificación, proponiendo “crear un sistema de vigilancia y alerta en las zonas vulnerables a la desertificación con el objeto de disponer de mediciones, datos e indicadores que permita diagnosticar los procesos de desertificación en las zonas afectadas y las respuestas de las mismas ante los remedios aplicados”.

Los factores que determinan la tasa de erosión son: la lluvia, la escorrentía, el viento, el suelo, la pendiente, la cobertura vegetal y la presencia o ausencia de medidas de conservación. Estos y otros factores relacionados con ellos, se pueden considerar bajo tres aspectos: el **aspecto**

energético que incluye la capacidad potencial de la lluvia, la escorrentía y el viento para provocar la erosión; **aspecto de la resistencia**, resulta fundamental el factor de erosionabilidad del suelo que depende sobre todo de sus propiedades mecánicas y químicas y el **aspecto de protección** se centra en los factores relacionados con la cobertura vegetal, esta puede proteger de la erosión al interceptar la lluvia y reducir la velocidad de la escorrentía y del viento.

La tasa de erosión sigue un patrón estacional (asociado al régimen de lluvias cuando presenta una estación húmeda y una estación seca) que a su vez está relacionada con el desarrollo de la cubierta vegetal.

Clérici y García (2001), en aplicaciones del modelo USLE/RUSLE; indican que es una herramienta para estimar las tasas de erosión de los suelos, entre ellas la sedimentación fenómeno siempre asociado a la erosión, colmata cauces y cuerpos de agua, reduciendo su capacidad de regulación hidrológica y resultando en desbordes y crecientes más frecuentes. A efectos de ilustrar esta aplicación de la sedimentación que termina en la laguna del Sauce de la cuenca del arroyo Pan de Azúcar, presentando un resumen de los resultados.

En este caso la erosión bruta estimada es de 66,571 Mg anuales, de los que 25,297 Mg llegarían a la laguna (coeficiente de transporte global de 38 por ciento). La contribución a la erosión bruta y la que llegaría a la laguna de cada SUT sería la que se muestra en el Cuadro 1.

En la situación en la que se adoptarían tanto mejoras en el uso y manejo (factores C) como en las prácticas mecánicas de apoyo (conservación), la erosión bruta se estima en 51,839 Mg anuales, de los cuales 19,699 Mg llegarían a la laguna, lo que implica una disminución de la erosión en la laguna frente a la situación actual.

Cuadro 1: Estimaciones de la erosión bruta y la que llegaría a la laguna

SUT:	CN	F	L	Ai	P	RLg
Erosión bruta (Mg.año ⁻¹)	42937	2515	12841	1068	1019	6191
Erosión a la laguna (Mg.año ⁻¹)	16316	955	4880	406	387	2352
Proporción de la erosión a la laguna	0.64	0.04	0.19	0.02	0.02	0.09

SUT = Sistema de Uso de la Tierra; CN = Campo Natural; F = Forestación; L = Lechería;

Ai = Agricultura intensiva, hortícola y frutícola = Papa comercial; RLg = Rotaciones agrícolas ganaderas.

FUENTE: Clérici y García (2001)

Respecto de la erosión y su relación con la sedimentación de embalses en el ámbito de estudio, se puede precisar que no existen trabajos de investigación sobre pérdida de suelos en la cuenca aportante del embalse de Aguada Blanca y su relación con la colmatación de sedimentos en dicha embalse; tornándose estratégico porque las últimas construcciones de los embalses de Pillones y Chahuanca en la cuenca pueden correr el mismo riesgo de colmatación con las implicancias técnicas y económicas correspondiente para el sistema Chili Regulado, por lo que el presente trabajo de investigación será de utilidad para analizar las proyecciones de sedimentación y mitigar los niveles de colmatación de los embalses referidos.

2.2 PÉRDIDA DE SUELO

Morgan (1994), indica que la erosión es un proceso natural, pero su distribución en el tiempo y espacio es el resultado de circunstancias físicas y humanas. Desde que la tierra se cultivó por primera vez, la erosión del suelo por el agua y el viento han sido un problema constante.

Blum y Aguilar. (1994), mencionan que la armonización espacial y ecológica definen el uso sostenible del territorio y considera que el suelo desempeña seis funciones básicas, no siempre complementarias, que entran en competición cuando el hombre utiliza el territorio.

- Producción de biomasa, suministro alimentos, energía renovable y materias primas como base para la vida humana y animal.
- Actuar como filtro, medio taponador (buffer) y transformador para proteger el medio ambiente, especialmente las aguas subterráneas y la cadena alimentaria.
- Servir como medio protector de los numerosos organismos del suelo y como reserva genética.
- Como soporte físico para el desarrollo de las actividades socioeconómicas.
- Como fuente de materias primas, suministrando agua, arcilla, arena, gravas, minerales y otros.
- Como medio protector de la herencia cultural que contiene en forma de evidencias arqueológicas y paleontológicas.

FAO/PNUMA (1980) define la degradación del suelo como “un proceso que rebaja la capacidad actual y potencial del suelo para producir (cuantitativamente o cualitativamente) bienes o servicios.

Uri y Lewis (1998), indican que los impactos de la erosión fuera de la zona de origen afectan áreas colindantes donde la gente afectada tiene poca o ninguna influencia sobre la zona donde se produce la erosión, “por eso la sociedad tendría que tener más interés en que se controlara la erosión en grandes áreas mejor que en parcelas individuales.

Suárez (1980), manifiesta que la erosión laminar consiste en la remoción de delgadas capas de suelo extendidas en forma más o menos uniforme en toda la superficie del suelo; es poco apreciable ya que la cantidad total de suelo removido en un aguacero es generalmente pequeña. Es el efecto combinado de la acción del golpeteo que desprende las partículas de suelo y la escorrentía. Su acción selectiva sobre las partículas genera “pavimentos de erosión”, los cuales se producen por la remoción y arrastre de las partículas más livianas (arcilla y materia orgánica), quedando sobre la superficie suelos gravillosos o pedregosos.

Morin et al (1981), citado por León (2001), mostraron como la capacidad de infiltración se reducía de 100 mm h^{-1} hasta 8 mm h^{-1} en suelos arenosos conforme se desarrollaba la costra superficial. Hoogmoed y Stroosnijder (1984), citado por León (2001), reportaban de estudios en Mali, Africa Occidental, una reducción de la capacidad de infiltración de los suelos desde $100\text{-}200 \text{ mm h}^{-1}$, hasta 10 mm h^{-1} ; aspectos muy importantes a tomar en cuenta para las actividades de conservación en las cabeceras de cuenca. Este fenómeno ocurre cuando el suelo no cuenta con una apropiada protección en la superficie (vegetación); se estima que el 70 por ciento del total de suelo removido se debe a la acción del golpeteo o salpicadura.

El Swaify et al, (1982); mencionan que de estudios sobre mecanismos de desprendimiento y transporte de las partículas del suelo por salpicadura, escorrentía y viento, se deduce que la estrategia para la conservación del suelo debe basarse en:

- Medidas agronómicas; manejo de cultivos con policultivo con rotación de cultivos y cultivo en fajas, alta densidad de siembra y cultivo de cobertura.
- Manejo de suelo; laboreo de conservación, mediante laboreo a nivel, laboreo en caballones y laboreo mínimo y no laboreo.
- Métodos mecánicos mediante aterrazamientos, encausamientos y estructuras.

Asimismo, indican que las medidas de conservación deben estar estrechamente relacionadas con la naturaleza del problema erosivo y para que una técnica de conservación de suelo tenga éxito tiene que concurrir tres aspectos al mismo tiempo: una tecnología alcanzable y aceptada,

uso eficiente de los recursos humanos y que con ella se obtenga beneficios económicos claramente percibidos por los usuarios.

En el Programa 21 de las Naciones Unidas aprobado en Rio en 1992 la desertificación fue considerada como una materia fundamental y se hizo un llamamiento para que se elaborara un Convenio sobre Desertificación.

En 1994 se aprueba en Paris; con el consenso de más de un centenar de países (172 entre ellos Perú) el acta de la Convención de Naciones Unidas de lucha Contra la Desertificación (CLD), en la que la comunidad Internacional reconoce que dicho fenómeno constituye el mayor problema de carácter ambiental y socioeconómico que concierne a numerosos países del mundo. En dicha Convención se establece la necesidad de que todos los países elaboren y ejecuten un Programa de Acción Nacional Contra la Desertificación (PAN).

Calacicco et al. (1986), citados por León (2001), indican que el costo total de la erosión en Estados Unidos de América se estima entre 1.7 y 1.8 billones de dólares/año; más del 80 por ciento de los daños que superan los 25 dólares/ha/año, ocurren en tierras que se erosionan a tasas superiores a 3 toneladas, sin considerar la afectación del valor de la tierra.

INRENA, citado por el INEI (2013); realizó un inventario a nivel nacional de los niveles de erosión en la costa, sierra y selva, reportando sus niveles y superficie en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Superficie afectada, según niveles de erosión

Niveles de erosión	Superficie	
	Hectárea	por ciento
Total	127 945 790	100.0
Muy ligera	53 188 030	41.6
Ligera	35 179 480	27.5
Moderada	31 337 470	24.5
Severa	8 240 810	6.4
Costa	2 520 650	2.0
Sierra	5 413 840	4.2
Selva	306 320	0.2

FUENTE: INEI (2013).

Según el MINAG (2013), citado por el INEI (2013), la superficie afectada por la erosión, según agente y proceso erosivo a nivel nacional, el mayor porcentaje recae en la erosión pluvial (88 por ciento), cuyo detalle se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Superficie erosionada, intensidad y agente del proceso erosivo

Agente y proceso erosivo	Intensidad	Superficie	por ciento
Total		127 945 790	
Pluvial		70 576 610	55.16
Escurrimiento superficial no concentrado		46 586 690	
Laminar imperceptible	muy ligera	39 569 090	
Laminar incipiente	muy ligera	2 266 410	
Laminar evidente	ligera	4 006 800	
Laminar intenso	moderada	744 390	
Escurrimiento superficial concentrado		23 989 920	
Surcos escasos	ligera	10 168 600	
Surcos comunes	moderada	6 220 320	
Surcos y cárcavas escasos	moderada	4 590 800	
Surcos y cárcavas comunes	severa	2 911 940	
Surcos y cárcavas abundantes	severa	98 260	
Pluvial y gravitacional		23 051 380	18.02
Escurrimiento superficial no concentrado y movimiento en masa		19 479 940	
Escurrimiento superficial concentrado actividad torrencial y movimiento en masa		3 571 440	
Acumulación e inundación fluvial		19 030 500	14.87
Decantación	muy ligera	11 352 530	
Inundación ocasional	ligera	3 461 490	
Inundación frecuente	moderada	4 216 480	
Glacial y Eólica		4 059 720	3.17
Gravitacional y eólica		5 707 780	4.46
Eólica		5 519 800	4.31

FUENTE: INEI (2013).

2.3 ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS (USLE)

La USLE es una ecuación empírica para determinar la pérdida media anual de suelo, resultando ser un modelo práctico y accesible que ha sido utilizado a diferentes escalas en el mundo entero.

Wischmeier y Smith (1958) indican que el Departamento de Agricultura de los EEUU (USDA), comenzó un programa en 1933, con 10 estaciones experimentales de erosión de suelos y 40 proyectos para el control de la erosión en todo el país. Las estaciones experimentales median la escorrentía y la erosión del suelo en parcelas uniformes y en pequeñas cuencas con un amplio rango de suelos y técnicas de cultivo. Todos los datos recogidos en estas estaciones aportaron el conocimiento suficiente sobre los procesos erosivos, con el resultado de la USLE (Universal Soil Loss Equation).

En 1935 se creó el Servicio de Conservación de Suelos de EE.UU. (SCS), con el objetivo principal de asegurar que la erosión del suelo sería controlada para prevenir los impactos que sobre la agricultura se estaban produciendo, iniciando con algunos modelos para determinar la erosión de los suelos basados en la USLE.

Gregory y Walling (1973), mencionan que los modelos empíricos se basan 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.
- Caja gris: se conocen algunos detalles de cómo funciona el sistema.
- Caja blanca: se conocen todos los detalles de cómo opera el sistema.

Los modelos empíricos son más aplicables a problemas a gran escala y donde hay menos datos disponibles; entre ellos la USLE que es el modelo de predicción de la erosión más utilizado hasta la actualidad.

Rodríguez et al. (2004), indican que la USLE es un modelo paramétrico que pretende interpretar los mecanismos erosivos por causas y efectos, de mayor aceptación y más amplia aplicación. La incorporación de los SIG a este tipo de estudios permite con técnicas modernas un mejor análisis y representación de la información georeferenciada. Según sus conclusiones

muestra que el 53 por ciento de la zona de estudio tiene una erosión de $10 \text{ Mg Ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, por debajo del nivel de tolerancia de referencia propuesto por ICONA, de $12.5 \text{ Mg Ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) ha sido empleada en todo el mundo para numerosos propósitos y en muy diferentes condiciones socioeconómicas y ambientales, siendo la más aceptada entre las personas encargadas de la gestión de cuencas con fines de producción o de conservación de suelos y de recursos hídricos.

Esta ecuación fue finalmente modificada y desarrollada por Wischmeier y Smith en 1978; describiendo de manera resumida la ecuación USLE:

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

Donde:

E = pérdida anual del suelo

R = factor lluvia o índice de erosividad pluvial

K = erosionabilidad del suelo

L = longitud de la pendiente

S = factor de pendiente

C = factor de cultivo y uso

P = factor de prácticas de conservación.

Los factores L, S, C, y P son adimensionales y las unidades de K y E son similares en este caso (t/ha).

2.3.1 Factor lluvia o índice de erosividad pluvial (R)

R: Factor de lluvia y escurrimiento, número de unidades de índice de erosión pluvial (EI), que para una tormenta determinada es producto de su energía total (E) y su máxima intensidad en 30 minutos (I_{30}).

Según Roose (1995), citado por Ramos (2001):

$$R = 1.73 * 0.5 * P$$

Donde P = precipitación media anual

Morgan (1974), citado por Ramos (2001), indica para lugares de alta precipitación:

$$R = \frac{I_{30} (9.28 P - 8.383)}{1000}$$

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

Según Foster, citado por Ramos (2001):

$$R = \frac{0.276 P * I_{30}}{100}$$

ICONA (1988a), obtuvo el factor de la erosividad de la lluvia (Factor R) que correlaciona R con el índice de agresividad climática "F" de Fournier, mediante el índice y ecuación modificada de Fournier.

$$R = 2,56 (F)^{1.065}$$

F = índice de Fournier modificado

$$F = \frac{1}{n} \sum \frac{pi^2}{Pi}$$

Donde:

n = número de años de la serie de precipitación

pi = precipitación del mes más lluvioso del año i" (mm)

Pi = precipitación total anual del año i (mm).

2.3.2 Factor topográfico (LS)

El factor LS está dado por la inclinación y longitud de la pendiente.

L: factor de longitud de pendiente, proporción de pérdida de suelos en longitud de pendiente específica con respecto a una longitud de pendiente estándar, de 22,13 m.

S: factor de inclinación de pendiente, proporción de pérdida de suelos de una superficie con una pendiente específica con respecto a una pendiente estándar de 9 por ciento.

L, S: longitud e inclinación de pendiente

Pérdidas de suelo se incrementan conforme la longitud crece y con la inclinación de la pendiente; dependen de la tasa de erosión laminar o por surcos.

Un procedimiento sencillo de cálculo es el utilizado por la Facultad de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes (Madrid), citado por Ramos (2001), permitiendo asignar directamente a una ladera el valor del factor LS según pendiente, resumido en Cuadro 4.

Cuadro 4: Coeficientes del factor LS

Grupos de pendientes (por ciento)	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
> 100	28.5

FUENTE: ETSIM de la Universidad Politécnica de Madrid.

2.3.3 Factor de erodabilidad del suelo (K)

Este factor (K) se define como la resistencia del suelo al proceso de erosión y transporte.

K: erodabilidad del suelo, factor de susceptibilidad a la erosión del suelo, tasa de pérdida de suelos por unidad EI, ajustado en campo a través de mediciones de reglas milimetradas para encontrar los niveles de erosión.

Erodabilidad inherente al suelo depende principalmente de los parámetros de: Capacidad de infiltración, Textura y estructura, Permeabilidad y cohesión de partículas del suelo (materia orgánica, óxidos de Fe y Al, arcillas).

La ecuación de regresión de Wischmeier y Smith (1978), obtenida del análisis de los datos proporcionados por simuladores de lluvia es la siguiente:

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

Donde:

M = producto del porcentaje de partículas de suelo igual a la diferencia entre el 100 por ciento y el porcentaje de arcilla de la muestra de suelo

a = por ciento de materia orgánica

b = parámetro que depende de la estructura del suelo

c = clase de permeabilidad del perfil del suelo, según la codificación de la USDA: rápida o muy rápida (1), moderadamente rápida (2), moderada (3), moderadamente lenta (4), lenta (5) y muy lenta (6)

El factor de erodabilidad del suelo se calcula con la ecuación del nomograma de Wischmeier, citado por Mannaerts (1999).

$$K = \frac{1}{7.594} * \left[\frac{2.1}{10^4} * (12 - OM) * M^{1.14} + 3.25 (s - 2) + 2.5(p - 3) \right] / 100$$

Donde:

K = factor de erodabilidad del suelo (t./ha.MJ*ha/mm*hr)

s = código de la estructura del suelo

p = código de permeabilidad

M = producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias o (por ciento limo + por ciento arena muy fina)*(100 - por ciento arcilla)

El nomograma de Wischmeier es una buena aproximación para determinar el factor de erodabilidad del suelo (Factor K).

Mannaerts (1999), indica que el RUSLE comprende el factor K que representa el efecto de las propiedades del suelo y de las características del perfil en la pérdida de suelo. Los valores de K son asignados usando el nomograma de erodabilidad del suelo, que combina el efecto del tamaño de las partículas, MO, estructura del suelo y la clase de permeabilidad del perfil. Es una compleja propiedad que se la entiende como la facilidad con la cual el suelo es desprendido por el salpicamiento, durante una lluvia. Esta propiedad está relacionada al efecto integrado de la lluvia, escurrimiento e infiltración.

Asimismo, indica que los suelos de textura mediana tienen índices de K moderados (0.25-0.4), porque son discretamente susceptibles al desprendimiento y producen moderados escurrimientos. Suelos de textura gruesa, tales como suelos arenosos, tienen índices bajos de K (0.05-0.2), debido a la alta permeabilidad y poco escurrimiento, aunque estos suelos son fácilmente desprendibles. Los suelos generalmente llegan a ser menos erosivos con una reducción en la fracción de limo.

2.3.4 Factor cobertura vegetal (C)

La cobertura vegetal es la biomasa en la superficie del suelo que intercepta las lluvias, disminuyendo la acción destructora de la gota de lluvia, representando la capacidad de infiltración, escorrentía y la pérdida de suelo según el tipo y densidad de cubierta vegetal.

Marcano (2016), indica que los bosques actúan como esponjas, capaces de recoger y almacenar grandes cantidades del agua de lluvia. Los suelos forestales absorben cuatro veces más agua de lluvia que los suelos cubiertos por pastos y 18 veces más que el suelo desnudo.

Suárez (1980), menciona que la cobertura vegetal consistente de varios estratos y favorece en mayor medida el proceso de infiltración del agua en los terrenos, a diferencia de las mono estratificadas (pastos o suelos desnudos), en las cuales la infiltración del agua es sustancialmente menor, como se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5: Infiltración del agua con diferentes coberturas vegetales

Tiempo (min)	Tipo de cobertura		
	Bosque	Pastos	Suelo desnudo
5	60.0	21.0	5.3
10	119.0	45.8	11.0
30	360.0	127.0	35.5
60	715.0	250.0	63.0

FUENTE: Suárez, 1980

Correa (1980), indica que el fenómeno de la erosión por salpicadura puede describirse como la lluvia que al caer sobre el terreno sin vegetación, mueve el suelo no protegido; durante eventos fuertes, capas de agua enturbada por material terroso suspendido, corren a través de esas superficies desnudas. El suelo al no presentar una adecuada cobertura protectora, es dividido y

soltado por el impacto de las gotas de lluvia, para luego ser arrastrado hacia partes más bajas. Al respecto Morgan (1978) reporta la formación de estructuras de este tipo a una tasa de 20 mm año⁻¹ en Bedfordshire, Inglaterra.

C: Factor de cobertura, proporción de pérdida de suelo en una superficie con cobertura y manejo específico con respecto a otra idéntica en barbecho, con labranza continua.

- Protección contra erosión, en orden de importancia: forestal > cultivos forrajeros > cereales > cultivos en hilera > suelo desnudo.
- Tipos de tierras cultivadas.
- Clase de cobertura, porcentaje de superficie de suelo cubierta.
- Varía de 0 a 1.

En el Cuadro 6 se presenta los valores del factor C.

Cuadro 6: Resultados del valor C mediante diferentes metodologías

Tipo de Cubierta	Factor “C”	Metodología
Cultivos leñosos	0.4	ICONA, 1982.
Dehesa – pastizal	0.05	Wischmerier, 1975
Cultivos en regadío (maíz – cereal)	0.5	Moreira, 1991

FUENTE: ICONA, 1982; Wischmerier, 1978 y Moreira, 1991

Santacruz (2011), indica en un estudio de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo en la cuenca del río Cahoacan, Chiapas, México, que en los últimos años en la costa de Chiapas se han presentado graves procesos de erosión debido a los cambios de uso de suelo. Por la magnitud de la problemática se han realizado estudios que muestran el papel clave que juega la cobertura vegetal en el proceso erosivo de la lluvia. Los resultados revelaron que en condiciones actuales de uso de suelo, las pérdidas van desde 16.270 T/ha/año hasta valores mínimos de 13.317 T/ha/año; concluyendo que de seguir las alteraciones de los bosques, los valores actuales de pérdida de suelo pueden incrementarse hasta en un 900 por ciento. De modificarse la tendencia actual de deforestación y con buenas prácticas agrícolas en las zonas donde se realiza agricultura de temporal y de riego, la pérdida de suelo se reduciría en un 60 por ciento con respecto a la actual.

Wischmeier (1978), determinó valores del factor de cobertura vegetal, de acuerdo al cultivo y manejo, que se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 7: Índices del factor de cobertura vegetal C

Cultivo y práctica	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1.0
Bosque o matorral denso (alto mulch)	0.001
Pradera herbácea en buenas condiciones	0.01
Pradera sobre pastoreada	0.1
Pradera herbácea	0.01-0.025
Albolado denso	0.01-0.003
Albolado forestal clareado	0.003-0.009
Matorral con buena cobertura	0.003-0.013
Matorral ralo y eriales	0.20-0.013
Cultivos anuales y herbáceos	0.25
Pasturas	0.15
Cubierta escasa (60 por ciento)	0.15-0.09
Cubierta inapreciable	0.45

FUENTE: Wischmeier (1978).

Verdín et al. (2003) mencionan que el índice de vegetación de diferencia normalizada, también conocido como NDVI, por sus siglas en inglés, es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición, por medio de sensores remotos instalados comúnmente desde una plataforma espacial, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja.

Gilabert et al. (1997) definen un índice de vegetación (NDVI) como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y es particularmente sensible a la cubierta vegetal.

El NDVI es una técnica de uso habitual en teledetección y es comúnmente utilizado para mejorar la identificación y discriminación entre dos cubiertas vegetales, que presentan un comportamiento refractivo muy distinto entre dos o más bandas, basado en la caracterización y diferencia espectral de distintas cubiertas de la vegetación y suelos.

Estos índices tienen su fundamento en el particular comportamiento radiométrico de la vegetación. Una cubierta vegetal en buen estado de salud, tiene una firma espectral que se

caracteriza por el contraste entre la banda del rojo (entre 0,6 y 0,7 μm .), la cual es absorbida en gran parte por las hojas, y el infrarrojo cercano (entre 0,7 y 1,1 μm .), que es reflectada en su mayoría. Esta cualidad de la vegetación permite la realización de su valoración cualitativa.

El índice de vegetación diferencial normalizado se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{NDVI} = (\text{IRC}-\text{R})/(\text{IRC}+\text{R})$$

Donde: IRC es la reflectividad en el infrarrojo cercano y R es la reflectividad en el rojo. En las imágenes Landsat 8, la banda 4 (0.630 – 0.680 μm) corresponde al rojo (R) y la banda 5 (0.845 – 0.885 μm) al infrarrojo (IRC).

La mayoría de los NDVI se basan en la significativa diferencia de las características de la reflexión espectral entre la vegetación verde saludable, la vegetación muerta o senescente, suelos secos y desnudos, como las diferentes cubiertas vegetales y suelos desnudos.

El NDVI representa el cociente de la banda 4 y 5 bajo la siguiente expresión.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{TM5}-\text{TM4}}{\text{TM5}+\text{TM4}}$$

Banda 4 del sensor Landsat 8 (roja)

Banda 5 del sensor Landsat 8 (infrarrojo cercano).

2.3.5. Factor de prácticas de conservación (P)

Morgan (1994) menciona que las estrategias para el control de la erosión utilizan técnicas de conservación de suelos con las que se pretende mantener las pérdidas de suelo por debajo del umbral que, teóricamente, debe permitir a la velocidad natural de formación del suelo compensar las pérdidas por erosión. La erosión es un proceso natural, no puede evitarse totalmente pero puede reducirse a un valor máximo aceptable o pérdida tolerable de suelo.

El éxito de una estrategia para el control de la erosión pasa necesariamente por tres pasos.

- Identificar correctamente los problemas erosivos y por lo tanto los procesos de erosión identificando las áreas con mayor riesgo de erosión y como consecuencia conocer las principales zonas de origen del sedimento.
- Diseñar las medidas de conservación de suelos más adecuadas para controlar el problema.

- Analizar la disposición de los comuneros y restantes agentes para llevar a cabo las medidas de conservación.

P: Factor de prácticas de conservación, proporción de pérdida de suelo con una práctica de conservación (cultivos en contorno, barreras vivas, etc), con respecto a aquella con labranza en sentido de la pendiente.

FAO considera pérdidas de suelo tolerables entre 2,2 y 11,2 T/ha/año, según profundidad del perfil.

2.4 NIVELES DE EROSIÓN DE SUELOS SEGÚN USLE

Gómez y Alarcón (1975) indican que la primera clasificación fue desarrollada a partir de adaptaciones hechas a la metodología del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos para la calificación de la erosión según su intensidad (Cuadro 8).

Cuadro 8: Grados de erosión según su intensidad

Grado de erosión hídrica	Procesos que ocurren
1. No hay. No se aprecia pérdida de suelo por arrastre superficial	Soliflucción. Hundimientos
2. Erosión ligera. La capa arable, cuando existe, se adelgaza uniformemente; no se aprecian huellas visibles de erosión. La erosión laminar se presenta en menos del 25 por ciento del área del lote.	Erosión laminar. Erosión pluvial
3. Erosión moderada. La capa arable ha perdido espesor; se aprecian surquillos. Se presenta entre el 25 y 75 por ciento del área del lote	Erosión laminar severa Soliflucción con pequeños hundimientos en semicírculo. Terracetas
4. Erosión severa. Pérdida casi total del horizonte orgánico; se presentan surcos frecuentes y cárcavas aisladas. Ocurre en más del 75 por ciento del área del lote	Erosión combinada (laminar, surcos, cárcavas) Coladas de barro Deslizamientos y derrumbes
5. Erosión muy severa. Cárcavas en una red densa; paisaje sin vegetación, derrumbes, deslizamientos, coladas de barro, frecuentes y grandes.	Erosión en cárcavas Remociones masales

FUENTE: Gómez y Alarcón 1975.

Según el modelo de USLE (Wischmeier y Smith 1978), los niveles de pérdida de suelo considerados van desde erosión baja hasta erosión crítica, muy similares a los niveles erosivos de la clasificación ICONA (1991); cuyos valores se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 9: Niveles de erosión

Niveles de erosión, USLE	Valores de erosión
Erosión baja	$E < 5$ T/ha/año
Erosión moderada	$E = 5-25$ T/ha/año
Erosión media	$E = 25-50$ T/ha/año
Erosión alta	$E = 50-100$ T/ha/año
Erosión muy alta	$E = 100-200$ T/ha/año
Erosión crítica	$E > 200$ T/ha/año

FUENTE: Wischmeier y Smith, 1978.

2.5 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRAFICA (SIG)

Un SIG, según Wikipedia (2016), es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. Es una herramienta que permite a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones.

Berry (1990), menciona que el SIG alude a un sistema de información espacial automatizado e internamente referenciado, diseñado para la gestión y análisis de datos espaciales y la elaboración de cartografía. Los mapas digitales pueden ser manipulados automáticamente o manualmente, mientras que su referencia con respecto al sistema de información espacial puede ser externa o interna. Un sistema externamente referenciado utiliza el ordenador para almacenar la información de distintas áreas geográficas y los sistemas internamente referenciados poseen un enlace automático entre la componente temática (atributos alfanuméricos) y la espacial (localización geográfica y propiedades espaciales de los objetos).

Olaya (2014), indica que los elementos básicos que componen el SIG son cinco: datos, métodos, hardware, software y personas, interrelacionadas en la forma de la Fig. 1.

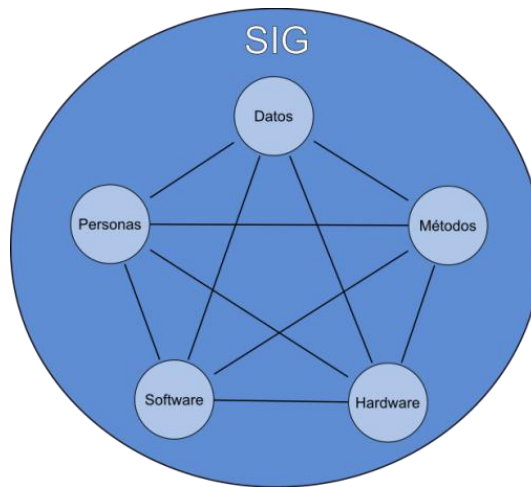


Figura 1: Elementos básicos del SIG

Fuente: Olaya, 2014

Estos mapas digitales constituyen las bases funcionales de los verdaderos SIG. Los últimos avances han superado muchas de las dificultades del pasado pudiendo concluir que los modernos SIG son sistemas para el soporte de decisiones (DSS) complejos con buenas cualidades para la construcción de modelos hidrológicos.

El desarrollo de modelos hidrológicos digitales en aproximaciones ráster (formato de SIG) resulta una alternativa interesante para superar la escasez de datos hidrológicos y climáticos (Belmonte y Núñez, 2006)

Se ensayaron diferentes metodologías en un contexto SIG para definir, en espacios territoriales continuos, las variables: precipitación, temperatura, caudales máximos y pérdida de suelos. Los modelos que resultaron con mayor ajuste fueron: regresiones con altitud y latitud para las variables climáticas; aplicación de la RUSLE para la estimación de pérdida de suelo, incorporando cada factor como una capa temática. Los mapas generados sirven para diversas aplicaciones: estudios de impacto ambiental, recursos naturales y manejo de cuencas.

La principal ventaja de trabajar con modelos digitales es la posibilidad de generar mapas raster confiables para las variables hidrológicas, con fines y aplicaciones diversas (estudios de impacto ambiental, simulaciones espacio-temporales, gestión de los recursos naturales, planes de control de erosión, etc.).

Triviño y Munir (2001), indican que los SIG y la hidrología son dos campos de trabajo que comparten muchos intereses, por esta razón cada vez más investigadores se ayudan de los SIG para la construcción de modelos hidrológicos. El artículo examina algunos aspectos de los numerosos vínculos existentes entre los SIG y la modelización hidrológica. Se describen someramente algunos de los beneficios que las estructuras de datos orientadas a objetos tienen en estos modelos, enfatizando su posible impacto en estudios de carácter temporal.

Asimismo, el módulo de análisis espacial (*ArcView Spatial Analyst*) provee funciones basadas en ráster que incluyen cuencas, contornos, análisis de distancia y superposiciones (*overlays*) de capas de información. Permite el modelado ráster y vectorial integrado. Este módulo permite la generación de curvas de nivel a partir de modelos de elevación del terreno (DEM). Análisis espacial es el procesamiento de datos espaciales generando nueva información acerca del mundo y sirve para la toma de decisiones. La calidad de las decisiones tomadas depende de la calidad de los datos ingresados y el modelo usado en el análisis.

La extensión *Spatial Analyst de ArcGIS* proporciona una amplia gama de características espaciales de gran alcance para el modelamiento y el análisis. La importancia de *Geostatistical analyst* radica en la creación de superficies continuas a partir de medidas esparcidas tomadas con puntos de muestreo. Ayuda a predecir con seguridad valores para superficies.

El *3D Analyst*, permite la visualización y el análisis efectivo de datos de superficie. Usando esta extensión se puede ver una superficie desde varios puntos de vista, consultar superficies, determinar lo que es visible desde una ubicación seleccionada, crear imágenes en perspectiva. Posee la aplicación de *ArcScene* lo que da la interfaz para ver capas múltiples de datos tridimensionales, creando y analizando superficies, modelamientos tridimensionales.

Bosque (2009), menciona que un SIG es un conjunto de herramientas, de programas, equipamientos, metodologías, datos y personas perfectamente integrados, que permiten la colecta, almacenamiento, procesamiento y análisis de datos geográficamente referenciados para un conjunto particular de objetivos.

Las etapas para la elaboración de un SIG son: ingreso al sistema de la información espacial (cartas geográficas, fotografías aéreas, imágenes satelitales), referenciación geográfica del material cartográfico e iconográfico, diseño de coberturas temáticas ambientales, organización del banco de datos con los atributos descriptivos de los bienes ambientales del territorio

ingresados en las coberturas temáticas, cruce de coberturas temáticas para componer nueva cartografía digital y análisis integrado de variables ambientales según objetivos determinados para crear modelos territoriales.

El mundo real es tan complejo y continuo que es necesario abstraer sólo los aspectos relevantes en el proceso de análisis espacial, esto se logra usando una jerarquía de modelos de datos, estructuras de datos y formatos de archivos de datos.

2.6 SEDIMENTACIÓN Y BATIMETRÍA

Las consecuencias de la erosión del suelo se manifiestan tanto en el lugar donde se produce (in situ) como fuera de él. Los impactos que se producen fuera de las zonas de erosión son potencialmente mayores que los efectos producidos in situ (Foster y Dabney, 1995).

Los sucesos de baja magnitud y de alta frecuencia producen impactos que se perciben poco pero que a largo plazo son irreparables; sin embargo, los sucesos de baja frecuencia pero de gran magnitud crean gran interés público para que sean controlados y evaluados, ya que una gran tormenta puede provocar fuertes corrientes de tierra, cortes de carreteras, obstrucción, etc, con lo que los impactos económicos y medioambientales reciben mucha más atención (Harbor, 1999).

La preocupación por los problemas de degradación del suelo, surgen por los problemas que genera (contaminación de acuíferos, eutrofización de aguas, colmatación de embalses, introducción de elementos tóxicos dentro de la cadena trófica, etc).

La sedimentación, degrada la calidad de las aguas, ya que los sedimentos pueden llevar adsorbidos productos químicos contaminantes, aumento de niveles de nitrógeno y fósforo en las masas de agua, favoreciendo la eutrofización, tal como viene ocurriendo en el sistema de embalses del Chile que en los últimos años (2014) afectó la calidad de las aguas (embalses); reduce la capacidad de transporte de arroyos y ríos, disminuye la vida útil de las presas, reduciendo su capacidad y requiriendo costosas obras y presupuestos para su rehabilitación.

Según Masso (1974), se entiende por batimetría el levantamiento del relieve de superficies subacuáticas, tanto los levantamientos del fondo de mar como de embalses. Denominados

también topografía hidrográfica, cartográfica náutica. La labor del topógrafo consiste en realizar el levantamiento de los fondos, como si de un terreno seco se tratase.

La finalidad de la batimetría es obtener las coordenadas (X, Y, Z) de todos los puntos. La parte más compleja y que caracteriza a los diversos métodos de levantamientos batimétricos es la determinación de la profundidad (operación de sondeo). La profundidad de un punto se obtendrá midiendo la distancia vertical entre el nivel del agua y la superficie del fondo.

Las últimas tecnologías apuntan hacia el empleo de equipos con observaciones a satélites (GPS) y determinación de la profundidad por técnicas sónicas digitales, todo ello computarizado y controlado en tiempo real por un potente software capaz de gestionar los datos de sendos equipos.

Jakubauskas y de Noyelles (2008), indican que el desarrollo técnico e informático hace que las tareas en un levantamiento batimétrico se reduzcan, disminuyendo tiempos de ejecución y gastos, como así también mejorando las precisiones finales, tanto en planimetría como en la determinación de la profundidad.

Lecaros (2011), menciona que el sedimento fluvial son aquellas partículas transportadas por el flujo de un cauce, natural o artificial, que son producto de la erosión de la cuenca. Estos sedimentos son normalmente transportados a lo largo de los cauces bajo una condición de equilibrio entre las condiciones de caudal, morfología y arrastre sólido. Al existir un embalse se rompe dicho equilibrio, produciéndose una deposición aguas arriba de la presa y una degradación del lecho aguas abajo de la estructura.

En el caso de los sedimentos finos, si la densidad del cauce aportante es mayor que la del cuerpo de agua en reposo debido a una alta carga de sedimento fino, se genera lo que se conoce como una corriente de turbidez, que usualmente es lo que ocurre en la cuenca aportante de Aguada Blanca ya que es transportado en gran parte el sedimento fino (limo y arcillas) en periodos de lluvias por la erosión de suelos en el área de estudio.

Para lograr un buen diseño de las obras que van a estar sometidas al efecto de los sedimentos es necesario evaluar, además de la información histórica existente, la relación que existe entre la cuenca como productora de sedimentos y el río como conductor de los mismos (García y Maza, 1985)

Se denomina transporte de sedimentos al estudio de los procesos de erosión, iniciación del movimiento, transporte, depósito y compactación de las partículas sólidas.

El transporte de sedimentos por un río se puede clasificar en función a dos criterios: según el método de transporte (puede ser en suspensión y de fondo) y según el origen del material (del cauce o de la cuenca). Hay que aclarar que esta clasificación se refiere a un evento de lluvias y crecida fluvial, ya que, como es lógico, a largo plazo todo el material es proveniente de la cuenca. El material del cauce se transporta en suspensión y de fondo.

El transporte en suspensión puede representar el 90 por ciento o más de todo el transporte sólido de un río, del cual el material de lavado puede ser una gran parte. El material de lavado está ligado a las características hidrológicas de la cuenca: litología, suelos, pendiente, vegetación, precipitación, escorrentía, etc. El material en suspensión tiene gran repercusión en la colmatación de los embalses, como es el caso del embalse de Aguada Blanca y principalmente proviene del lavado de la cuenca (pérdida de suelo).

Un río puede transportar tanto material de lavado como llegue a él (limos y arcillas que el agua transporta en suspensión), casi independientemente de las características hidráulicas de la corriente. Así, dos ríos semejantes con igual material de fondo pero uno con cuenca protegida o forestada y otro con una cuenca desprotegida con fuertes pendientes y material suelto sobre su superficie, arrastran cantidades completamente diferentes de material de lavado, llegando el primero al extremo de no transportar ese material, que es lo deseado para evitar la colmatación de los embalses.

Naturalmente que el método más efectivo y seguro para aumentar la vida útil del embalse es el de atacar el problema desde su origen. Las cuencas que producen grandes cantidades de sedimentos presentan por lo general otros tipos de problemas que deben tratarse en conjunto, pero que básicamente responden al gran problema de la deforestación.

Palau (2016), indica que la colmatación junto con la eutrofización, son sin duda las dos principales afecciones ambientales de los embalses a nivel mundial y muy en especial en regiones como la península Ibérica donde, por un lado, la erosionabilidad de suelos es alta y la irregularidad de escorrentía natural muy notable.

El punto de partida de cualquier propuesta de medida preventiva es el disponer de información sobre el aspecto objeto de estudio. En el caso de la colmatación de embalses, esta necesidad de

información debe iniciarse en el conocimiento de las tasas de erosión real de las cuencas donde se encuentran.

La localización de las zonas productoras de sedimentos, su adecuación mediante obras de contención y/o preferentemente, mediante una correcta recuperación y mantenimiento de la cubierta forestal, son aspectos clave en la reducción de la producción de sedimentos y en la conservación de la vida útil de los embalses. En este sentido cabe que la eficacia de la restauración forestal pasa por recuperar todos los estratos de vegetación (arbóreo, arbustivo y herbáceo) hasta unas densidades adecuadas.

Rocha (2006), el conocimiento de la magnitud del aporte sólido de la cuenca, producto de su erosión, es de vital importancia para el éxito sedimentológico de un proyecto de embalse. La erosión específica de una cuenca, es decir, su producción de sedimentos por unidad de área y por unidad de tiempo es muy variable de una cuenca a otra y en una misma cuenca, a lo largo del tiempo también lo es, ya que no siempre el futuro es igual al pasado más bien usualmente en problemas de erosión es diferente y más aun con la incertidumbre del cambio climático.

En el estudio integral que realizó Energoprojekt, indicado por Rocha (2006), incorporó las nuevas mediciones efectuadas en el periodo 1972-76 y esto llevó a los proyectistas a considerar que el transporte sólido medio del río Chira era alrededor de 18 millones de toneladas por año (el 90 por ciento del cual correspondía a sólidos en suspensión). Como el caudal medio plurianual del río Chira se estimó en $105 \text{ m}^3/\text{s}$, la concentración media de sólidos estimada fue de $5,4 \text{ kg}/\text{m}^3$.

El estudio de la erosión de la cuenca no debe ser sólo retrospectivo, sino también prospectivo. Hay eventos que pueden ocurrir en el futuro, de algún modo previsibles, que darían lugar a un incremento de la erosión de la cuenca y, por lo tanto, de la producción de sedimentos. Se han visto lugares en los que ha ocurrido la destrucción de la cobertura vegetal de la cuenca después de haber ejecutado el proyecto. De acá surge la idea de intentar disminuir la erosión de la cuenca para disminuir la producción de sedimentos y alargar así la vida útil de los embalses ubicados en la zona de estudio.

Sánchez (2016), manifiesta que uno de los principales problemas que a menudo afectan a los embalses, es su pérdida de capacidad debido al depósito de sedimento en su interior. Independientemente que como parte del diseño de embalses está el disponer de un volumen

para almacenar dichos azolves, muchas veces es rápidamente rebasado, con la consecuente pérdida de volumen útil en el embalse.

Los datos referentes a los EUA, sintetizan la magnitud del problema de sedimentación. Anualmente se pierde 50 millones de dólares por los daños causados por la sedimentación de embalses y aproximadamente 1200 millones de m³ de sedimento se depositan en los vasos cada año.

El problema principal no radica en la cantidad depositada, sino en la calidad del agua. Dicho problema se vuelve fundamental desde el punto de vista ecológico, pues muchas veces se producen alteraciones de la flora y la fauna del almacenamiento en cuestión. Además de alterar la calidad del agua que en ocasiones se emplea como potable para una población, como es el caso del embalse de Aguada Blanca que últimamente representa para SEDAPAR S.A un problema en el tratamiento de agua potable por la alta concentración de sedimentos en el agua.

El criterio que hasta el momento parece ser el más prometedor, es la fórmula universal de pérdida de suelos (USLE). Este criterio originalmente empleado para determinar el aporte de sedimentos en pequeñas extensiones de terreno, ha sido modificado para emplearse en cuencas. El principal medio para evitar el problema de pérdida de capacidad de un embalse, es disminuir la erosión en las cuencas, incluso es la principal solución recomendada por diferentes autores.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 UBICACIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO

El ámbito del presente trabajo de investigación se circunscribe en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca, ubicada en las provincias de Arequipa y Caylloma, de la región Arequipa.

La región Arequipa está ubicada al suroeste del Perú, frente al Océano Pacífico, con 528 kilómetros de litoral. Limita al noreste con Ica y Ayacucho, por el norte con Apurímac y Cusco, por el este con Moquegua y Puno, por el suroeste con el océano Pacífico (Fig. 2)



Figura 2: Ámbito de estudio en la región de Arequipa

FUENTE: www.m.a.pso.fworld.com y propia.

El ámbito específico de estudio se ubica en la parte alta de la cuenca del río Quilca-Chili, al pie del volcán Misti; colindando por el norte con el distrito de Imata y con la región de Cusco, por el sur con los volcanes Chachani y Misti y la ciudad de Arequipa, por el este con el distrito San Juan de Tarucani y región Moquegua y por el oeste con el distrito Callalli de la provincia de Caylloma de Arequipa, visualizando la ubicación y delimitación de la cuenca en la Fig. 3.



Figura 3: Ubicación de la cuenca aportante Aguada Blanca

El mapa de la cuenca Aguada Blanca georeferenciada se encuentra dentro de las coordenadas Universal Transversal Mercator - UTM y Datum WGS 1984-Zona19s; el río principal denominado Chili nace de la confluencia de los ríos Sumbay y Blanco, en parte alta de la cuenca y detrás de la cordillera occidental y donde las embalses de Aguada Blanca, Frayle, Pillones y Challhuanca del sistema regulado de Arequipa se ubican dentro de la cuenca referida; cuyo detalle se muestra en la Fig. 4.

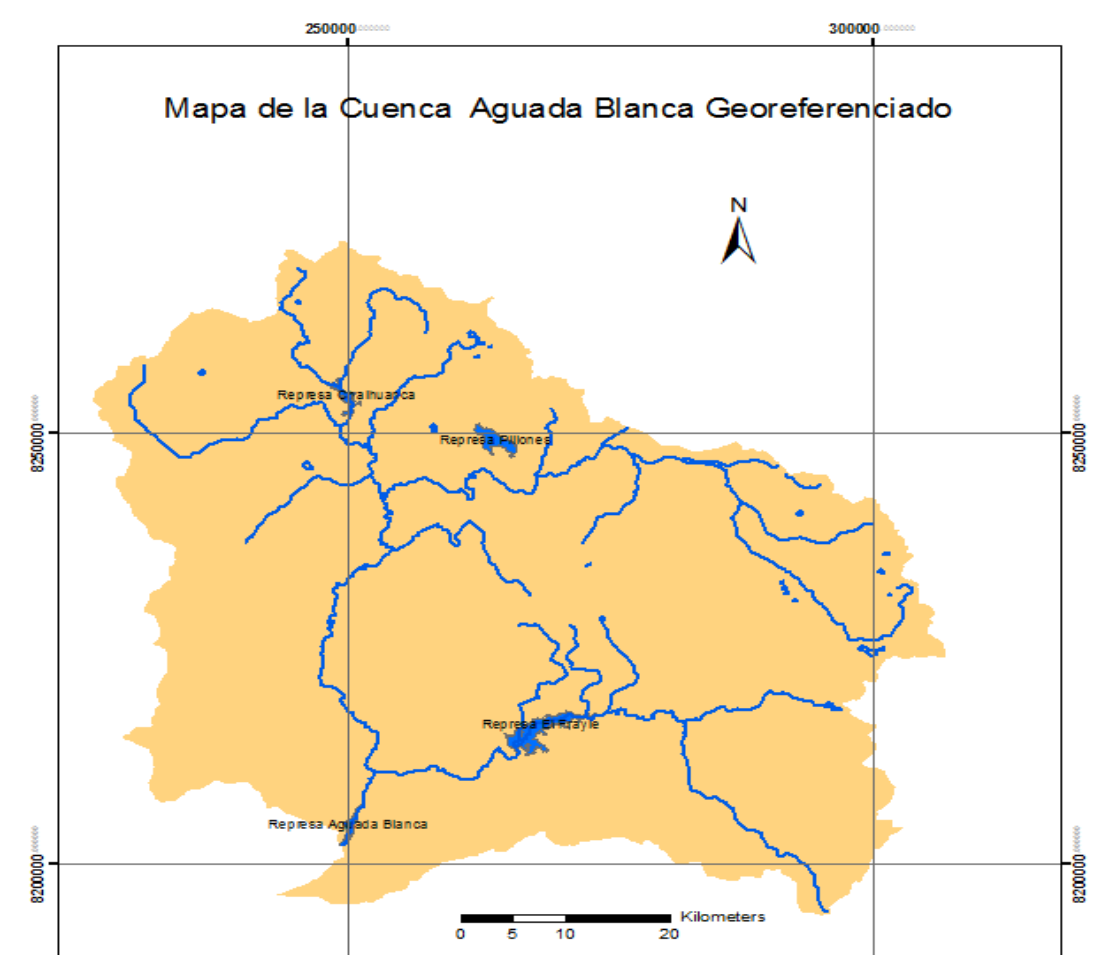


Figura 4: Cuenca Aguada Blanca georeferenciada y embalses

3.2 MATERIALES Y EQUIPOS

Los materiales y equipos utilizados fueron:

- Camioneta – movilidad al ámbito de estudio.
- GPS GARMIN.
- Reglas milimetradas, con precisión de 0.5 mm.
- Lampa.
- Pico, cincel.
- Comba, martillo.
- Bolsas de plástico.
- Etiquetas para muestras de suelo.
- Cilindro de 100 cm³ para densidad aparente.

- Cuchillo especial para toma de muestras de suelo.
- Poncho para la lluvia.
- Marcador spray para ubicación de reglas milimetradas.
- Mapas de ubicación.
- Tablas con formato para levantar información de campo.
- Tablero de campo.
- Lapicero, lápiz.
- Cámara fotográfica.
- Computadora para el procesamiento de información.
- Programa Arc Map 10.3.
- Programa Erdas versión 2014.
- Imágenes satelitales Landsat 7 y 8 de base datos USGS.
- NDVI a partir de imágenes satelitales Landsat 8 (TM 10) y Landsat 7 (TM7).
- Mapa geomorfológico e hidrográfico de la cuenca Quilcai elaborado ONERN -1974.
- Datos de precipitación de la zona de estudio de SENAMHI, PEMS-AUTODEMA.
- Mapas de suelos del ámbito de estudio de INGEMET.
- Cartas geológicas: 33t1, 33t4, 33u4, 32 t, 32u3, 32 u4.
- Curvas de nivel de la carta nacional del IGN, escala: 1/100 000 de zona estudio.
- Levantamiento topográfico y batimétrico del embalse Aguada Blanca por AUTODEMA a través de PRW Ingeniería y Construcción.
- Horno para secado de muestras de suelo.
- Hidrómetro de bouyoucos.
- Probetas, pipetas.
- Recipientes de vidrio para análisis de textura, materia orgánica, densidad aparente.
- Agua destilada.
- Balanza analítica de precisión de tres brazos.
- Termómetro, pHmetro.
- Tamices según norma ASTM – 11/95 para textura suelo.

3.3 METODOS

Los métodos fueron desarrollados bajo una secuencia de procedimientos y técnicas, con los contenidos y metodologías que a continuación se pasa a describir.

3.3.1 Determinación de pérdidas de suelo

Existen diversos procedimientos y métodos para evaluar la tasa de erosión del suelo, pero de todos ellos, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) fue diseñada como una herramienta para planificar la conservación de suelos y es el más aceptado y empleado en todo el mundo para numerosos propósitos de erosión de suelos.

Dada la validez de este método para estimar la pérdida de suelo debido a la acción hídrica, la ecuación USLE ha sido empleada para numerosos propósitos y muy diferentes condiciones, razón por la cual dicho método fue priorizado para el desarrollo de la hipótesis planteada, objetivos y metodología del presente trabajo de investigación; teniendo previsto que los resultados obtenidos fueron contrastados y ajustados con las mediciones efectuadas in situ a través de reglas milimetradas colocadas aleatoriamente en el ámbito de estudio, con el propósito de ofrecer una mayor confiabilidad en los resultados obtenidos.

El trabajo de campo consistió en una serie de procesos, iniciando con un pequeño plan de las actividades de campo y el reconocimiento del área de la cuenca aportante Aguada Blanca; que muestra un territorio agreste, con pendientes muy variadas y pronunciadas, poca vegetación, limitada accesibilidad con vías de transporte en mal estado (trochas usualmente sin mantenimiento), diferentes tipos de suelo, permeabilidad muy variada, estructura de bloque angulares y subangulares y suelos volcánicos.

Se diseñaron y confeccionaron reglas milimetradas para la medición de la pérdida de suelo en la zona de estudio, de material de acero inoxidable con una precisión de 0.05 mm, con un soporte de fierro de forma rectangular que culminaban en punta para facilitar la introducción al suelo y su instalación a una profundidad mayor de 10 cm para su adecuada estabilidad y más de 10 cm en la parte de la superficie para facilitar las mediciones y lecturas de la erosión del suelo (Fig. 5), ubicadas con sus respectivas coordenadas en campo con un GPS GARMIN de buena precisión.



Figura 5: Regla de medición en campo y coordenadas UTM con GPS

Se colocaron 46 reglas milimetradas en campo a inicios del periodo de lluvias de intensidades representativas del 2015. La instalación fue de manera aleatoria y geo referenciadas bajo los criterios de accesibilidad al punto específico de instalación, representatividad del territorio y distribuidos de manera geo espacial (Fig. 6).



Figura 6: Coordenadas UTM de regla milimetrada y medición de erosión, en tormenta

Las evaluaciones se realizaron en 41 reglas (5 fueron sustraídas) en diferentes periodos (antes del periodo de lluvias, culminando este y a inicio del siguiente periodo de lluvias 2016), midiendo con buen nivel de detalle y precisión.

Se efectuaron las evaluaciones de las diferentes tipologías de coberturas vegetales encontradas en campo en el área aledaña a las 41 reglas milimetradas contrastados con los índices del NDVI que fueron procesados de imagen satelital landsat 8 del 2014, para determinar qué especie de cobertura vegetal le corresponde según las características biológicas y físicas de las plantas arbustivas y bofedales encontradas en campo en relación al índice del NDVI mencionado, como se puede visualizar en las Fig. 7 y 8.



Figura 7: Herbazal abierto, sobrepastoreada, R18 (NDVI: 0048 - 0.077)



Figura 8: Pajonal andino, predominancia de tola, R45 (NDVI: 0.116 - 0.18)

Así mismo se realizaron las calicatas (Fig. 9) y el recojo de 30 muestras de suelo representativas para su respectivo análisis en laboratorio de las características de textura, materia orgánica y humedad. También se realizaron evaluaciones in situ y en laboratorio para determinar la densidad aparente y textura, como se puede visualizar en las Fig. 10 y 11.



Figura 9: Calicata para la extracción de la muestra de suelo



Figura 10: Densidad aparente, método cilindro en zona evaluada, R35

Se realizó la calibración del modelo MC78 de las áreas representativas de las 41 reglas instaladas, en base a la erosión total que fueron obtenidas de campo mediante las mediciones

de las diferentes láminas de erosión en cada regla milimetrada indicada. La erosión total corresponde al producto de los diferentes parámetros de lluvia, erodabilidad, topografía y cobertura vegetal del modelo y validada con las mediciones de erosión respectivas obtenidas de las diferentes evaluaciones de campo.



Figura 11: Medición de limo y arcilla por el método del hidrómetro de Bouyucos

Para la determinación de la pérdida de suelo por el método USLE fue necesario determinar, primeramente en campo los coeficientes del factor de R, LS, K y C, que se describe a continuación y luego mediante el producto de los mismos y con la superposición de los 4 mapas base se obtuvo la pérdida de suelo de manera geoespacial.

a. Factor lluvia o índice de erosividad pluvial (R)

El factor R, de la USLE, se determinó inicialmente mediante las ecuaciones de Roose (1995), Foster y Morgan (1974), a partir de la información de precipitación obtenida en los registros mensuales de lluvia registrados en las estaciones meteorológicas que se ubican en el área de estudio (aguas arriba del embalse de Aguada Blanca) y con intensidades sugeridas de $I_{30} = 75$ mm/hr (información de intensidades de al menos 5 años no se encontró en el área de estudio) que no se ajustaron adecuadamente a las condiciones de campo de la cuenca aportante.

Por lo tanto, este factor se determinó en base a la ecuación sugerida por ICONA (1988a), denominada ecuación modificada de Fournier, que obtuvo el factor de la erosividad de la lluvia (factor R) que correlaciona con el índice de agresividad climática F de Fournier,

ajustándose mejor a las mediciones de erosión realizadas en campo que los valores obtenidos con las ecuaciones probadas inicialmente, resumida en la siguiente ecuación de suma relevancia para el modelo.

$$R = 2.56 F^{1.065}$$

$$F = \frac{1}{n} \sum \frac{pi^2}{Pi}$$

Donde:

R = factor lluvia

pi = precipitación del mes más lluvioso del año i (mm)

Pi = precipitación total anual del año i (mm).

Por segunda vez se obtuvo el factor R mediante el ajuste de la ecuación de Fournier (la primera por ICONA (1988a)). En esta ocasión con el factor 1.05, según las mediciones de erosión en campo realizadas con reglas milimetradas y en base a la serie hidrológica de 51 años (1964-2015) de cinco estaciones meteorológicas en el ámbito de estudio (Aguada Blanca, Pampa Arrieros, Frayle, Imata y Pañe), resultando la siguiente ecuación ajustada.

$$R = 2.688 F^{1.065}$$

Se alcanzó una correlación consistente entre la precipitación (Pi) y el factor de lluvia (R), conseguidas por el relacionamiento de la precipitación promedio anual de su serie hidrológica (51 años) de las cinco estaciones base indicadas y el factor R de la ecuación ajustada, en base a los datos descritos en el Cuadro 10.

Cuadro 10: Precipitación promedio anual de estaciones base y factor R

Estación meteorológica	Precip. promedio anual (mm)	Factor R
Aguada Blanca	255.2	135.2
Pampa Arrieros	234.8	132.4
Frayle	308.8	143.1
Imata	525.8	181.8
Pañe	717.2	215.0

FUENTE: Elaboración propia.

Reportando una ecuación lineal consistente con un alto coeficiente de correlación $r^2 = 0.99$

$$R = 0.1727 P + 90.969$$

La ecuación validada fue aplicada en el presente trabajo de investigación con la información de precipitación obtenida en los registros diarios de lluvias de la serie hidrología de 1964 - 2014, obteniendo los promedios mensuales, la precipitación del mes más lluvioso y la precipitación total anual de la serie referida en las cinco estaciones meteorológicas (Pampa de Arrieros, Pillones, Frayle, Imata y Pañe) que se ubican en el área de estudio, excepto el Pañe (zona aledaña, transvase al área aportante del embalse Aguada Blanca).

En el ANEXO 1 se presenta la data de estaciones base del factor R.

b. Factor geomorfológico o topográfico (LS)

El factor LS es producto de los subfactores longitud (L) y pendiente (S) del terreno. La pérdida de suelo se incrementa conforme la longitud crece y con la inclinación de la pendiente.

Existen diferentes expresiones matemáticas para su cálculo; sin embargo, un procedimiento válido de cálculo con respaldo acreditado es el utilizado por la Facultad de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes (Madrid), que consiste en asignar directamente a una ladera el valor del factor LS en función de la pendiente, el mismo que fue utilizado en el modelamiento geoespacial, según el grupo de pendientes encontradas en el Modelo Digital de Elevación (DEM) en el ámbito de estudio.

Los valores asignados del factor topográfico LS del área de estudio se ajustaron bien a las condiciones de campo y estas variaron significativamente desde 0.3 hasta 28.5 en las pequeñas unidades de análisis del DEM, por los cambios bruscos que presenta la topografía, con las pendientes muy pronunciadas, variables y el relieve agreste del territorio de la cuenca, en razón de las diferentes montañas jóvenes que se pueden visualizar principalmente por la presencia de la cordillera de Los Andes en el área de estudio.

c. Factor de erodabilidad del suelo (K)

Para la determinación de los coeficientes de la erodabilidad del suelo (factor K) se realizó una serie de pasos, partiendo de los análisis de suelo en la zona de estudio en base a la metodología del nomograma de Wischmeier y la erodabilidad en grupo de suelos y rangos

establecidos por Paez y Pla (1985) y posteriormente se corroboró con correlaciones que demuestran que dichos coeficientes son consistentes, con el fin de bajar la incertidumbre y variables en la ecuación USLE.

El primer paso fue la revisión de la erodabilidad (K) determinado mediante el nomograma adaptado desde Wischmeier y Smith (1978), que combina el efecto del tamaño de las partículas, porcentaje de materia orgánica, textura, estructura de suelo y clase de permeabilidad. Asimismo se revisó y analizó el grupo de suelos para los diferentes índices de erodabilidad desarrollado por Paez y Pla (1985), en base a las características y propiedades del suelo, tomando en cuenta el índice de separabilidad (Ss), índice de sellado (Ks), índice de escorrentía (Lesc), diámetro medio de los agregados tamizados en agua (DMP) y el porcentaje de agregación (Ag).

El segundo proceso consistió en la determinación del factor K, específicamente en la zona de análisis, según la metodología del nomograma para la obtención de la erodabilidad del suelo adaptada por Wischmeier y Smith (1978); en función a los análisis del suelo de los diferentes puntos del ámbito de estudio, realizado en laboratorio con los parámetros de la clase textural, materia orgánica, estructura y permeabilidad; pasando a su descripción de algunos de los procesos referidos con valores muy diferenciados que se presentan.

En la Fig. 12 se puede visualizar la determinación del factor de erodabilidad K de un suelo arenoso de alta permeabilidad con el valor de 0.17 para la superficie del polígono representativo del costado de la regla N° 27, en función al resultado del nomograma referido con los valores de los parámetros de 19.53 por ciento de limo + arena muy fina, 79.91 por ciento arena gruesa, 0.67 por ciento de materia orgánica, estructura bloques nivel 4 (equivalente grano simple) y permeabilidad rápida nivel 1.

Con metodología similar se determinó el factor de erodabilidad K con el valor de 0.60 de un suelo franco limoso, para la superficie del polígono representativo de la regla N° 32, en función al resultado de los parámetros de análisis de suelos; con los valores de 66.16 por ciento de limo + arena muy fina, 28.28 por ciento arena gruesa, 0.67 por ciento de materia orgánica, estructura bloques angulares (nivel 4) y permeabilidad lenta a moderada (nivel 4), señalando el proceso con líneas en nomograma (Fig. 13).

El tercer paso fue relevante y consistió en determinar los coeficientes del factor K ponderados para los diferentes tipos de suelo del ámbito de estudio, en función a los resultados de los coeficientes de los análisis de suelos indicados en anterior paso y la calibración de la erosión del modelo en base a la erosión encontrada en campo, tomando como referencia los índices del nomograma de Wischmeier y Smith (1978) y Paez y Pla (1985); obteniendo coeficientes del factor K con la debida consistencia porque cada uno de ellos se respaldan en los coeficientes de correlación superiores al 80 por ciento.

Finalmente, se realizó la descripción del coeficiente del factor K en función al prototipo de suelo analizado en laboratorio y evaluación realizada en campo, según los índices alcanzados.

Determinación del coeficiente K para suelos inestables, con desprendimiento de masas, textura muy fina con alta proporción de limo + arena muy fina (más del 60 por ciento) y muy lenta permeabilidad según nomograma (6) por la rápida reducción de la conductividad hidráulica, bajo contenido de materia orgánica y gran capacidad de escurrimiento y erodabilidad.

Determinación del coeficiente K para suelos de textura fina a media que predominan las arenas muy finas y limos (50-60 por ciento), suelos de lenta permeabilidad (5), con bajo contenido de materia orgánica y con alta capacidad de escurrimiento y erodabilidad.

Determinación del coeficiente K para suelos medianamente estables, textura mediana (franco arenosos, francos) con menos contenido de limo y arena muy fina, tamaño irregular de las partículas de mayor tamaño dificulta el sellado de la superficie, muestran un comportamiento intermedio con suelos semiestables con una permeabilidad de lenta a moderada (4).

Valor del coeficiente K para suelos estables, de textura media a gruesa (franco arenoso-arenoso) con mayor cantidad de arcilla que los suelos anteriores, con mayor estabilidad de los agregados y una mayor cohesión de las partículas por la presencia de minerales de tipo 2:1 de alta superficie específica, con una adecuada permeabilidad de moderada a rápida que disminuye la escorrentía superficial e incrementa la infiltración.

Determinación del coeficiente K para suelos estables, de buena estabilidad estructural y textura gruesa (grava y arena franca), con rápida permeabilidad (1) que disminuye la escorrentía superficial por efecto del índice de erosividad pluvial y con gran capacidad de infiltración (suelos volcánicos).

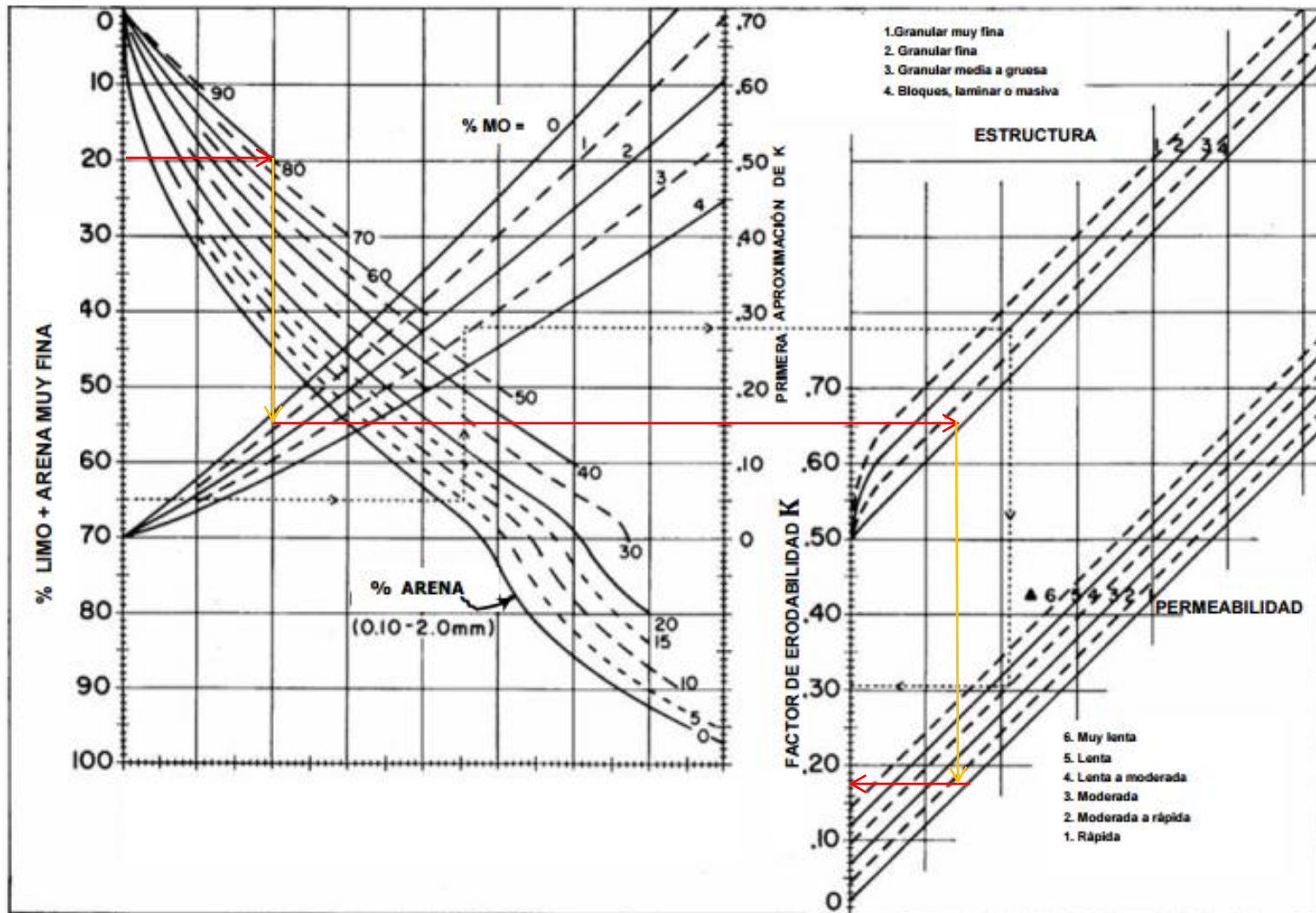


Figura 12: Factor erodabilidad_R27

FUENTE: Elaboración propia en base al Nomograma de Wischmeier y Smith, 1978.

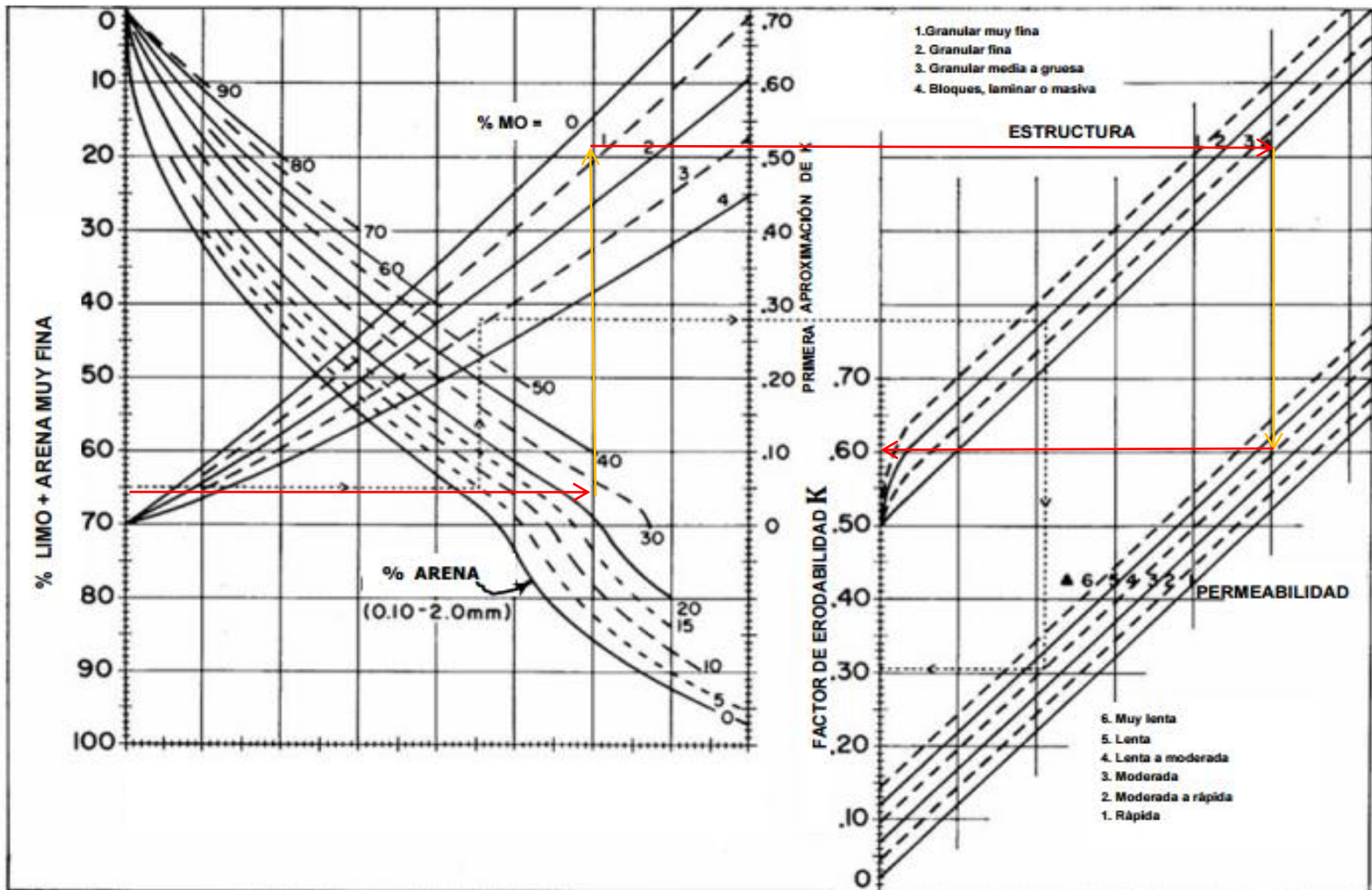


Figura 13: Factor erodabilidad_R32

FUENTE: Elaboración propia, en base al Nomograma de Wischmeier y Smith, 1978.

Se asignó el valor $K=0$ para cuerpos de agua (lagunas, embalses, ríos, manantiales, otros), ya que no existe erosión de suelos en el agua.

En el ANEXO 2 se presentan análisis de suelo y determinación del factor K.

d. Factor cobertura vegetal (C)

Este factor C varía de 0 a 1 y está en función de los parámetros: protección contra erosión; clase y porcentaje de cobertura vegetal encontrada en campo, siendo uno de los aspectos más relevantes para contrarrestar la erosión de suelos en el ámbito de estudio, más aún en zonas desérticas, como muestra la tendencia de la cuenca aportante de Aguada Blanca.

Los coeficientes del factor C se determinaron según la cobertura distribuida en campo de manera geoespacial, apoyadas con la metodología índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y con una serie de procesos adicionales, partiendo de los respectivos mapas digitales de cobertura vegetal que fueron desarrollados en base a imágenes satelitales Landsat del área de estudio en el 2014, hasta obtener los coeficientes del factor C en base a evaluaciones realizadas en campo.

En el presente trabajo de investigación inicialmente se usaron los valores de la tabla publicada por Wischmeier (1978), que definen valores de C para los tipos más comunes de coberturas vegetales según investigaciones realizadas en otros ámbitos (Cuadro7). Estos valores fueron ajustados según mediciones de erosión realizadas con reglas milimetradas instaladas en campo para tal fin; sin embargo, no se encontraron valores para muchas de las coberturas vegetales evaluadas en campo como asociación Calamagrostis - Stipa (ichu), *Parastrephia lepidophylla* (tola), azorella compactada (yareta), turbera (bofedal) o predominancia *Distichia muscoides*, siendo una de las razones para aplicar la metodología del NDVI referido.

Se consideró pertinente apoyarse de la metodología del NDVI para discretizar mejor y tener los índices del NDVI de la cobertura vegetal en campo según su firma espectral y relacionarlos con los coeficientes del factor C para una mejor consistencia, las mismas que fueron bajadas de imágenes satelital Landsat 8 del año 2014 y Landsat 7 del 2001, para ver el cambio de la cobertura vegetal en el tiempo en la zona de estudio.

Se efectuó el proceso para obtener el NDVI, en base a la imagen satelital Landsat TM 10 descargada de la base de datos USGS del año 2014 que se encontraba disponible, procediendo

con la combinación de las bandas correspondientes en el área de trabajo para reportar los índices del NDVI para los diferentes tipos de cobertura vegetal existentes de la imagen satelital que fue capturada, realizando el proceso referido con apoyo del programa ERDAS.

Se procedió a la relación de los índices del NDVI, obtenidos en el paso anterior, con las coberturas vegetales encontradas en campo, específicamente en los puntos donde fueron instaladas las reglas milimetradas que se colocaron para medir el proceso erosivo y también para evaluar los tipos de cobertura; resumiendo la cubierta representativa encontrada en campo con los NDVI reportados en el proceso indicado, resumidos en Cuadro 11.

Cuadro 11: Índice del NDVI y su relación con cubierta vegetal

NDVI	Cubierta representativa en campo
(-0.2964) - (-0.02)	Cuerpos de agua
(-0.02) - 0048	Cubierta inapreciable
0048 - 0.077	Herbázar abierto sobrepastoreada, predomina <i>Tetraglochim cristatum</i> (Canlly)
0.077 - 0.116	Pajonal andino, predominancia de <i>Calamagrostis</i> - <i>Stipa</i> (Ichu)
0.116 - 0.18	Pajonal Andino, predominancia de <i>Parastrephia lepidophylla</i> (Tola) pradera herbácea medianamente densa
0.18 - 0.28	Pajonal andino, predominancia de gramíneas y gramíoides (césped). Pradera herbácea densa.
0.28 - 0.5247	Turbera (bofedales), predomina <i>Distichia muscoides</i>

FUENTE: Elaboración propia.

Se asignó el factor C en función al tipo de cobertura vegetal en el mapa correspondiente, para las coberturas representativas que fueron visualizados en los puntos donde fueron instaladas las reglas señaladas, partiendo de la evaluación de coberturas en campo y contrastados con los índices del NDVI descritos (Fig. 14).

Posteriormente, se realizó la validación de los índices del factor C, mediante la evaluación de los valores obtenidos del modelo y contrastado con la erosión obtenida en campo en base a la ecuación del USLE ($E = R * LS * K * C$), específicamente en los puntos de las reglas milimetradas

instaladas según el tipo de coberturas vegetal encontrado en campo; logrando luego del proceso de calibración una buena confiabilidad con coeficientes de correlaciones altos $r^2 > 0.8$.



Figura 14: Evaluación en campo de coberturas vegetales

En el ANEXO 3 se observan las fotos de evaluación de cubierta vegetal y suelos en campo.

e. Factor de prácticas de conservación (P)

Este factor representa la proporción de pérdida de suelo con prácticas de conservación (cultivos en contorno, barreras vivas, etc) y se determinó según evaluación efectuada en campo. No se encontraron prácticas de conservación representativas y las existentes se consideró a través del índice de cobertura vegetal que fue obtenida por la metodología del NDVI, por lo cual se le asignó el valor del factor $P = 1$. Cabe precisar que en la zona de Chalhuanca existen prácticas de conservación que se tomaron en cuenta para la propuesta del modelo prospectivo para mitigar la erosión y por ende la colmatación del embalse de Aguada Blanca, incluyendo prácticas de conservación en base a la cobertura vegetal referente encontrada en campo.

Por lo tanto, no se consideró el factor de prácticas de conservación en la situación retrospectiva, por lo cual el mapa final de erosión del suelo de talante geoespacial en cualquier punto de la cuenca aportante de Aguada Blanca, es el determinado por el producto de los cuatro factores referidos (R, LS, K y C), en sus correspondientes shape file.

3.3.2 Sedimentación en el embalse Aguada Blanca

Se recopiló y analizó la información existente de las batimetrías ejecutadas el 2002 por EGASA y el 2009 por AUTODEMA y del estudio del levantamiento topográfico y batimétrico del embalse de Aguada Blanca, realizado el 2015 por AUTODEMA, a través de la empresa PRW Ingeniería y Construcción. Las batimetrías en el 2009 y 2015 del embalse Aguada Blanca se realizaron con la tecnología ecosonda (DGPS diferencial, software, otros) que muestran alta precisión y confiabilidad en la determinación de sedimentos.

EGASA (2003), informó que, como resultado de la batimetría efectuada en el embalse Aguada Blanca el 2002, se había reducido su volumen útil a 30.20 MMC. Considerando que el volumen de diseño a la cota del nivel máximo de operación (3666) era de 43.52 MMC.

PEMS-AUTODEMA del Gobierno Regional de Arequipa en el 2015, realizó un estudio del levantamiento topográfico y batimétrico del embalse Aguada Blanca, obteniendo un valor de 31'654,441.0 m³ del volumen total y un volumen útil de 25'164,068.20 m³ (Cuadro 12).

Cuadro 12: Comparación de volúmenes en el embalse Aguada Blanca

Descripción	Elevación m.sn.m	Volumen 1985-1986 (MMC)	Volumen 2002 (MMC)	Volumen 2015 (MMC)
NAME	3,668.50	49.64	37.03	31.65
NAMO	3,666.00	43.52	31.09	25.66
NAMI	3,642.00	5.32	0.65	0.49

FUENTE: PEMS-AUTODEMA, 2015

En un primer escenario retrospectivo se desarrolló en el ámbito de estudio una relación de la pérdida de suelos y sedimentación según la operación de los embalses del 2002 al 2015, luego se proyectó su sedimentación en condiciones similares y cuánto le resta de vida útil de operación con el 75 por ciento de su volumen útil de agua en dicho embalse (volumen entre la cota del NAMO y NAMI).

En un segundo escenario prospectivo se analizó la erosión y sedimentación incorporando prácticas de conservación de suelos a través de cobertura vegetal instalada en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca y se estimó el tiempo de vida útil del embalse que le resta operando según el diseño del embalse.

Se analizó la erosión del suelo de la cuenca aportante y la sedimentación que llega al embalse de Aguada Blanca en ambos escenarios referidos; comparando los resultados de erosión, sedimentación y sus implicancias en la operación y mantenimiento del embalse mencionado con las recomendaciones pertinentes.

En el ANEXO 4 se presenta la batimetría del embalse Aguada Blanca.

3.3.3 Superposición de mapas del modelamiento

a. Mapa de isoyetas

El mapa base de isoyetas, que representa los niveles de precipitación en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca, se obtuvo con una serie de pasos desde la revisión de la información y completación de la base de datos de precipitación en los diferentes pisos altitudinales en la cuenca hasta obtener el mapa de isoyetas con su tabla de atributos alfanumérica.

En el primer paso se revisó la información de precipitación existente en el ámbito de estudio y zonas aledañas, encontrando 9 estaciones base con información completa, las mismas que manifiestan una consistente correlación lineal entre altitud y precipitación respaldada en un coeficiente de correlación adecuado de $r^2 = 0.89$ y resumida en la ecuación:

$$P_i = 0.2947 h_i - 827.97$$

Donde:

P_i = precipitación en el punto de análisis (mm)

h_i = altitud en el punto de análisis (m.s.n.m)

El segundo paso consistió en la generación de 150 puntos con su precipitación respectiva (z) para una mejor interpolación, tomando como referencia las nueve estaciones meteorológicas base, distribuidas en los diferentes pisos altitudinales en el ámbito de la cuenca Aguada Blanca, comprendiendo sus coordenadas UTM datum WGS-84 y altitud; apoyados del modelo digital de elevación del terreno (MDT) con las curvas de nivel cada 50 m en el programa Arc Gis para asignar, en la tabla de atributos, las coordenadas de cada uno de los 159 puntos de manera geoespacial, como se puede visualizar en Fig. 15.

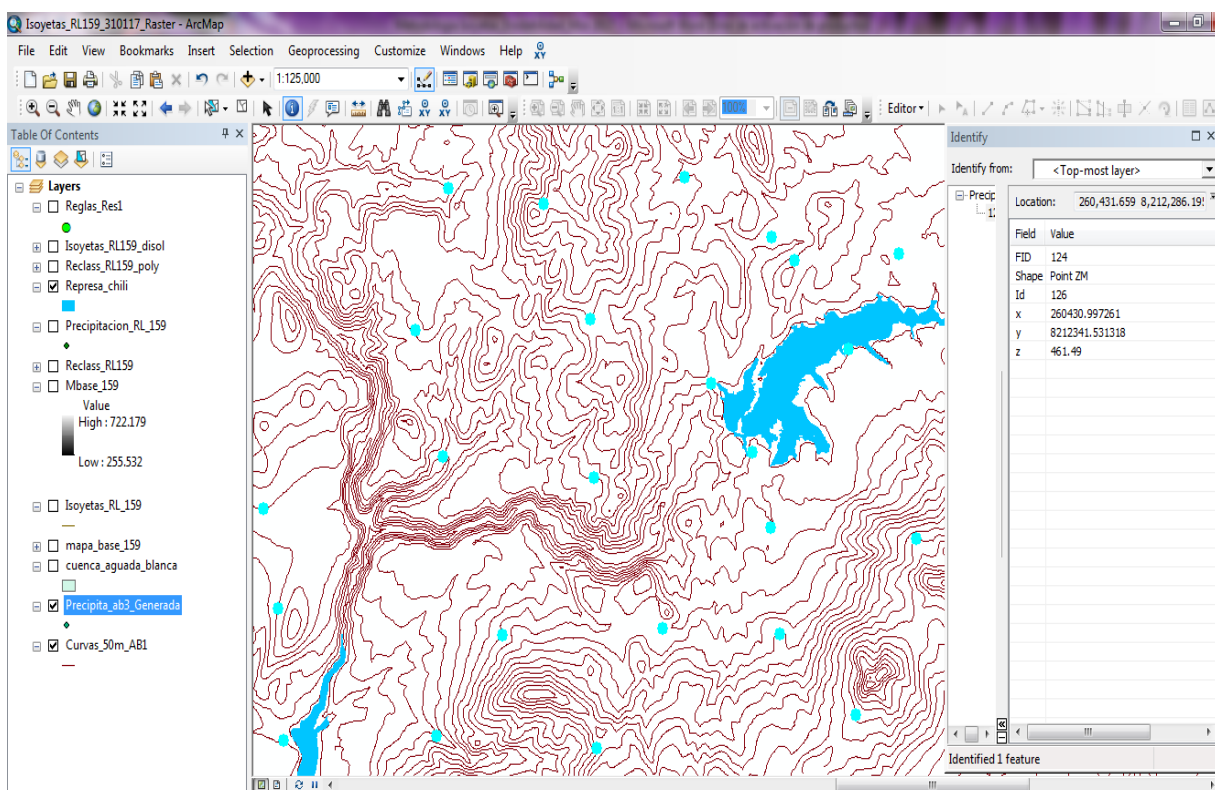


Figura 15: Isoyetas con coordenadas UTM en los 159 puntos

El siguiente proceso fue completar los atributos, primero importando las coordenadas UTM referidas a una tabla del tipo dbase table para ser completada la tabla en excel, con la precipitación (z), en función a la altitud de la correlación lineal y las coordenadas indicadas (x, y) y luego ser importadas desde Arcgis mediante el atributo *file/Add Data/Add XY Data*.

El cuarto paso consistió en realizar la interpolación para encontrar las isoyetas en base a los 159 puntos georeferenciados en el ámbito de la cuenca Aguada Blanca, generando el mapa base de las isoyetas del tipo raster denominado *mapa_base_159*, apoyados de la herramienta *Arctollbox/3D Analyst Tools/ Raster Interpolation/Spline* y luego se realizó la interpolación de las curvas de precipitación cada 25 mm mediante la herramienta *Arctollbox/3D Analyst Tools/Raster Surface/Contour* para encontrar las curvas de las isoyetas de manera longitudinal obteniendo el *shape file* *Isoyetas_RL_159*, visualizándose el proceso descrito en la Fig. 16.

El siguiente proceso radicó en reclasificar las isoyetas cada 50 mm desde 300 mm a 750 mm para obtener las isoyetas de manera geoespacial en cualquier punto de la cuenca incluyendo la superficie entre dos curvas de isoyetas que con la herramienta *Surface/Contour* solo fue lineal, reportando 10 clases en formato raster.

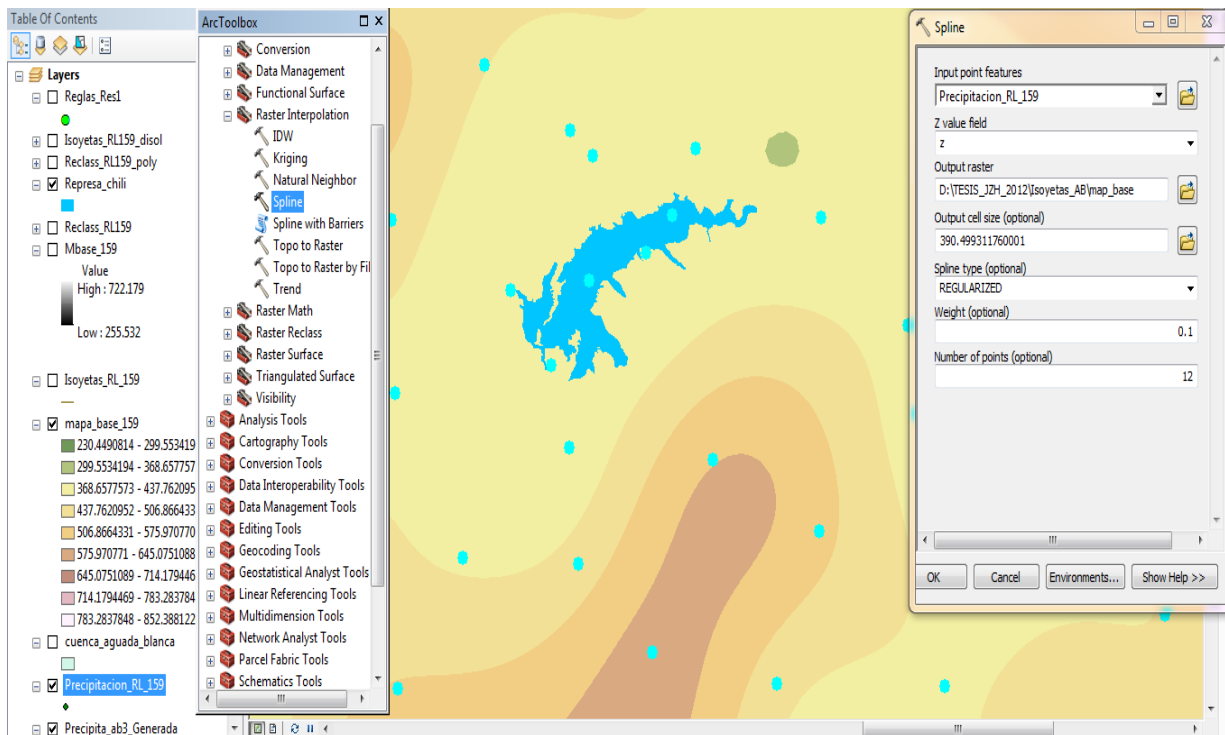


Figura 16: Isoyetas, haciendo uso herramienta *raster interpolation/Spline*

El sexto paso fue la conversión de las isoyetas de formato raster a polígono en formato *Shapefile*, generando 34 polígonos, para homogenizar los diferentes formatos a *Shapefile Feature Class* en el Arc Gis.

El siguiente proceso consistió en agrupar en 10 polígonos todos los polígonos generados (34) en anterior paso, con las isoyetas correspondientes. Luego se procedió a completar la tabla de atributos con las isoyetas cada 50 mm, desde la isoyeta 250 mm hasta los 600 mm, según la superficie correspondiente apoyados del *shape file* Isoyetas_RL_159, apuntalados del proceso *Geoprocessing/Dissolve*; quedando el mapa final de isoyetas (isoyetas_RL159_disol) de manera geoespacial en el ámbito de estudio en la Fig.17.

En una segunda etapa se obtuvo el factor de lluvia o índice de erosividad pluvial R, mediante la ecuación ajustada de Fournier ($R = 2.688 F^{1.065}$), que concertó muy bien las condiciones de erosión obtenidas en campo según las mediciones realizadas con las reglas milimetradas instaladas para tal fin, teniendo presente que las ecuaciones probadas inicialmente por Roose (1995), Foster y Morgan (1974) no se ajustaron adecuadamente a las erosiones medidas en campo (metodología que fue ampliada en ítem 3.3.1,a del factor de lluvia R).

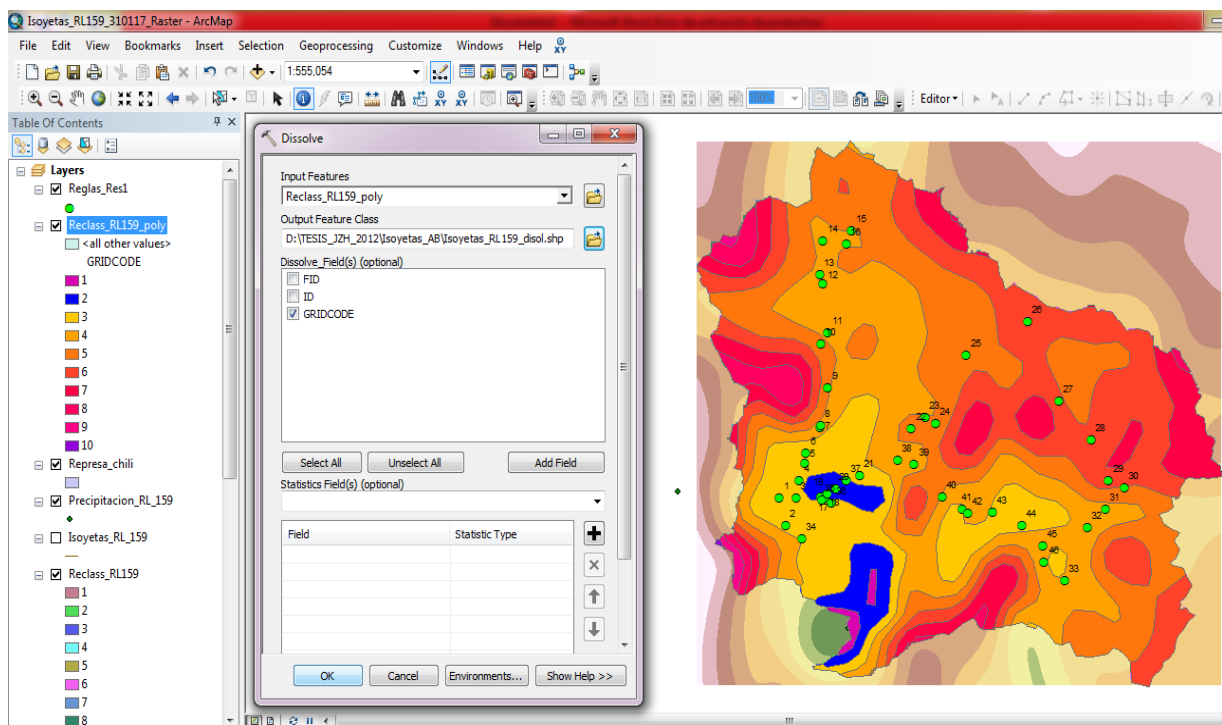


Figura 17: Isoyetas, agrupando en estratos, proceso del Dissolve

En base a dicha ecuación ajustada de Fournier se obtuvieron los resultados del factor R para el modelo geoespacial de la cuenca aportante Aguada Blanca, los mismos que se digitalizaron en la tabla de atributos del mapa de isoyetas con su tabla alfanumérica.

En el ANEXO 5, se puede ver la información de precipitación generada en función a la altitud.

b. Mapa de pendientes

El mapa de pendientes que contiene los coeficientes del factor LS en formato *shape file* se obtuvo en Arc Gis a partir de imagen satelital del ámbito de la cuenca Chili, bajada de imágenes Landsat en formato Raster, luego de una secuencia de cinco pasos.

El primero paso consistió en precisar el área de estudio mediante la herramienta *Arctoolbox*, haciendo un corte de la imagen satelital referida con el área de estudio (cuenca aportante del embalse Aguada Blanca) con el comando *acortar* ubicado en la *Data Management Tools/Raster Processing/Clip*, obteniendo el mapa del área de estudio en formato raster.

El segundo proceso radicó en hacer el mapa de pendientes en formato raster, con el atributo pendiente de la superficie de la tierra (*slope*) ubicado en *Arctoolbox/3D Analyst Tools/Raster Surface/Slope*, obteniendo pendientes entre 0 y 223 por ciento, en formato raster (Fig. 18).

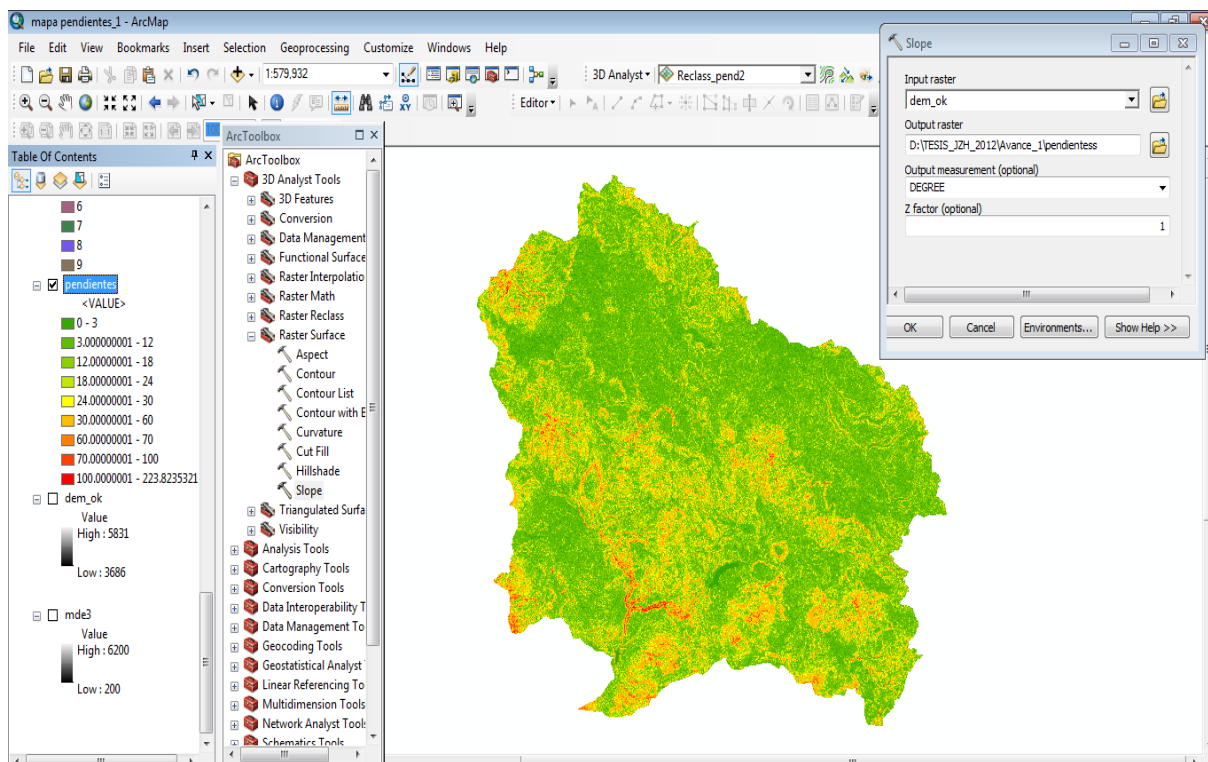


Figura 18: Pendientes en formato raster, proceso Slope

En el tercer paso se desarrolló la reclasificación del mapa de pendientes en nueve rangos desde 0 hasta más del 100 por ciento, mediante el atributo Reclasificar ubicado en *Arctoolboox/3D Analyst Tools/Raster Reclass/Reclassify*, obteniendo el mapa de pendientes reclasificado en 9 grupos, tal como revela la Fig. 19.

El cuarto paso consistió en pasar el mapa de pendientes de formato raster a polígono en formato *Shapefile*, mediante el atributo convertir raster a polígono ubicado en *Arctoolboox/Conversion Tools/From Raster/Raster to Polygon*, obteniendo el mapa de pendientes en formato referido.

El último proceso gravitó en disolver capas y agrupar en función a los nueve grupos de pendientes (0-3 hasta más de 100 por ciento) a través del atributo disolver que se ubica en *Geoprocessing/Dissolve*, obteniendo el mapa de pendientes, visualizado en la Fig. 20.

Asimismo en dicho mapa de pendientes en su tabla alfanumérica se adicionaron dos campos, el primero concerniente al grupo de pendientes referidas y el segundo campo con los índices del factor LS.

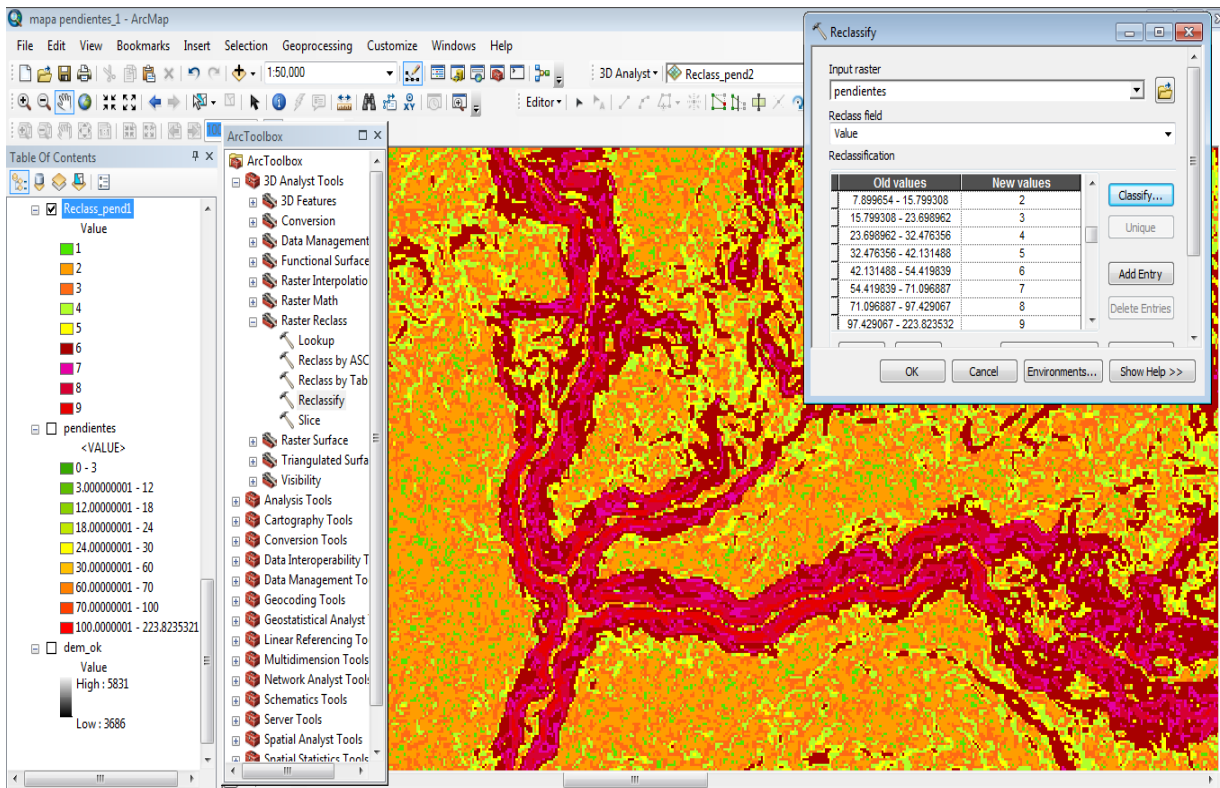


Figura 19: Pendiente reclasificado en 9 rangos, proceso Reclassify

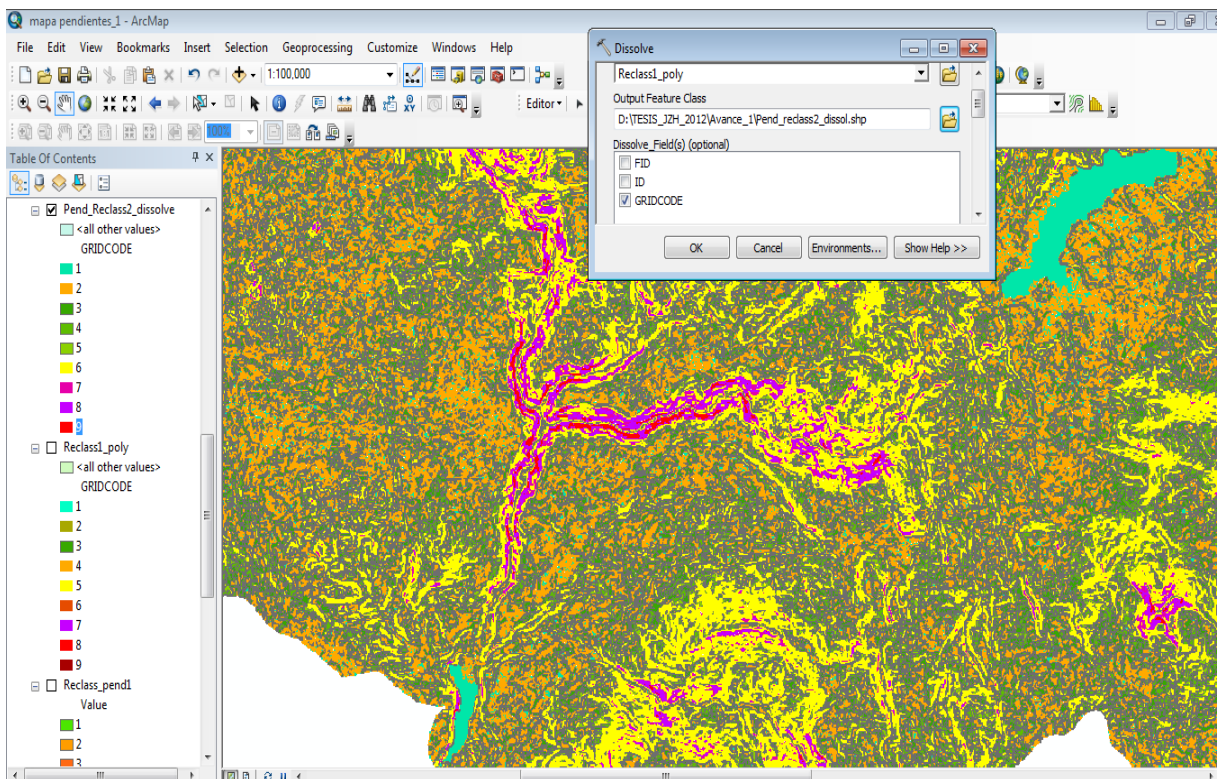


Figura 20: Pendientes en formato shape file, proceso Dissolve

c. Mapa de erosionabilidad

El mapa de erosionabilidad se obtuvo con una serie de procesos, desde la recopilación de información existente al respecto, unión de cartas geológicas georeferenciadas, mapeo de polígonos de diferentes tipos de suelo, determinación de coeficientes del factor K hasta la determinación del mapa de erosionabilidad basados en los mapas existentes de geológica, geomorfología y análisis de suelo en laboratorio y la erosión medida en campo.

El primer proceso fue la revisión de información existente de suelos en el ámbito de estudio, encontrando la información relevante de las cartas geológicas del ámbito de estudio y el Inventario, evaluación y uso racional de los recursos naturales de la cuenca Quilca - Chili elaborado por la ONERN (1974), que se consideró pertinente su actualización por los años transcurridos y porque contenía el mapa de geomorfología, hidrográfico y la erosionabilidad en formato *Shape file* de manera general a gran escala según evaluación.

Luego se unieron seis cartas geológicas (32t, 32u3, 32u4, 33t1, 33t4 y 33u4) en el ámbito de estudio, apoyados del instrumento *Geoprocessing/Unión* y complementado con la ubicación de las reglas instaladas en campo y georeferenciadas.

El tercer proceso, considerado uno de los más relevantes, fue actualizar el mapa de erosionabilidad del suelo realizado por la ONERN (1974), de manera más detallada y a una escala mayor en base al mapa geológico descrito en anterior paso y los análisis de suelo que se realizaron en 30 puntos de las 46 reglas instaladas en campo y distribuidos en zonas con características diferente de textura, estructura del suelo y acceso; pasando luego al mapeo de los puntos referidos apoyados de la herramienta *Editar/Start Editing* y *Edit Vertices en Arcgis*.

Se plasmó la delimitación del polígono representativo de la muestra ubicada al costado de la regla R13 (zona bofedal predomina *Distichia muscoides*), cuyos resultados de análisis muestran una clase textural franco arenoso, con alto contenido de materia orgánica (25.17 por ciento), alta permeabilidad y densidad aparente baja (0.55 g/cm^3) por ser una turbera (bofedal). La edición de los vértices del polígono referido fue basado en el mapa de suelos caracterizado como N-ca y mapa geomorfológico – hidrográfico referido (Fig. 21).

Mapeo del polígono representativo de la muestra de suelo sacada del costado de la regla N° 32 (material volcánico limoso), analizada en laboratorio presenta una clase textural franco limoso con el 43.72 por ciento de arena, 50.72 por ciento limo y 5.56 por ciento arcilla, materia

orgánica muy pobre (0.67 por ciento), estructura granular, permeabilidad rápida y densidad aparente de 1.39 g/cm^3 ; mapeando la linderación del polígono representativo de dicha muestra con las características similares de suelo según el mapa geológico cuya clasificación es N-ca y con diferencia al mapa geomorfológico - fisiográfico de la ONERN, completando inmediatamente los atributos de su tabla (Fig. 22).

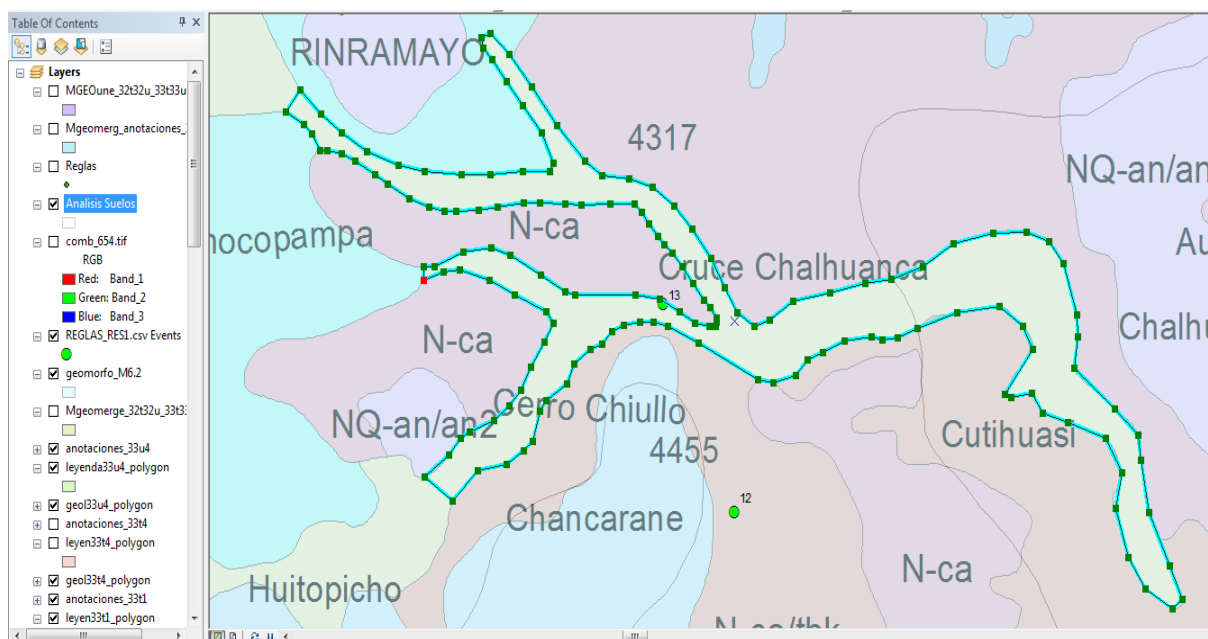


Figura 21: Delimitación del polígono R13, con mapa geológico y geomorfológico

El cuarto proceso consistió en la determinación del factor K, específicamente en la zona de análisis, según la metodología del nomograma para la determinación de la erodabilidad del suelo adaptada por Wischmeier y Smith (1978); en función a los análisis de suelos de los diferentes puntos del ámbito de estudio, realizado en laboratorio, con los parámetros de clase textural, materia orgánica, estructura y permeabilidad; ampliada la descripción y determinación de los coeficientes del factor K, en la metodología detallada en el ítem 3.3.1,C.

Se completó la tabla de atributos del mapeo realizado para la actualización del mapa de erosionabilidad, con una serie de campos, entre los principales la edición del factor K en base a coeficientes y análisis de suelo ejecutados en polígonos específicos; mostrando la edición de algunos coeficientes referidos en el mapa final de erosionabilidad (Fig. 23).

En el ANEXO 6 se presenta la delimitación de polígonos del mapa de erosionabilidad.

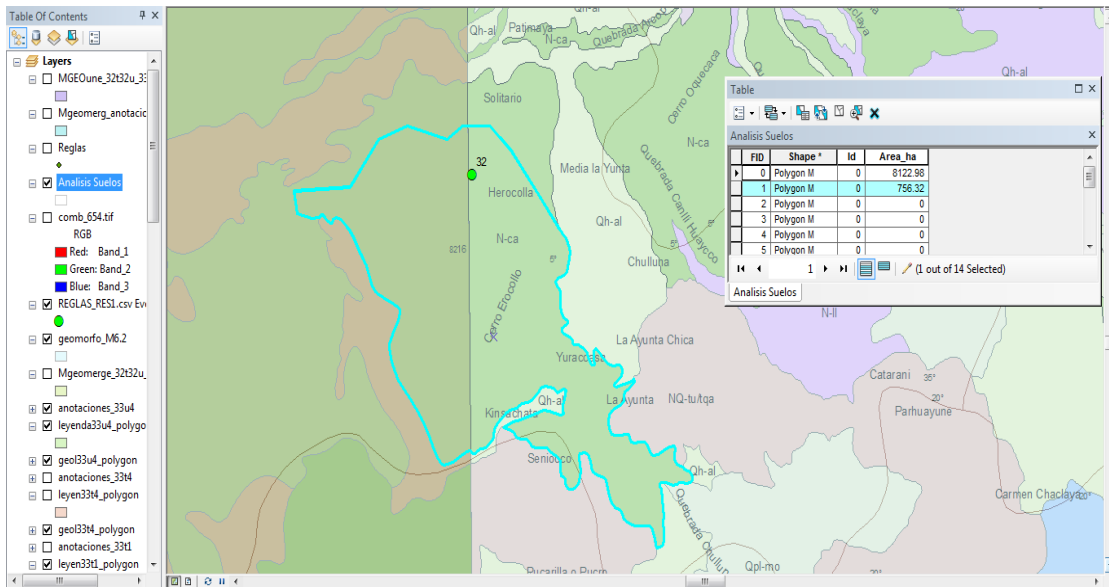


Figura 22: Delimitación del polígono R32 con mapa geológico y geomorfológico

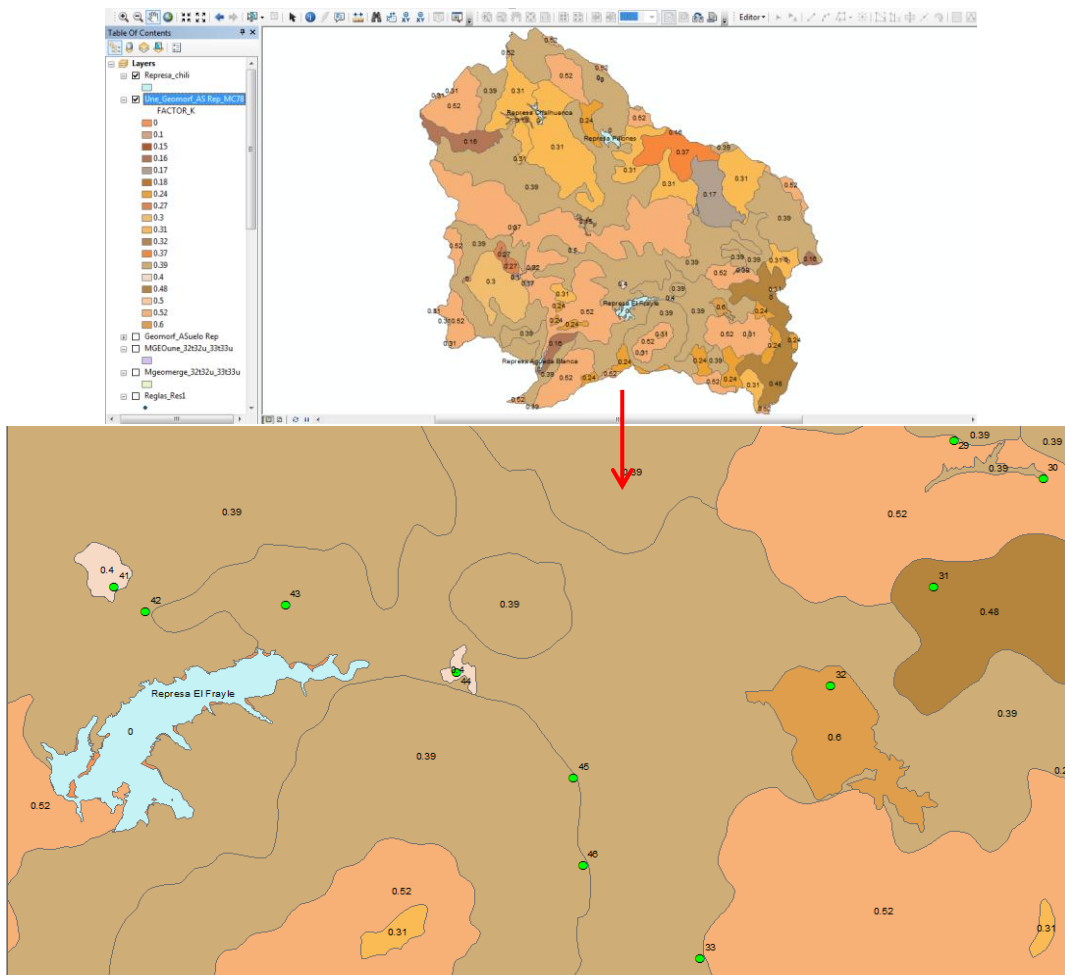


Figura 23: Erosionabilidad, con los diferentes polígonos y coeficientes de F-K

d. Mapa de cobertura vegetal

El mapa de cobertura vegetal, identificado con sus diferentes atributos o unidades cartográficas, es fundamental para determinar los procesos erosivos en la cuenca, y para ello se ha realizado una serie de pasos metodológicos para el análisis temático y cartografiado, partiendo de la revisión de información existente. Luego del análisis de imágenes de satélite, se realizó la digitalización de las unidades cartográficas o polígonos de cobertura del área de estudio, en base al mapa de cobertura vegetal de la cuenca Quilca Chili, elaborado por el Gobierno Regional de Arequipa, que según evaluación en campo en algunos casos coincidía con las coberturas y en otros no, siendo comprensible ya que fue formulado a escala macro (1/100 000); por lo que se tuvo que optar a la ejecución, con la metodología del NDVI en dos etapas, a partir de las imágenes satelitales Landsat TM 10 del 2014.

En una primera etapa se instruyó el proceso del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) a partir de la descarga de imágenes de satélite Landsat TM 10 de la base de datos de USGS del 2014; disponible de manera gratuita y que fue la más actualizada en el momento del procesamiento, apoyados del programa ERDAS Imagine versión 2014.

Se procedió con la combinación de las bandas multiespectrales 543 de imágenes Landsat TM 10; observando inicialmente que no se ajustaban adecuadamente a las firmas espectrales de la vegetación evaluada en campo, debido al criterio de valores de mejor reflectancia que recayó en la banda del infrarrojo térmico del Landsat 8 (ahora está dispuesta en dos bandas de Landsat), razón por la cual se tomaron sus bandas equivalentes, que es la combinación de las bandas multiespectrales 654 de imágenes Landsat TM 10, aplicado para el análisis de vegetación, ya que se ajustaron bien a la evaluación de campo, apoyados de la herramienta Erdas Imagine: Opción *Raster/Spectral/LayerStack* del Erdas, mostrando los resultados en la Fig. 24.

Las bandas se alinean con algunos ajustes menores de los rangos espectrales para el cálculo del NDVI a partir de las imágenes satelitales Landsat 8, considerando que la banda del infrarrojo térmico del Landsat 7 ahora está dividida en dos bandas de Landsat 8, mientras que antes de tener una banda térmica que fue adquirido a 60 metros de resolución (vuelve a muestrear a 30 metros) aumentó la resolución espectral a costa de la resolución espacial; teniendo las bandas equivalente de Landsat 7 para Landsat 8, señalado en Cuadro 13.

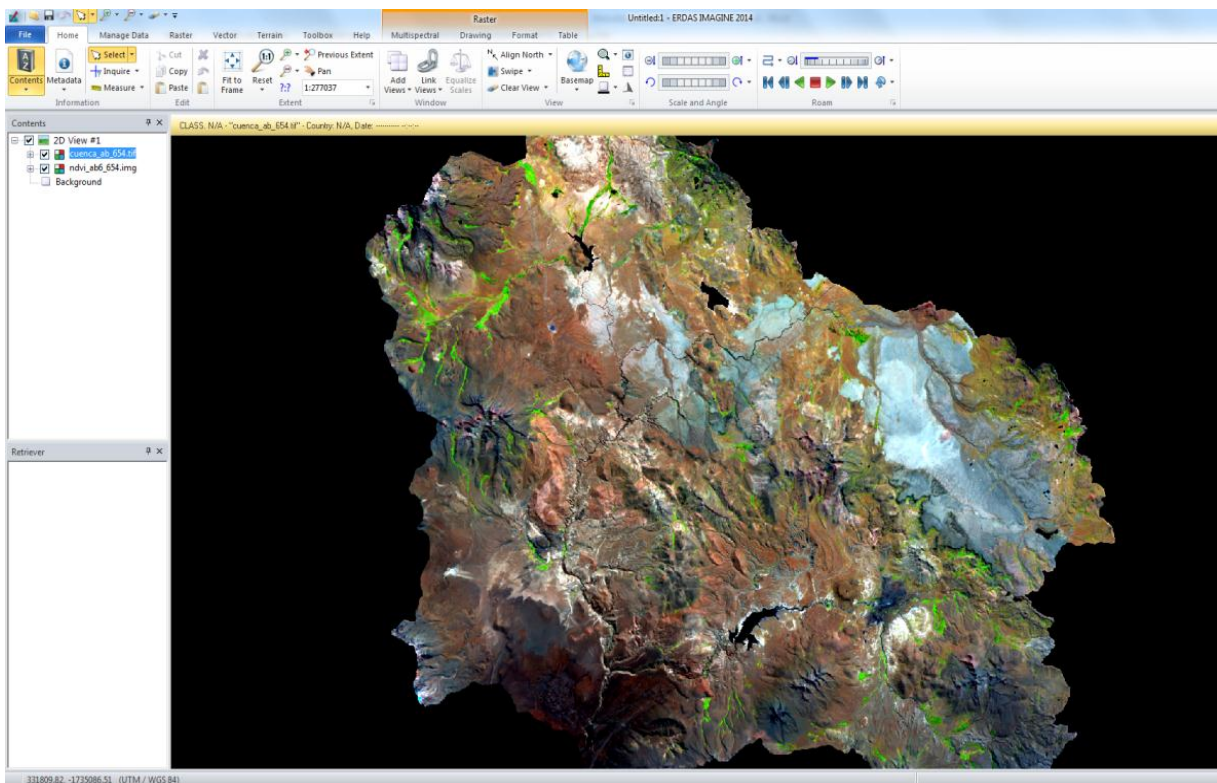


Figura 24: Combinación de las bandas multiespectrales 654 Landsat TM 10

Cuadro 13: Comparación de bandas de imágenes de satélite Landsat 7 y 8

Landsat 7			Landsat 8		
Banda	Ancho (μm)	Resolución (m)	Banda	Ancho (μm)	Resolución (m)
			Band 1 Coastal	0.43 – 0.45	30
Band 1 Blue	0.45 – 0.52	30	Band 2 Blue	0.45 – 0.51	30
Band 2 Green	0.52 – 0.60	30	Band 3 Green	0.53 – 0.59	30
Band 3 Red	0.63 – 0.69	30	Band 4 Red	0.64 – 0.67	30
Band 4 NIR	0.77 – 0.90	30	Band 5 NIR	0.85 – 0.88	30
Band 5 SWIR1	1.55 – 1.75	30	Band 6 SWIR1	1.57 – 1.65	30
Band 7 SWIR2	2.09 – 2.35	30	Band 7 SWIR2	2.11 – 2.29	30
Band 8 Pan	0.52 – 0.90	15	Band 8 Pan	0.50 – 0.68	15
			Band 9 Cirrus	1.36 – 1.38	30
Band 6 TIR	10.40 – 12.50	30/60	Band 10 TIRS1	10.6 – 11.19	100
			Band 11 TIRS2	11.5 – 12.51	100

FUENTE: Base de datos USGS e Imágenes de Satélite Landsat 7 y 8

Se procedió a realizar el corte de la imagen Landsat con el mapa del perímetro de la cuenca Aguada Blanca a través del programa Erdas, con la herramienta Imagine, opción: Raster/Subset/create subset Imagine y luego Input File: *.tif (imagen de ingreso), Output File: *.img (Imagen de salida), corte con Shape file: límite de cuenca referida (Fig. 25).

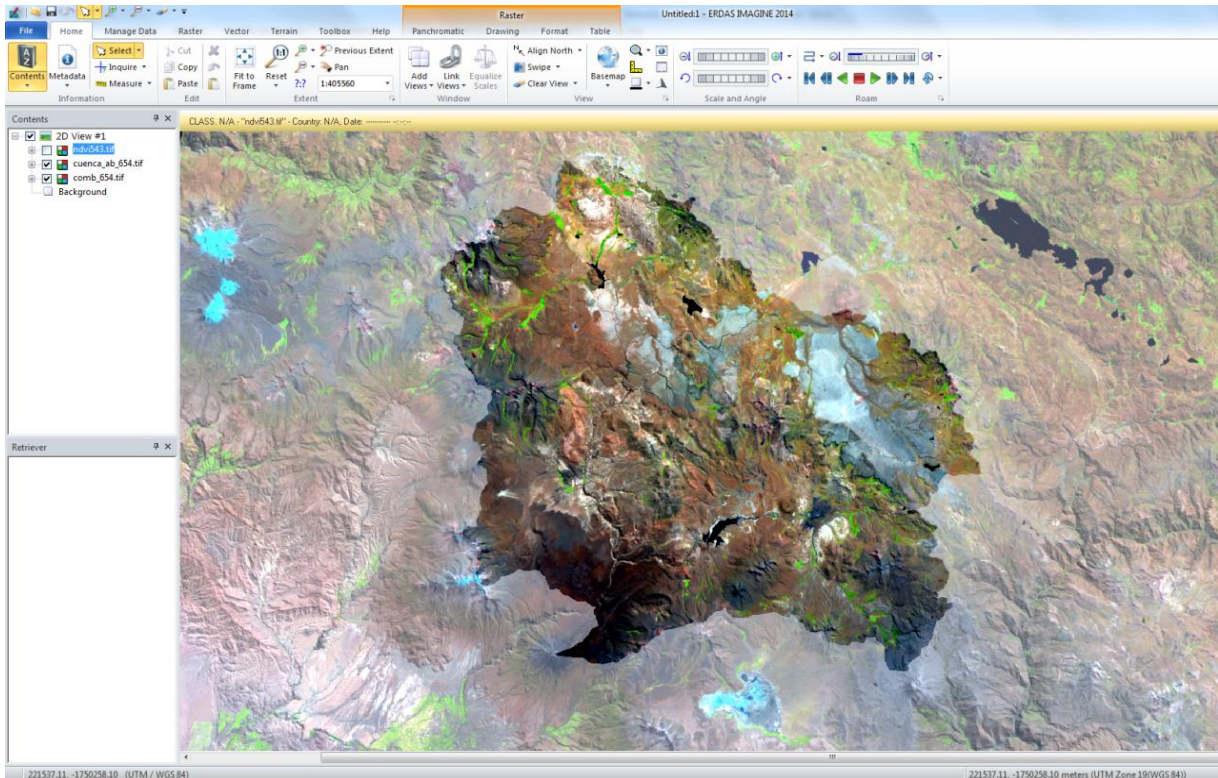


Figura 25: Cuenca Aguada Blanca formato raster, proceso créate subset

El último proceso consistió en la generación del NDVI en el ámbito de estudio, reportando los valores de los índices del NDVI, que indican los diferentes tipos de coberturas vegetales existentes en la fecha (2014) de la imagen satelital Landsat TM10 que fue capturada, reportando dichos índices en la Fig. 26.

En una segunda etapa se generó el mapa de cobertura vegetal, con su respectiva tabla alfanumérica en base al mapa del NDVI, con apoyo del programa Arc Gis. El primer paso fue exportar la imagen satelital del NDVI del programa Erdas al Arc Gis, editada en formato raster y extensión tif, denominada cuenca_ab_654.tif; que diferencia de manera amigable las coberturas vegetales (tonalidad verde), de suelos (tonalidades marrón y blanco) y agua (color negro) e indicando que existe una relación directa, es decir a mayor índice del NDVI mayor área foliar y densidad de cobertura vegetal, tal como revela la Fig. 27.

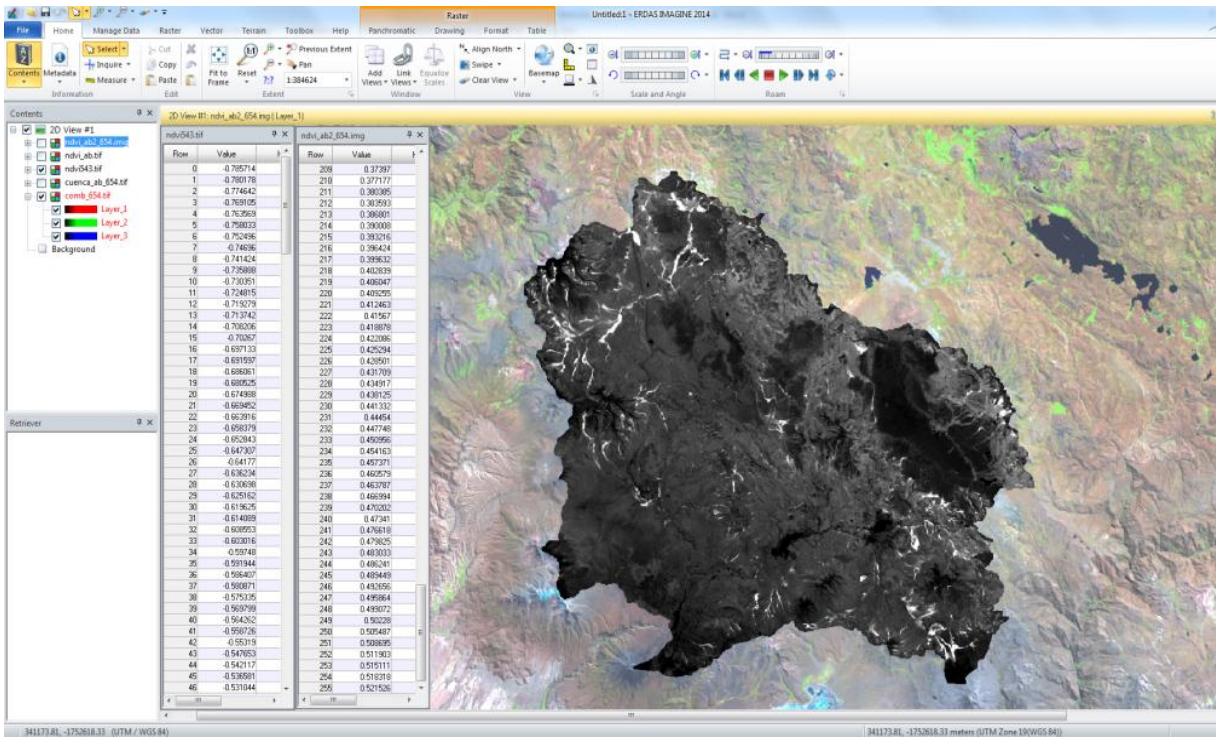


Figura 26: Índices del NDVI de imagen satelital Landsat TM10, 2014

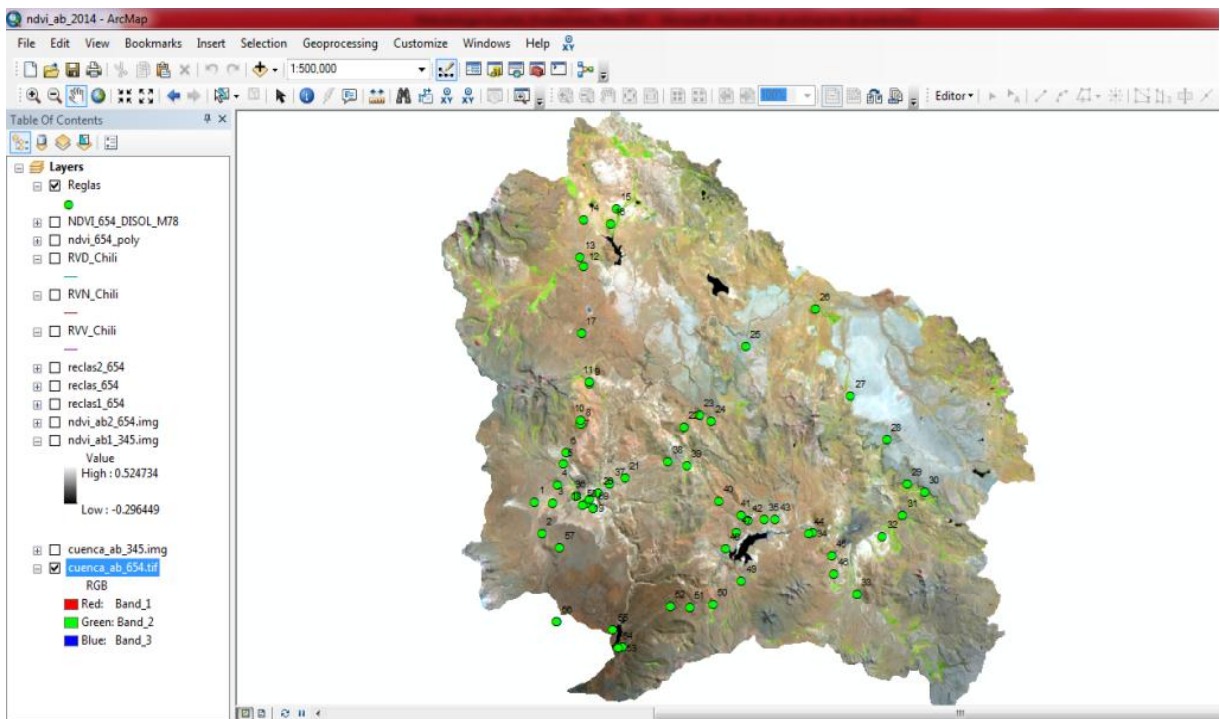


Figura 27: Cobertura vegetal, suelo, agua en formato raster de la cuenca

El siguiente proceso consistió en reclasificar la cobertura vegetal en siete clases, con el método natural, en base a los diferentes tipos de cobertura vegetal evaluadas en campo y contrastados con los índices del NDVI 2014, apoyados de la herramienta Arc Toolbox/ 3D Analyst Tools/Raster Reclass/Reclassify. Los índices variaron desde -0.2964 hasta 0.5247, recayendo en la primera clase los valores de -0.2964 hasta -0.0227 y así sucesivamente hasta la séptima clase que va desde 0.2832 - 0.5247, mostrado en la Fig. 28.

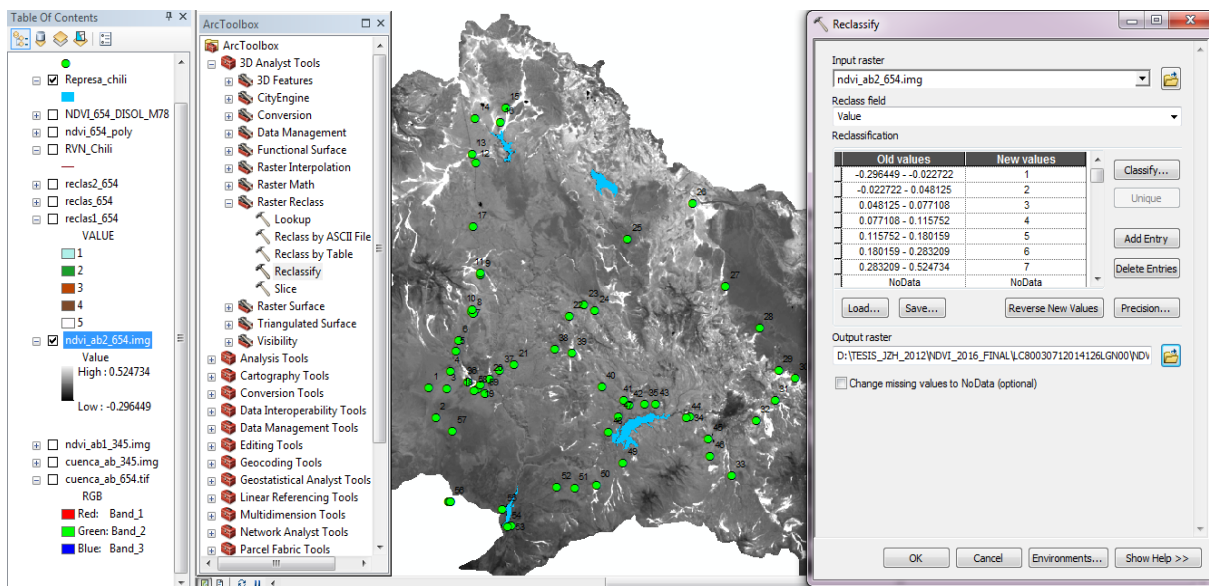


Figura 28: Cobertura con NDVI reclasificadas en 07 clases, proceso *reclassify*

Luego se realizó la conversión del NDVI, reclasificado de formato raster a polígono en formato Shape file, para homogenizar el mapa, generando 184,876 polígonos en formato Shape File Feature Class, apoyado de la herramienta ArcToolbox/Conversion Tools/From Raster/Raster to Polygon y visualizar los diferentes polígonos en siete clases del NDVI, referidas mediante el proceso Layer Properties/Symbology y Categories/Unique value y Value Field: Gricode.

El siguiente proceso consistió en agrupar en siete tipologías los 184,876 polígonos generados, según las características de cobertura vegetal preponderantes en el ámbito de estudio, apoyados de la herramienta Geoprocessing/Dissolve, reportando el mapa de cobertura en diferentes tonalidades de color, según las siete clases de los índices correspondientes del NDVI 2014, señalado en la Fig. 29.

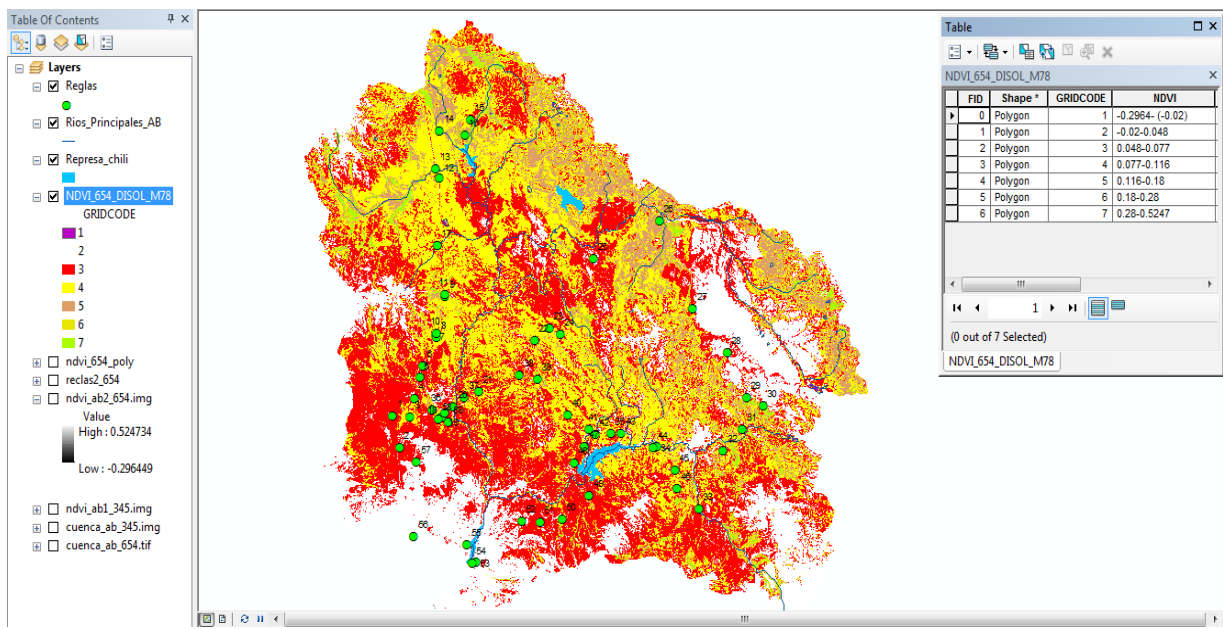


Figura 29: Cobertura vegetal, en base NDVI 2014 y tabla alfanumérica

Finalmente, se realizó la calibración de los coeficientes del factor C, mediante la evaluación de los valores obtenidos del modelo y contrastado con la erosión obtenida en campo en base a la ecuación USLE, según el tipo de coberturas vegetal encontrado en campo y los índices del NDVI; logrando luego del proceso de calibración una buena confiabilidad de los índices del factor C, con sus respectivas correlaciones consistentes con $r^2 > 0.85$.

Se logró el mapa consolidado de cobertura vegetal con sus respectivas áreas, completando la información de los coeficientes del NDVI y de los índices del factor C, área y otros, en su tabla de atributos alfanumérica.

e. Superposición de mapas

Con los cuatro mapas base determinados (isoyetas, pendientes, erosionabilidad y cobertura vegetal), se procedió a la superposición e interrelación de los mismos, obteniendo dos mapas, el primero de la unión del factor de lluvia (R) y factor de pendientes (LS) y el segundo de la unión del factor erosionabilidad del suelo (K) y factor de cultivo (C); para finalmente obtener el mapa USLE que indicará los estados erosivos en el área de estudio de la cuenca aportante Aguada Blanca, mediante la intercepción del factor R-LS y factor K-C y el factor de prácticas de conservación ($P=1$), resumiendo en la superposición de los mapas.

El primer mapa con superposición obtenida fue la intersección del mapa base de isoyetas (coeficientes del factor R) con el mapa base de pendientes (coeficientes del factor LS), denominado INTERS_R_LS_MC78, bajo el proceso Geoprocessing/Intersect (Fig. 30).

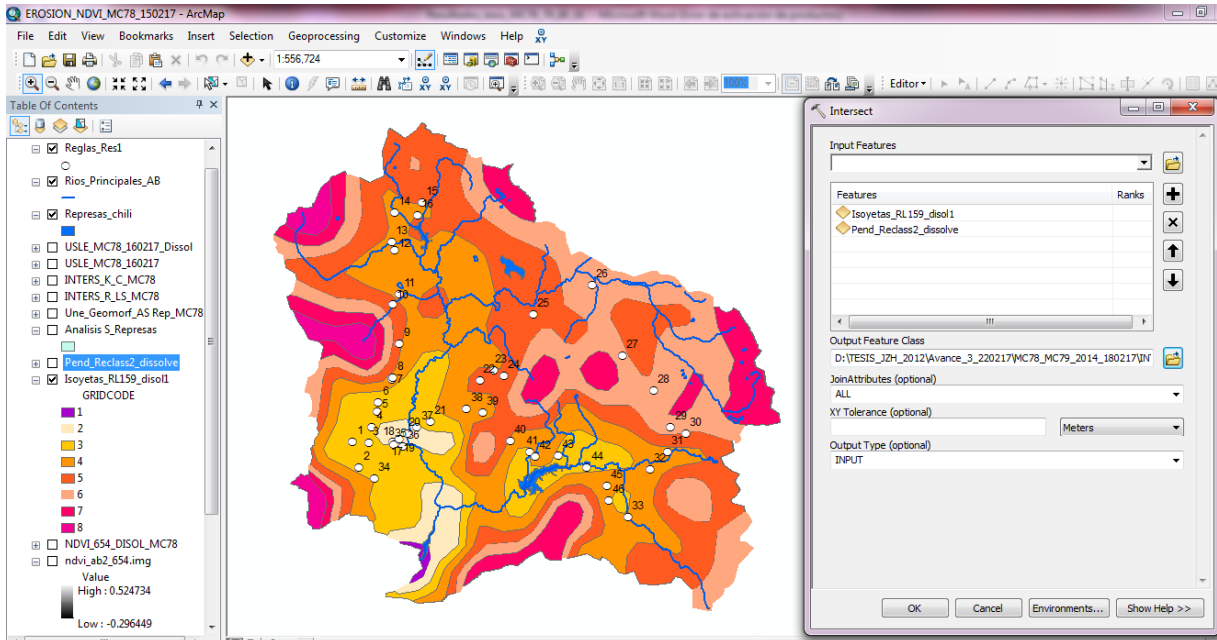


Figura 30: Superposición del mapa de isoyetas y pendientes del modelo-MC78

El segundo mapa de superposición, denominado INTERS_K_C_MC78, fue la intersección del mapa base de erodabilidad (coeficientes del factor K) con el mapa base de coberturas (coeficientes del factor C), según NDVI, obtenido con imágenes satelital Lansat 2014 y validados según mediciones en campo (Fig. 31).

En dicho mapa de intersección se creó un campo con el propósito de obtener el producto de los coeficientes de erodabilidad (K) y de cobertura (C) en cada uno de los polígonos de formato Shape file de manera geoespacial, que representa cuantitativamente la erosión del suelo por ambos factores, bajo el manejo de Field Calculator en la tabla de atributos.

Bajo similar proceso, el tercer mapa corresponde a los mapas de intersección obtenidos y denominados INTERS_R_LS_MC78 e INTERS_K_C_MC78, con el fin de conseguir el mapa de erosión de suelos (USLE_MC78_160217). En este mapa se creó un campo en la tabla de atributos alfanumérica para determinar el valor total de erosión de manera cuantitativa por el producto de los cuatro factores: lluvia (R), topográfico (LS), erodabilidad (K) y coberturas (C), con el propósito de obtener la erosión de suelos geoespacialmente (Fig. 32).

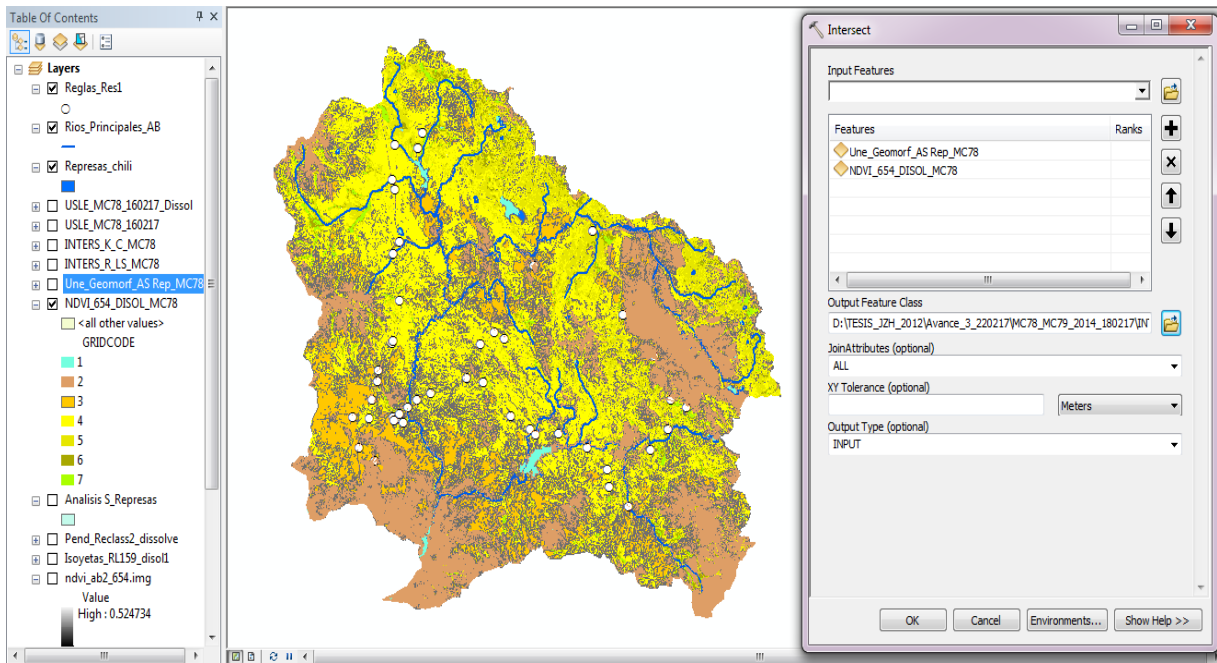


Figura 31: Superposición del mapa erosionabilidad y coberturas, modelo MC78

No se consideró el factor de prácticas de conservación, ya que no se encontró en campo, salvo en la localidad de Chahuanca, por lo que el mapa final de erosión del suelo geoespacial en cualquier punto de la cuenca aportante de Aguada Blanca es el determinado por los cuatro factores referidos.

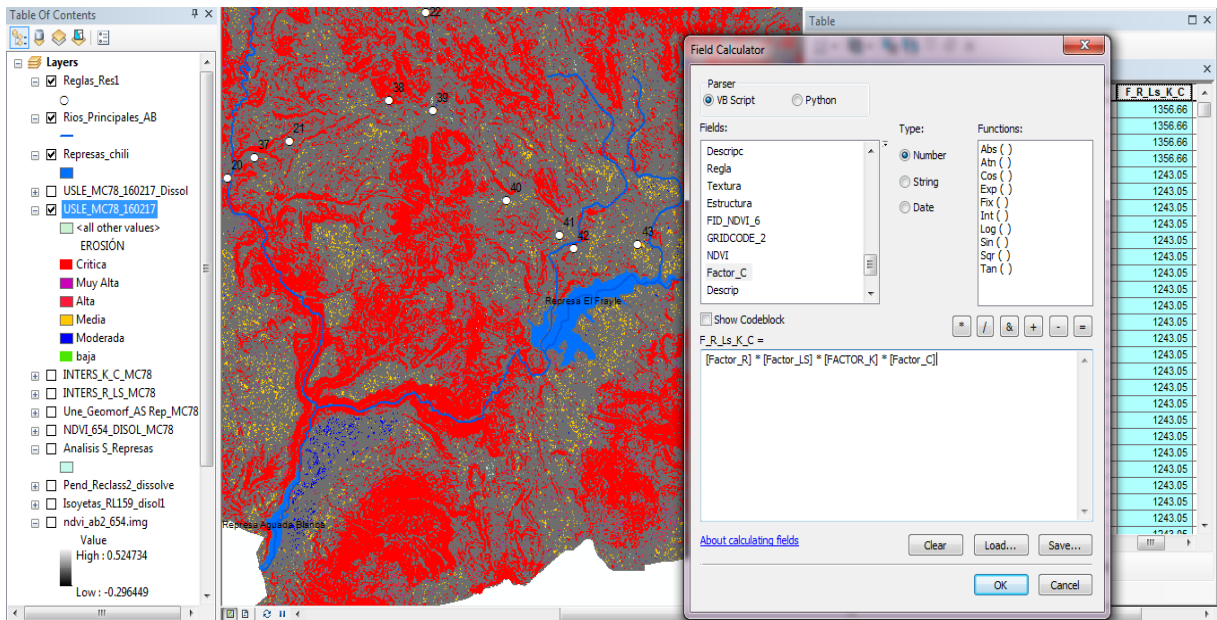


Figura 32: Erosión USLE del MC78, proceso producto del factor: R.LS.K.C

Con la misma metodología se determinó el mapa USLE del modelo desarrollado con el NDVI capturada de imagen satelital Landsat TM del 2001 (modelo-MC81), generado a partir de los índices del NDVI 2001, el mapa base de coberturas y con los mapas bases de lluvia, pendientes y erosionabilidad, obteniendo el mapa final, mediante la superposición de los cuatro mapas base R, LS, K y C, detallados en párrafos anteriores.

Se determinó el mapa USLE del modelo retrospectivo de la erosión de la cuenca aportante del embalse de Aguada Blanca y su relación con la sedimentación en tres escenarios. El primero concerniente al mapa de erosión de la cuenca aportante al embalse del 2002 al 2006, generado con el método del NDVI con imagen satelital Landsat del 2001, el segundo escenario alusivo al mapa de erosión de la cuenca aportante al embalse del 2006 al 2010, generado con el método del NDVI con imagen satelital Landsat del 2014 y el tercero pertenece al mapa de erosión de la cuenca aportante al embalse del 2010 al 2015, generado con el método del NDVI del 2014 y tomando en cuenta los demás embalses existentes (Frayle, Pillones, Challhuanca).

Se formuló el mapa prospectivo con actividades de conservación en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca con similar metodología, para encontrar los niveles de erosión en la cuenca y relacionarlo con la sedimentación del embalse, generado en base a ampliación de coberturas vegetales y apoyados del método del NDVI con imagen satelital Landsat TM 10.

3.3.4 Modelo NDVI 2014-MC78 con imagen satelital Landsat TM 10

Se inició el proceso del modelo de erosión calibrado 78 (MC78), luego del ingreso de datos calibrados de los índices de los factores R, LS, K y C en los mapas correspondientes de isoyetas, pendientes, erosionabilidad y cobertura vegetal. Seguidamente se realizaron los procesos con la superposición de los cuatro mapas indicados; cuya metodología fue detallada en ítem 3.3.1, describiendo de manera resumida los procesos del modelo MC78.

En el mapa base de isoyetas, se colocaron los coeficientes determinados del factor R (134, 151, 169, 203) para las isoyetas respectivas, según ecuación modificada de Fournier, que se muestra en la tabla de atributos del mapa referido, según Fig. 33.

En el mapa base de pendientes se colocaron los coeficientes del factor LS, para las pendientes respectivas, según el modelo digital del terreno (MDT), similarmente en el mapa base de erodabilidad (K) y en el mapa base de cobertura vegetal (C) se colocaron los coeficientes

respectivos, que fueron determinados en anterior punto, cuya metodología fue detallada en ítem 3.3.1 b, c y d, respectivamente.

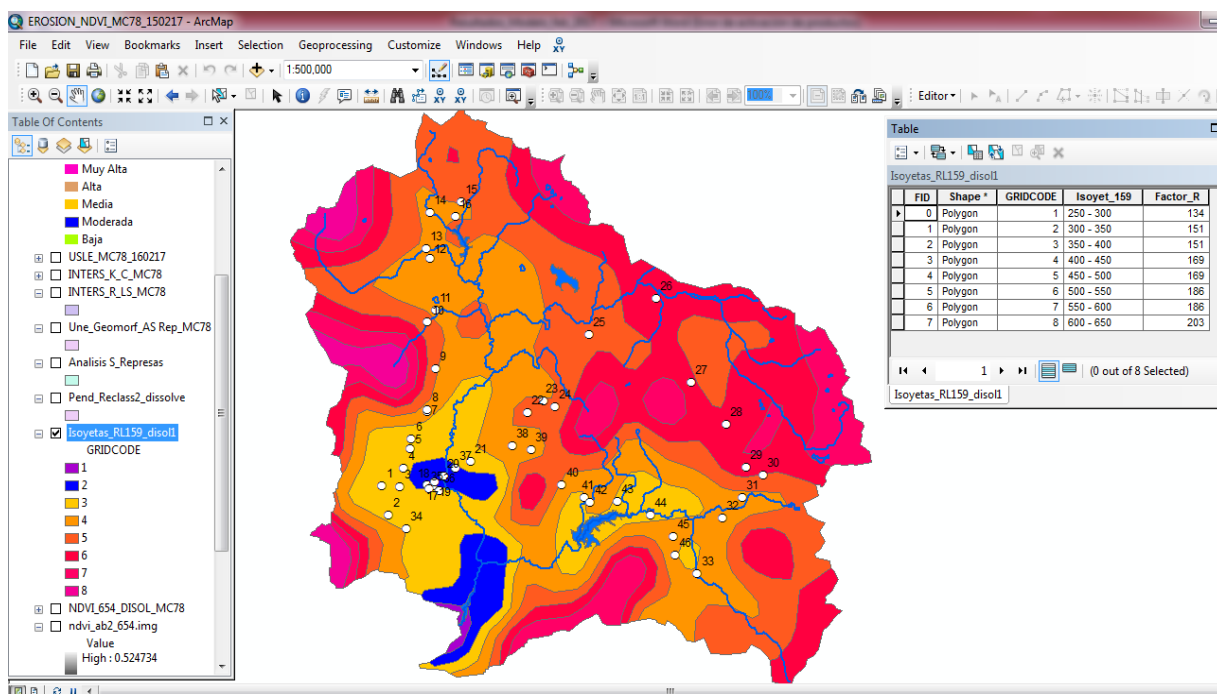


Figura 33: Mapa de isoyetas con los coeficientes del factor R

Se realizó la superposición de los dos primeros mapas mediante el proceso de la unión de los índices R y LS, que fueron previamente calibrados e introducidos los valores en los respectivos mapas, a través de la intersección del mapa de isoyetas y el mapa de pendientes.

De manera similar, se realizó la superposición de los otros dos mapas bajo el proceso de la unión de los coeficientes K y C, mediante la intersección de los mapas de erodabilidad y de cobertura vegetal, con sus correspondientes atributos en el modelo MC78; cuyo proceso fue ampliado en ítem 3.3.3 e.

Se desarrolló la superposición de los cuatro mapas referidos mediante el proceso de la intersección de los cuatro factores, a través de la intersección de los mapas INTERS R_LS_MC78 y INTERS K_C_MC78, obteniendo el mapa final de la erosión de suelos geoespacial del modelo (USLE_MC78).

Finalmente, se ejecutó el proceso del Geoprocessing/Dissolve, para organizar los 6582 polígonos en 6 tipologías, según el arquetipo de erosión crítica, muy alta, alta, media, moderada y baja (Fig. 34).

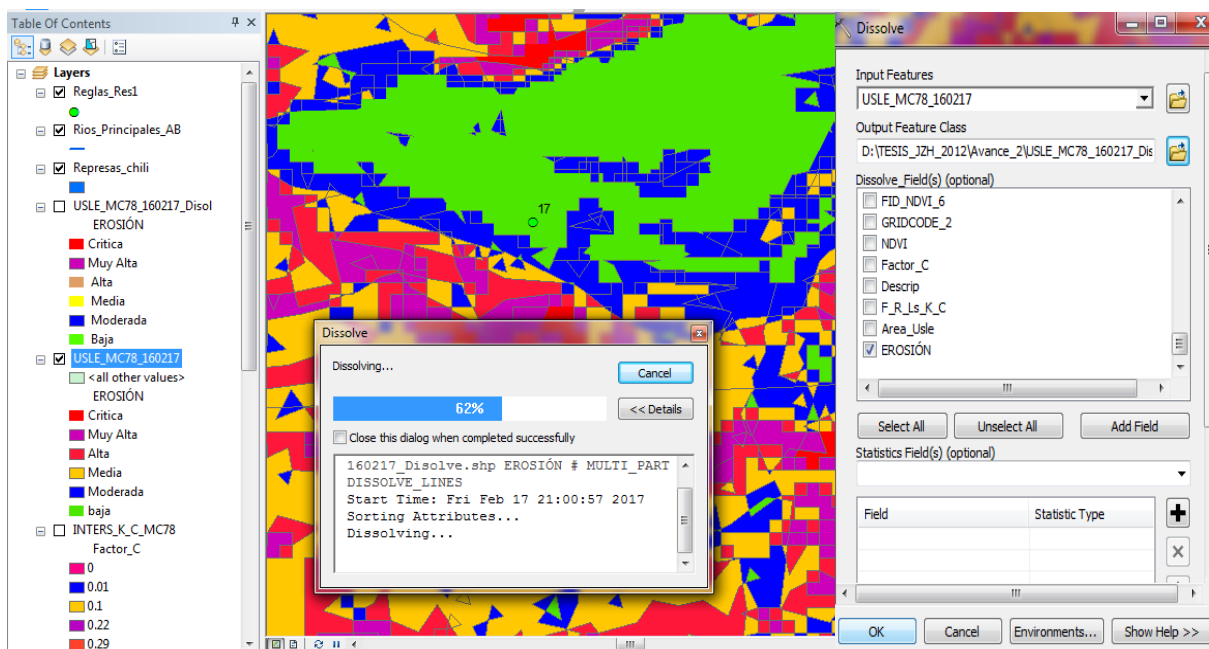


Figura 34: Proceso del mapa final de erosión en 6 tipologías mediante Dissolve

3.3.5. Modelo NDVI 2001-MC80 con imagen satelital Landsat TM 7

El proceso del modelo de erosión calibrado 80 (MC80) retrospectivo fue de manera similar al anterior. Se ejecutó el ingreso de datos calibrados de los índices de los factores R, LS, K y C en sus mapas correspondientes. Se realizaron los procesos con la superposición de los cuatro mapas, teniendo presente que el mapa de cobertura vegetal fue el que cambió de un modelo a otro. Los parámetros de suelos, pendiente y lluvia no cambian en el tiempo (13 años).

El mapa de cobertura vegetal (Fig. 35) fue elaborado a partir del NDVI 2001, bajada de la imagen Landsat TM 2001, para realizar la clasificación natural de los coeficientes NDVI en 7 tipologías, usando la herramienta ArcToolbox/3D Analyst Tools/Rastr Reclass/Reclassify.

Se realizó la conversión de la imagen satelital raster a polígonos, mediante la herramienta ArcToolbox/Conversion Tools/From Raster/Raster to Polygon y luego se organizaron todos los polígonos en siete arquetipos, haciendo uso de Geoprocessing/Dissolve, para obtener el mapa de cobertura vegetal con el llenado de sus atributos de las clases de NDVI 2001, coeficientes calibrados del factor C, tipo de cobertura, áreas de grupos (Fig. 36).

Seguidamente se creó un campo en la tabla de atributos para el llenado de los coeficientes del factor de erodabilidad K en el mapa de erosionabilidad, que fueron previamente calibrados.

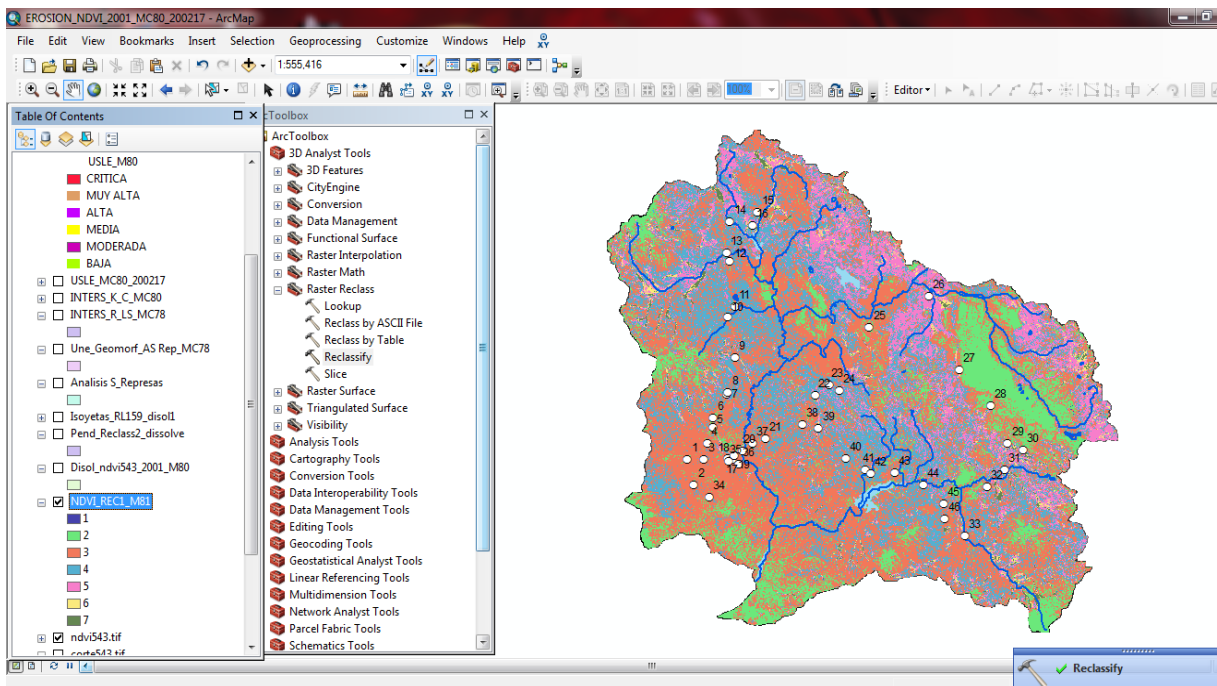


Figura 35: Mapa de cobertura vegetal según clasificación natural del NDVI 2001

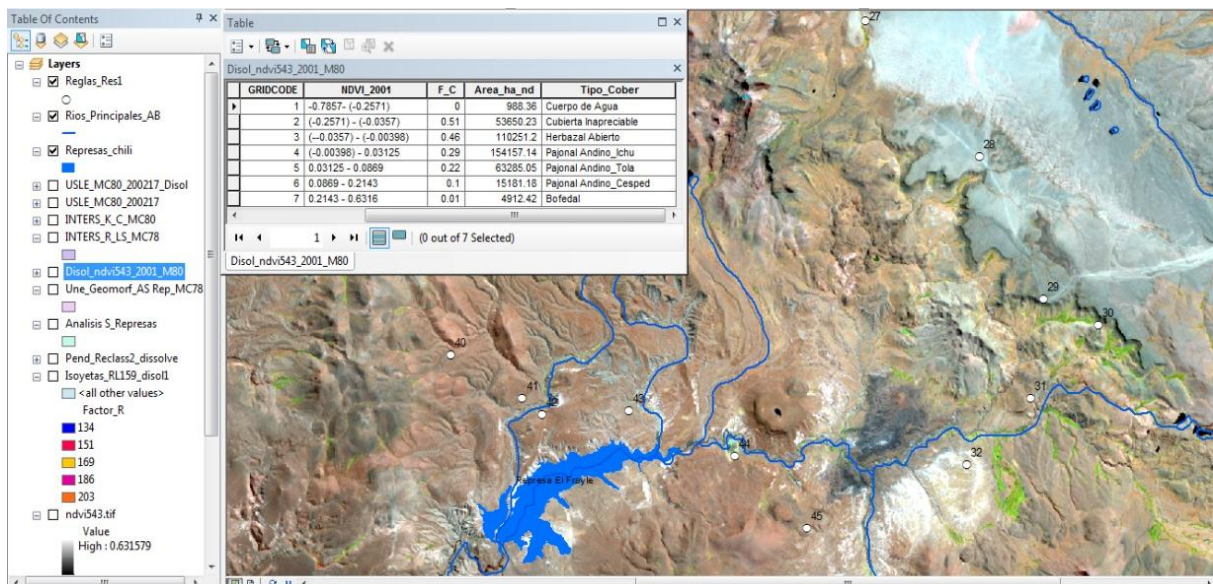


Figura 36: Coeficientes del factor C según los índices del NDVI 2001

Superposición de los primeros mapas mediante la unión de los índices de los factores R y LS. Luego superposición de los otros mapas, mediante la unión de los índices del factor K y factor C, calibrados e introducidos los valores en sus respectivos mapas, a través de la intersección del mapa de erosionabilidad y de cobertura vegetal (metodología detallada en ítem 3.3.3 e).

Se procesó la superposición del mapa Inters_R_LS y mapa Inters_K_C_MC80, obteniendo como producto el mapa de erosión denominado USLE_MC80, donde se puede verificar las diferentes áreas con grado de erosión crítica, muy alta, alta, media, moderada y baja.

Finalmente, se organizaron los 6894 polígonos, en los seis niveles de erosión referidas, bajo la herramienta *Geoprocessing/Dissolve*, creando un campo de las áreas de dichos niveles de erosión en su tabla de atributos, como se puede observar en la Fig. 37.

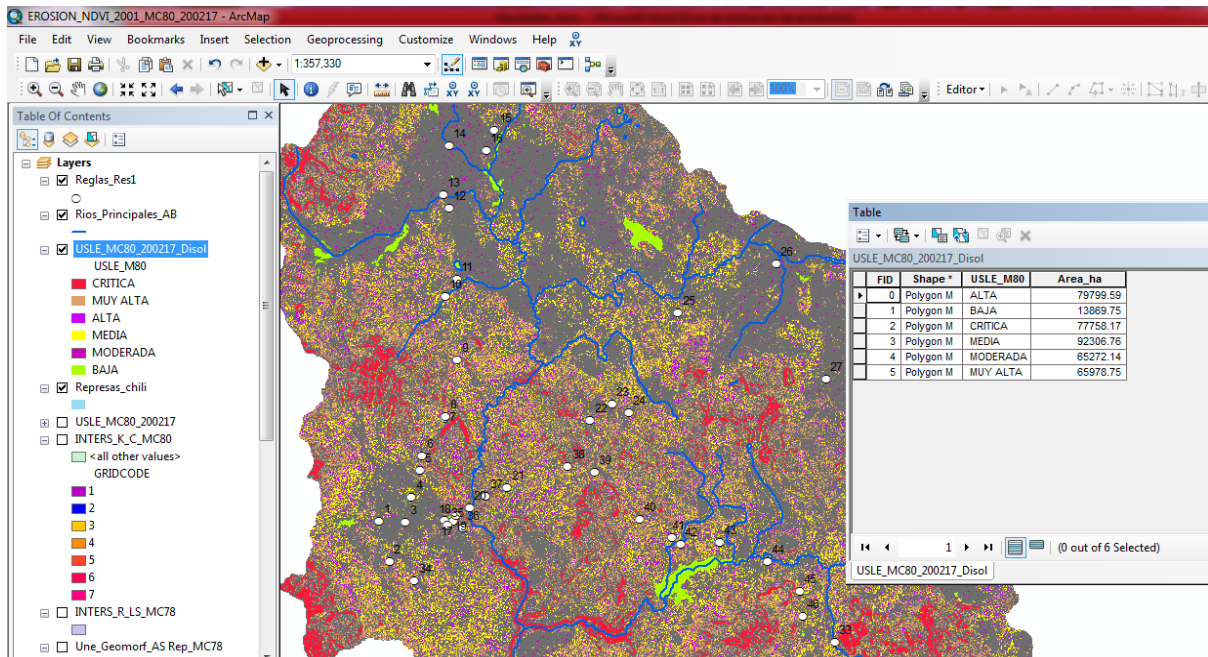


Figura 37: Niveles de erosión y áreas correspondientes del MC80

En el ANEXO 7 se pueden ver los procesos ampliados del Modelo-MC80.

3.3.6 Proceso de erosión y sedimentación del embalse Aguada Blanca

Se inició con la identificación de las áreas aportantes en erosión y sedimentación del embalse, siendo estas áreas diferenciadas en el tiempo y espacio por la existencia de dos embalses antes del 2002 (Frayle y Aguada Blanca) y nuevos embalses (Pillones, Chalhuana) en los últimos años, conteniendo gran parte de los sedimentos erosionados en dichos embalses.

Se comparó la cantidad de sedimentos colmatados en el embalse de Aguada Blanca (según batimetría realizada) con la cantidad de producción en su cuenca aportante y cuánto de la cantidad total de erosión de la cuenca son depositados en el embalse. Para tal efecto los procesos se realizaron en tres fases, apoyados de los dos modelos descritos (MC78 y MC80).

a. Erosión en la cuenca aportante Aguada Blanca del 2002 al 2006

En esta primera fase del proceso se partió identificando el área de influencia de la erosión para el 2002 - 2006 y luego se generó el mapa de erosión total en toneladas (T) en el área de aportes de sedimentos al embalse Aguada Blanca.

La superficie de dominio en la sedimentación del embalse Aguada Blanca en el año 2002 fue el área de la cuenca menos el espacio de influencia del embalse el Frayle (subcuenca del río Blanco), según la red hídrica y la operación del sistema regulado con ambas embalses dentro de la cuenca, visualizando el área de influencia mencionada de color café en la Fig. 38.

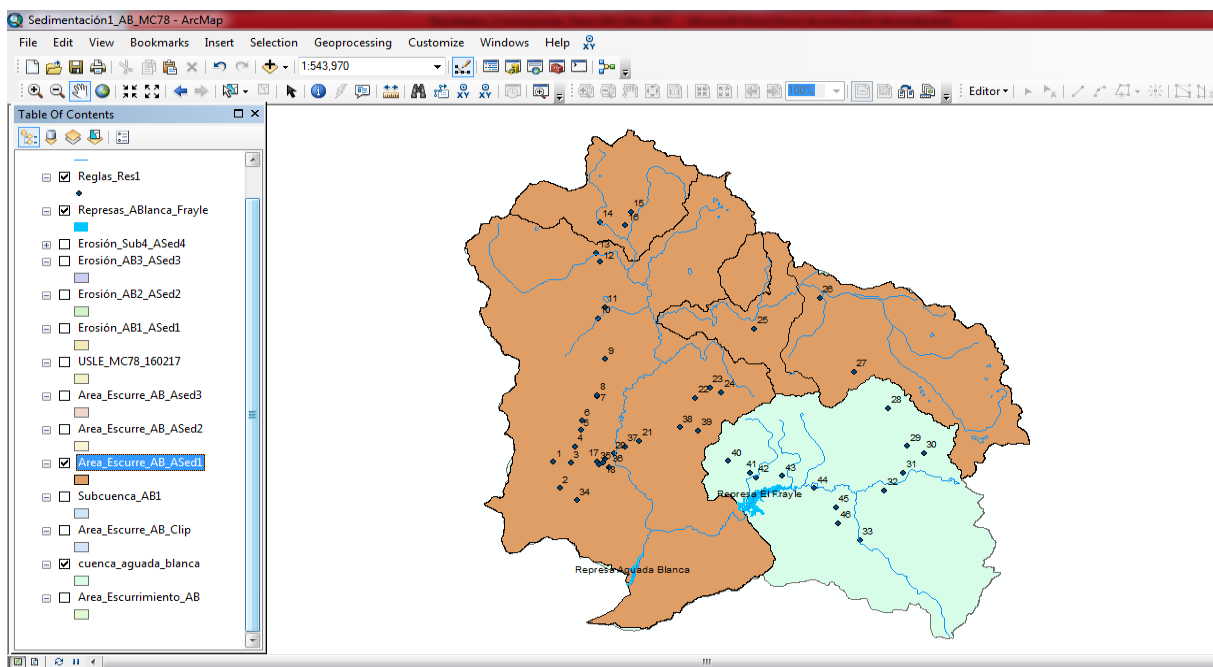


Figura 38: Área de influencia de sedimentación de Aguada Blanca (2002-2006)

Se generó el mapa de erosión en el área de influencia de colmatación de sedimentos identificada, mediante la herramienta Geoprocessing/Clip. Se realizó el recorte de los diferentes atributos del modelo de erosión calibrado_MC80 (NDVI 2001) con el área referida, denominada Area_Escurre_AB_Ased1.

Seguidamente, se generó un campo con la erosión en toneladas en la tabla de atributos y se realizó el cálculo de la columna de erosión de la USLE (T/ha/año) con la columna del área (ha) para obtener la erosión por cada polígono y la erosión total de 36 288,729.34 T/año, N° polígonos, valor máximo, mínimo, promedio y otros atributos (Fig. 39).

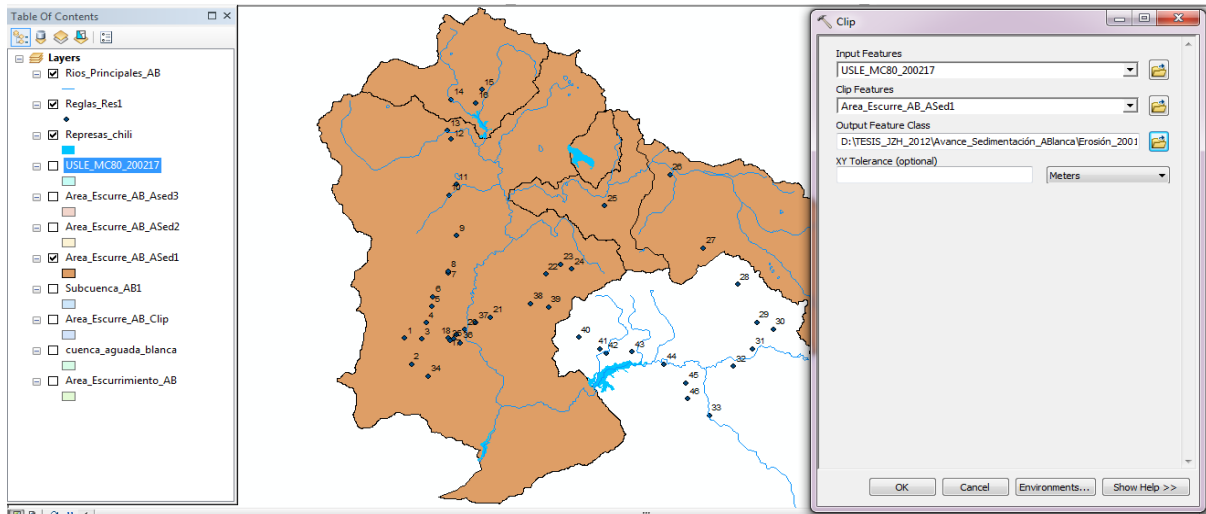


Figura 39: Proceso del recorte de los diferentes atributos del modelo_MC80

b. Erosión en la cuenca aportante Aguada Blanca del 2006 al 2010

Como segunda fase del proceso, se identificó el área de dominio de la sedimentación para el periodo 2006 a 2010 (área cuenca menos subcuenca río Blanco y menos área aportante al embalse Pillones). El embalse Pillones el 2006 entra en operación en el sistema regulado Chili, existiendo una nueva área de influencia de arrastre de sedimentos al embalse Aguada Blanca.

Se realizó el recorte de los diferentes atributos del modelo USLE_MC78 (NDVI 2014) mediante el área Erosión-AB1_ASed1 y el área denominada Area_Escurre_AB_Ased2, apoyados de la herramienta Geoprocessing/Clip (Fig. 40).

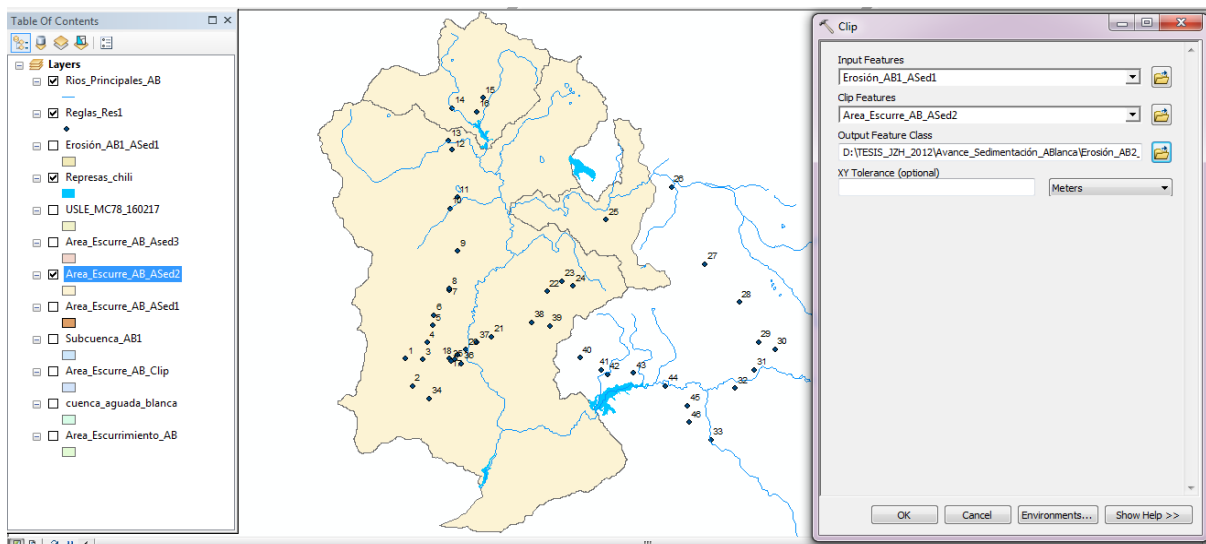


Figura 40: Proceso del recorte de los diferentes atributos del modelo_MC78

Se generó un campo con la erosión en toneladas (T) en la tabla de atributos y se realizó el cálculo de la columna de erosión de la USLE (T/ha/año) con la columna del área (ha), para obtener la erosión por cada polígono y la erosión total en la cuenca aportante en esta fase.

c. Erosión en la cuenca aportante Aguada Blanca del 2010 al 2015

El proceso fue similar a la anterior fase descrita, partiendo de la identificación del área de influencia de la sedimentación para el periodo 2010 al 2015 (área cuenca menos subcuenca río Blanco y menos el espacio aportante a los nuevos embalses Pillones y Chalhuanca).

El embalse Aguada Blanca en el 2010 tiene una nueva área aportante de sedimentos ya que entra en operación el nuevo embalse Chalhuanca en el sistema regulado Chili, por lo que la nueva área de dominio de arrastre de sedimentos al embalse Aguada Blanca en esta tercera fase se circunscribe a la siguiente área con los cuatro embalses referidos (Fig. 41).

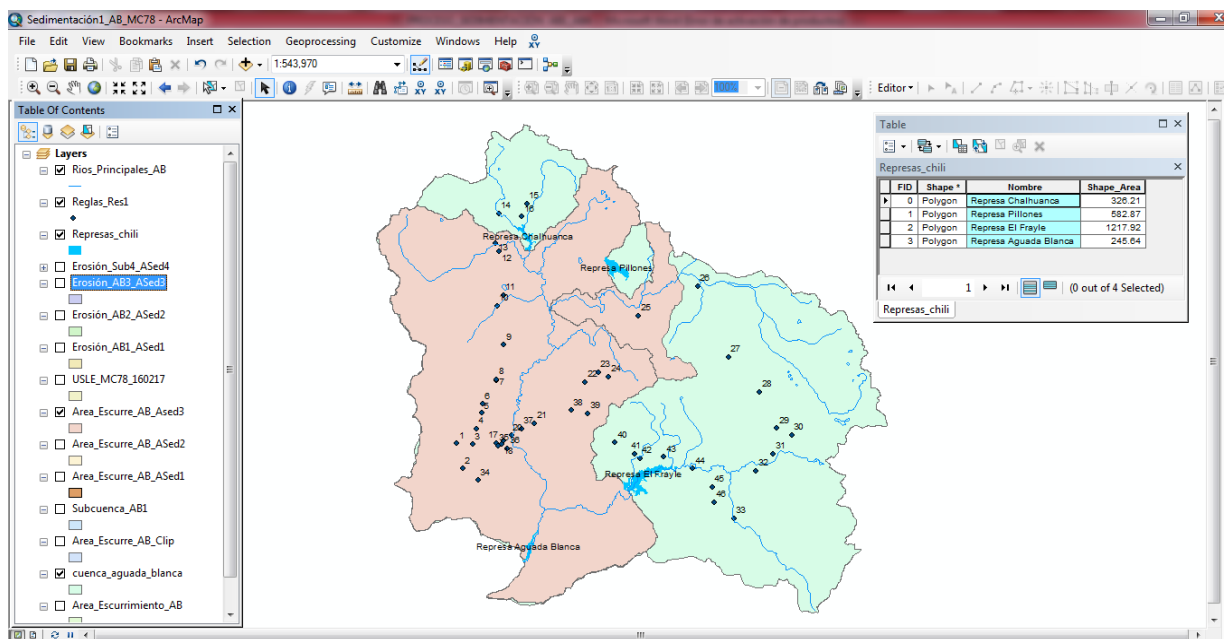


Figura 41: Área de influencia de sedimentación de Aguada Blanca en fase III

Se realizó el recorte de los diferentes atributos del modelo USLE_MC78 (NDVI 2014) mediante las áreas Erosión-AB2_ASed2 y Area_Escurre_AB_Ased3, haciendo uso de la herramienta *Geoprocessing/Clip*, de manera similar al proceso anterior etapa. Luego se generó un campo de la erosión (Eros-Ton) en la tabla de atributos y se realizó el cálculo de la

columna de erosión de la USLE (T/ha/año) con la columna del área (ha), para obtener la erosión por cada polígono y la erosión total (Fig. 42).

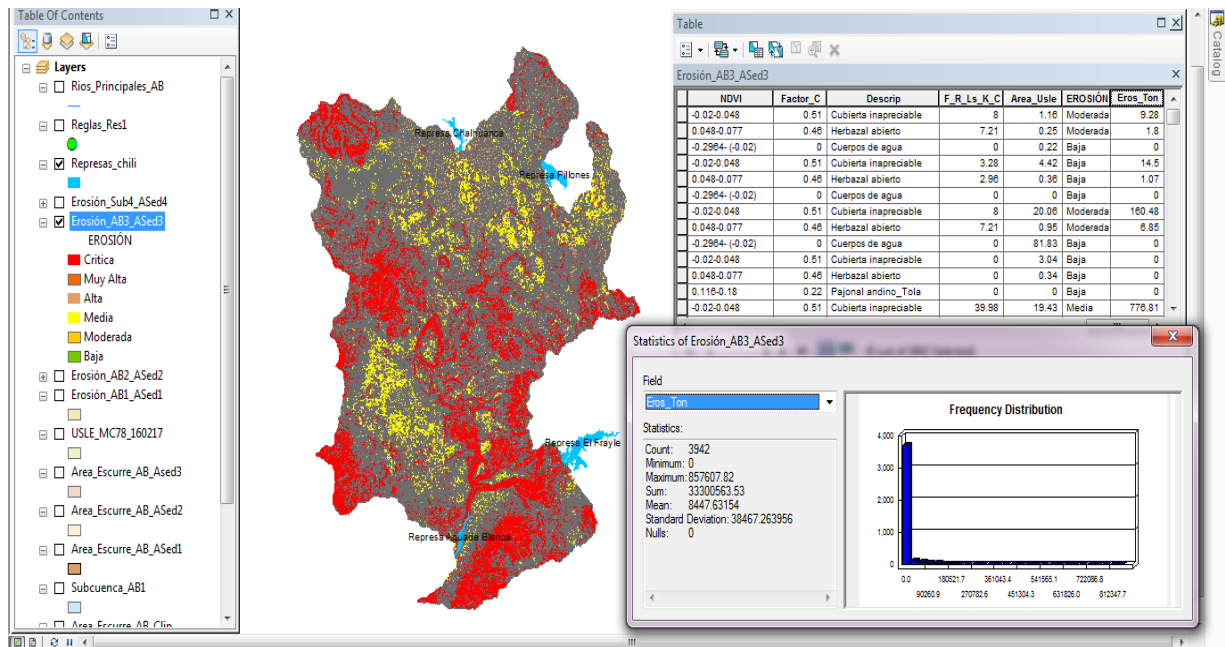


Figura 42: Mapa final de fase III con sus reportes principales de erosión

d. Erosión en cuenca aportante con actividades de conservación - escenario prospectivo

El escenario a futuro deseado denominado M78-C1 se trabajó en un nuevo contexto mediante la ampliación de áreas de coberturas vegetales en la cuenca aportante actual del embalse Aguada Blanca, tomando como referencia la tasa de erosión anual del modelo-MC80 y del MC78, con una serie de procesos desde la identificación y ampliación de coberturas vegetales mediante la reclasificación del NDVI 2014 hasta el mapa final con las coberturas vegetales ampliadas y los nuevos niveles de erosión en la cuenca aportante mencionada.

En la primera etapa, se reclasificó el NDVI en siete nuevos rangos de índices por la mayor densidad de coberturas vegetales (tola, gramíneas, césped de puna, bofedales) y menores áreas de cubiertas inapreciables y herbazal abierto, con los valores del NDVI que se muestran en la tabla de reclasificación de la imagen satelital denominada *ndvi_ab3_654*, según la Fig. 43.

El siguiente proceso fue realizar la conversión de la imagen raster a polígono, para homogenizar en *Shapefile Feature Class* en los respectivos mapas del proceso USLE, generando 143,857 polígonos, apoyados de la herramienta *from raster/raster to polygon*.

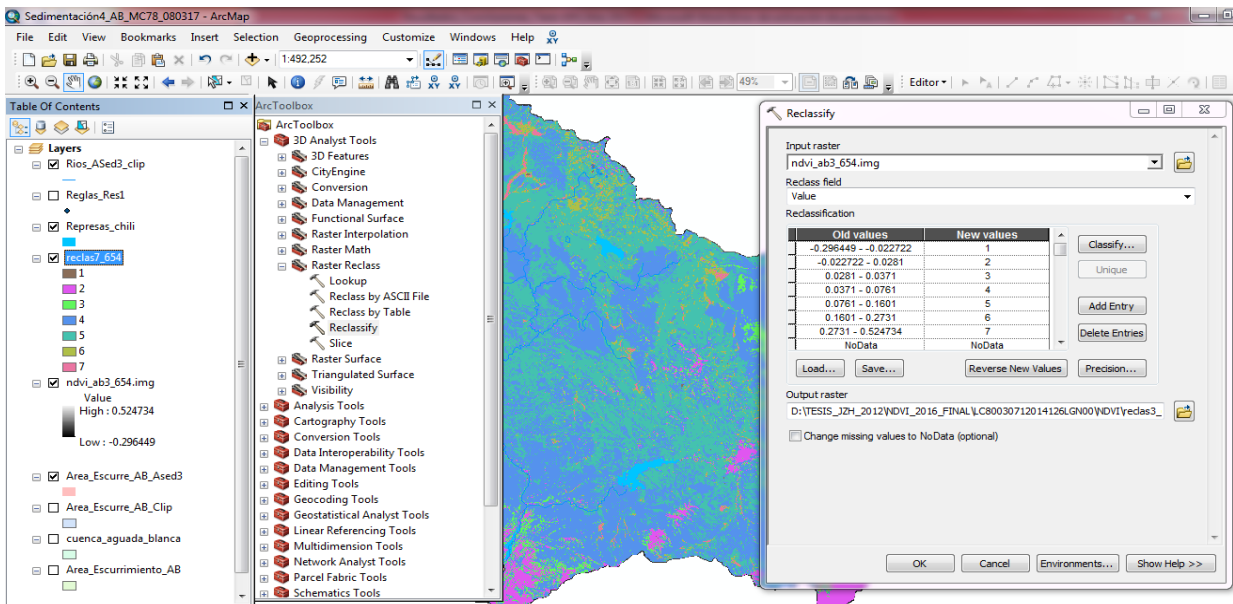


Figura 43: Reclasificación manual de los índices del NDVI 2014

Se ejecutó la agrupación de los 143,857 polígonos en siete tipologías, según las características de las coberturas vegetales preponderantes en el ámbito de estudio, apoyados de la herramienta *Geoprocessing/Dissolve* en los archivos de trabajo indicados.

Luego, en la tabla del mapa de cobertura generado, se adicionaron tres campos, el primero con los índices del NDVI de cada tipología de cobertura, el segundo el factor C con sus índices y el tercero las coberturas vegetales y factor C que le corresponde (Fig. 44).

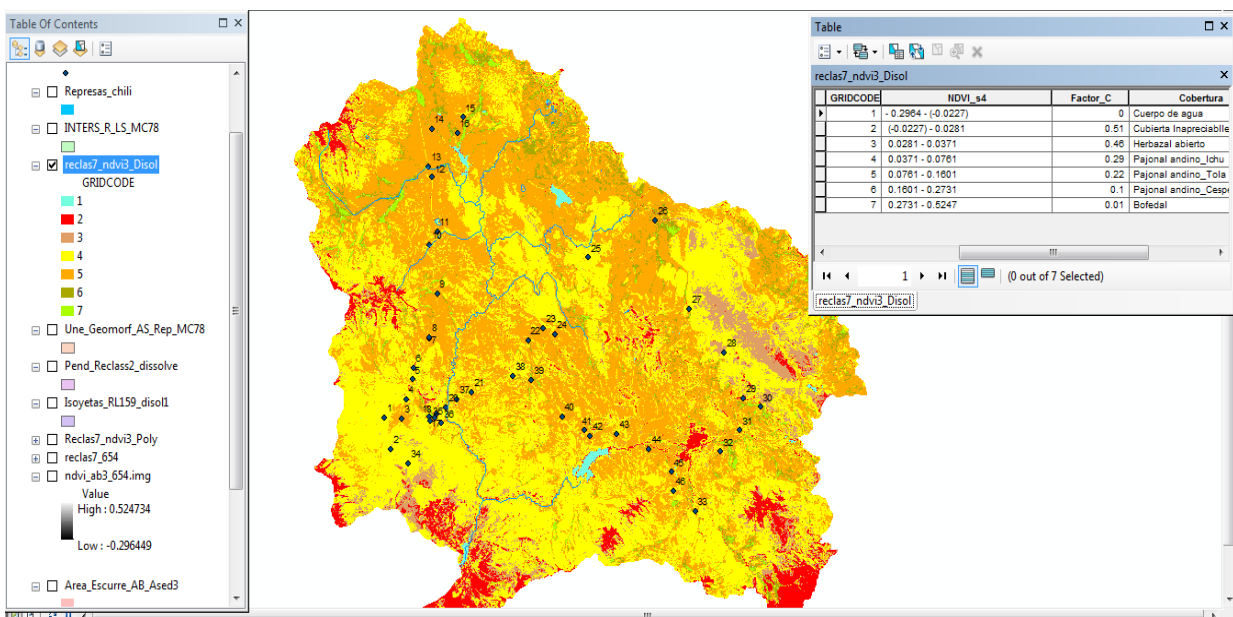


Figura 44: Mapa de coberturas con su tabla de atributos, NDVI y factor C

La segunda etapa consistió en realizar el proceso de intersección del mapa de isoyetas con sus índices del factor R con el mapa de pendientes con sus índices del factor LS, obteniendo el mapa de INTERS_R_LS_MC78, con los diferentes atributos de ambos mapas señalados.

Se realizó la intersección de los atributos (coeficientes del factor K, otros) del mapa de erosionabilidad con los atributos del mapa de cobertura vegetal (coeficientes del factor C, otros), obteniendo el mapa de INTERS_K_C_MC78_Sed4, con sus respectivos archivos.

Se procesó la intersección de los cuatro mapas referidos mediante la intersección del mapa INTERS_R_LS_MC78 e INTERS_K_C_MC78_Sed4, para obtener los atributos de los mapas indicados conteniendo los índices de los factores R, LS, K y C y las cantidades de erosión en cada uno de los polígonos del *Shapefile Feature Class* de manera geoespacial, obteniendo el mapa USLE_MC78_Sed4_080317 que contiene los diferentes niveles de erosión.

El siguiente paso fue el clip del modelo USLE_MC78_Sed4_080317 con el área de influencia actual de erosión de la cuenca aportante al embalse Aguada Blanca, denominada Area_Escurre_AB_Ased3, como se revela en la Fig. 45.

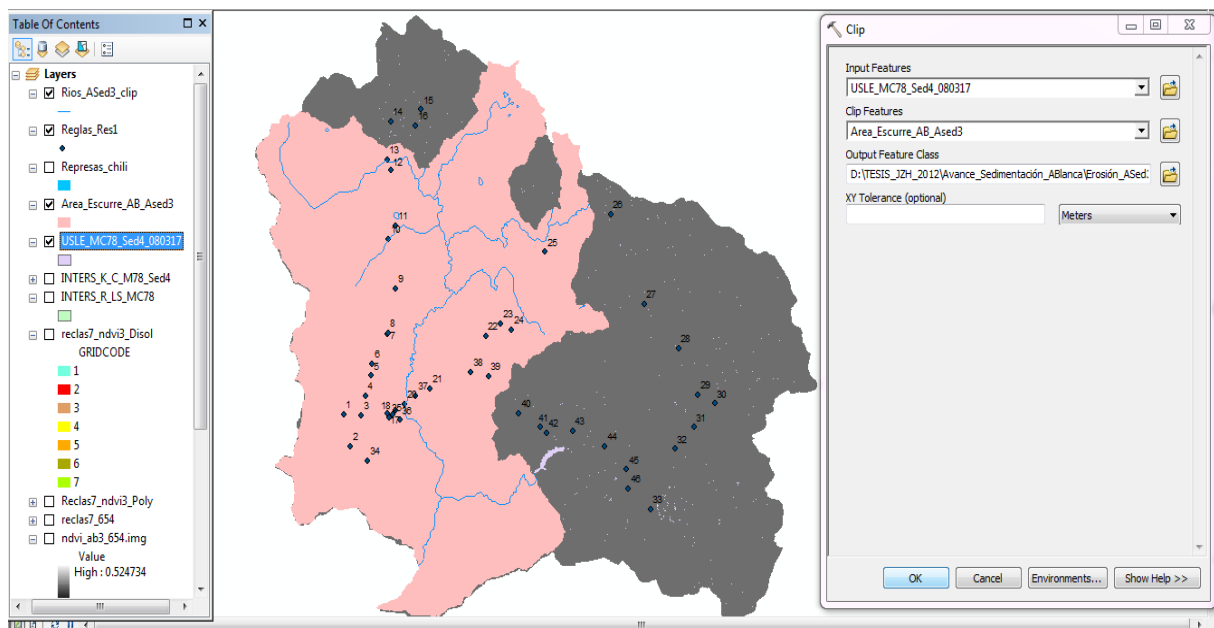


Figura 45: Recorte del área de influencia de sedimentación del embalse

En la tabla de atributos de la erosión deseada con sus atributos se generó un nuevo campo para encontrar la erosión total al multiplicar la erosión de cada polígono con su respectiva área con el apoyo de la herramienta *field calculator*.

Se ejecutaron los reportes de la erosión del nuevo escenario a futuro para conocer la erosión mínima, media, máxima y erosión total.

Posteriormente, se procesó el mapa final Erosión_Asen4_Conservación_Disol, denominado de manera resumida M78-C1, agrupando los diferentes polígonos en los seis niveles de erosión crítica, muy alta, alta, media, moderada y baja, en la cuenca aportante actual del embalse Aguada Blanca, apoyados de la herramienta *Geoprocessing/Dissolve* (Fig. 46).

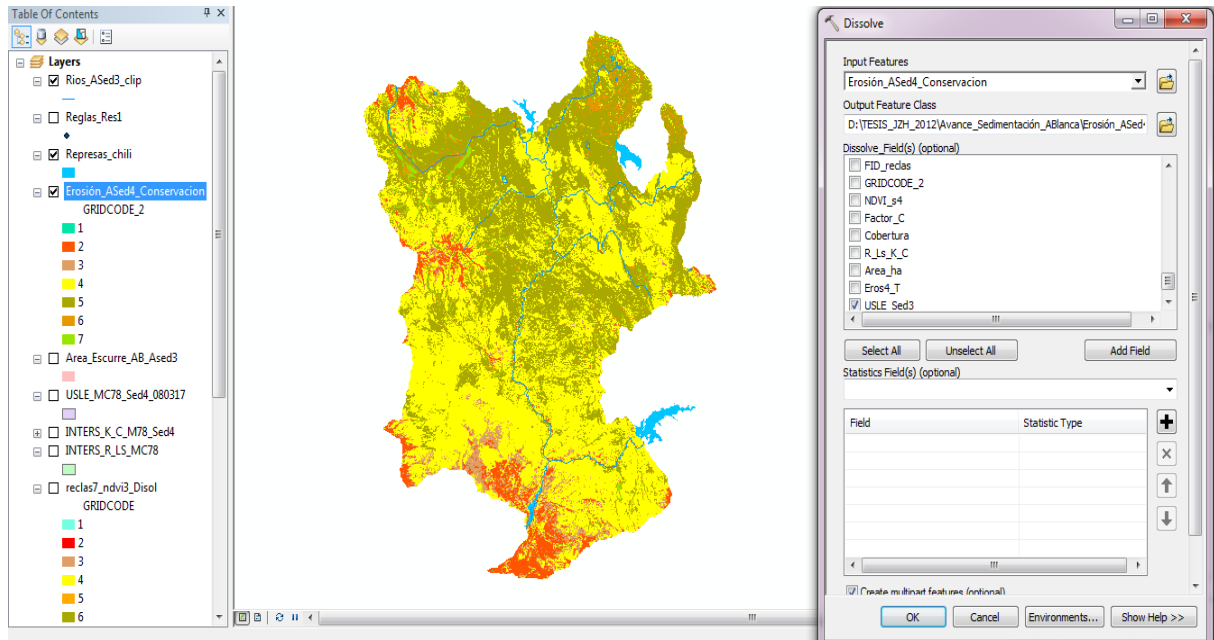


Figura 46: Mapa consolidado de conservación, niveles de erosión.

3.3.7 Calibración de los coeficientes del modelo geoespacial

Los resultados del proceso de calibración de los factores R, LS, K y C del modelo geoespacial se validó en función a la información obtenida en campo del modelo MC78, con las variables de lluvia, pendientes, suelos y coberturas vegetales, encontradas en el ámbito de estudio en el momento de la evaluación (2015-2016), mediante mediciones efectuadas en reglas milimetradas con precisión de 0.5 mm, ubicadas de manera aleatoria en la cuenca aportante de Aguada Blanca y con tres lecturas realizadas, la primera efectuada entre los meses febrero y marzo del 2015; la segunda a fines del mismo año, entre noviembre y diciembre, la tercera entre mayo y junio del 2016, para determinar la erosión laminar anual en cada uno de los 41 puntos evaluados.

a. Factor de lluvia (R)

El factor de lluvia o índice de erosividad pluvial (R) fue calibrado según los valores obtenidos en campo, luego de una serie de simulaciones y combinaciones efectuadas se pasó de los índices iniciales de 113, 158, 203, 248 y 293 para las isoyetas 250, 350, 450, 550 y 650 mm, respectivamente, de acuerdo al promedio de las ecuaciones específicas de Morgan (1974) y Foster, que consideran a la intensidad máxima en 30 minutos como variable principal; llegando a los índices calibrados finales de 134, 151, 169, 186 y 203 para las mismas isoyetas, estos últimos coeficientes obtenidos según el método de índice Fournier modificado y calibrado que se conectaron bien con las condiciones de campo.

Se inició la validación con la elaboración del mapa de isoyetas con nueve estaciones base en el ámbito de estudio, las mismas que arrojaron una consistente correlación lineal entre la altitud (h) y la precipitación (p) con un coeficiente de correlación alto de $r^2=0.8859$, según:

$$P_i = 0.2947 h_i - 827.97$$

Con dicha ecuación se generaron 150 puntos distribuidas en el área de la cuenca aportante de Aguada Blanca, con sus coordenadas UTM datum WGS-84, altitud y precipitación, según la ecuación indicada, para tener una adecuada interpolación de las isoyetas en el ámbito de la investigación con 159 puntos analizados, para finalmente sintetizar el proceso con el mapa de isoyetas en la cuenca aportante Aguada Blanca.

Se logró el factor R mediante la ecuación ajustada de Fournier con el factor 1.05, que se basó en cinco estaciones bases meteorológicas (Aguada Blanca, Pampa Arrieros, Frayle, Imata y Pañe), obteniendo la ecuación calibrada $R = 2.688 F^{1.065}$ (detallado el proceso en ítem 3.3.1,a), alcanzando una correlación consistente entre la precipitación (Pi) y el factor de lluvia (R), que recayó en la ecuación lineal $R = 0.1727 P + 90.969$, con alto coeficiente de correlación $r^2 = 0.999$, mostrado en Fig. 47.

En base a dicha ecuación ajustada de Fournier se obtuvieron los resultados del factor R para el modelo geoespacial de la cuenca aportante Aguada Blanca, obteniendo los datos de entrada R en el mapa de isoyetas con la debida consistencia.

Según análisis realizado, los coeficientes de los factores R, que fueron calibrados para diferentes precipitaciones, no se ajustaron adecuadamente a las ecuaciones recomendadas por

Morgan (1974) y Foster, sin embargo presentan buena confiabilidad según la ecuación modificada de Fournier $R = 2.688 F^{1.065}$ y exhiben una adecuada correlación lineal $R = 0.1727 Pi + 90.969$, con $r^2=0.99$ y verificadas con la erosión encontrada en campo en cada una de los 41 reglas; que respaldan dichos coeficientes para la cuenca aportante.

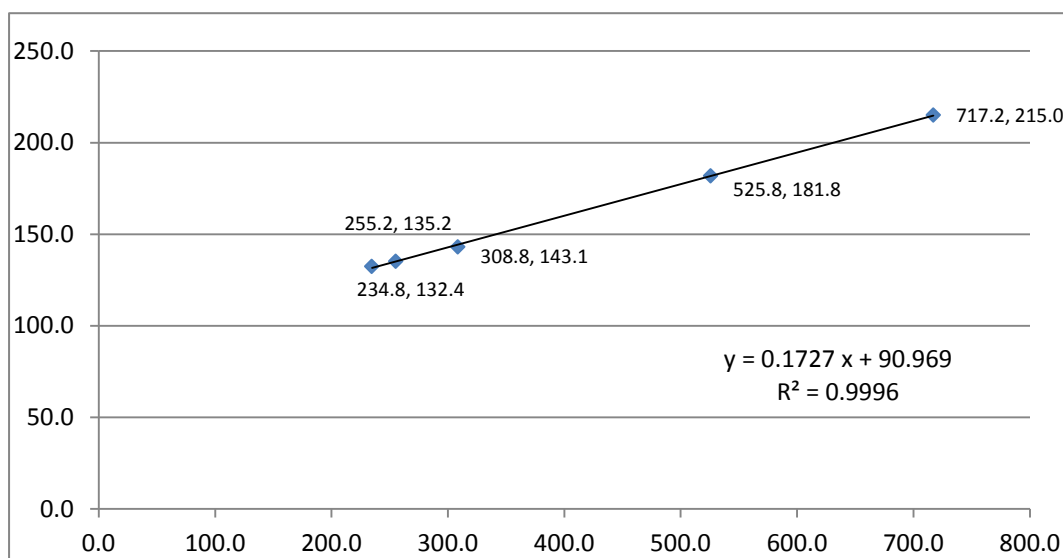


Figura 47: Correlación entre el factor R y la precipitación

b. Factor topográfico (LS)

Los resultados del factor topográfico (LS) fueron obtenidos según el procedimiento utilizado por la facultad de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes (Madrid) que se ajustaron adecuadamente a las condiciones de campo del ámbito de estudio con los valores en por ciento de 0.3, 1.5, 3.4, 5.6, 8.7, 14.6, 20.2, 25.2 y 28.5, para los grupos de pendientes 0-3, 3.01-12, 12.01-18, 18.01-24, 24.01-30, 30.01-60, 60.01-70 y 70.01-100 y más del 100; los mismos que fueron respaldados por los valores obtenidos de erosión en campo según mediciones efectuadas en las reglas milimetradas que fueron instaladas con fines de calibrar el modelo geoespacial del actual estudio de investigación.

Los índices desde los valores de 0.3 hasta 28.5 en el mapa de pendientes se ajustaron bien a las condiciones topográficas encontradas en campo en los 41 puntos de análisis de las reglas milimetradas y también se ajustaron adecuadamente en la calibración de los modelos referidos según la erosión medida en campo, cuya tabla de resultados del factor LS digitalizados en el mapa de pendientes se resume en Fig. 48.

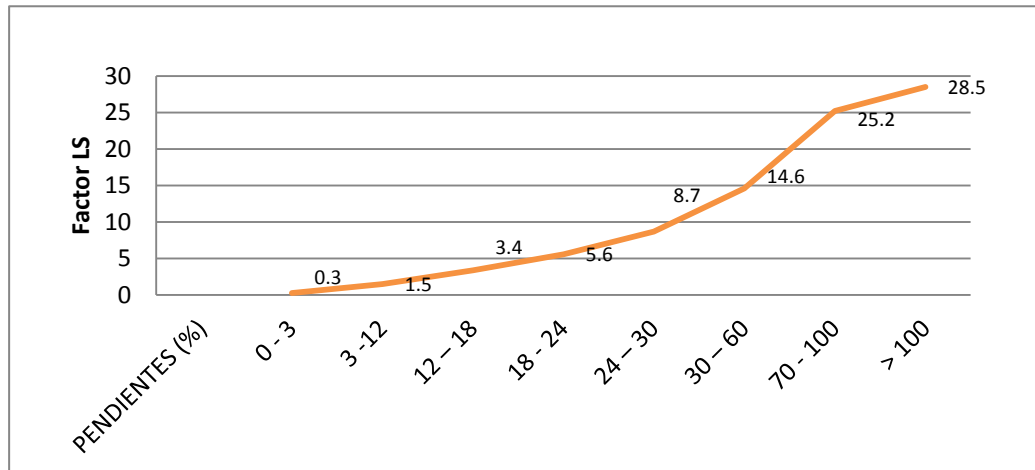


Figura 48: Factor LS, según la pendiente del terreno

c. Factor de erodabilidad del suelo (K)

Los resultados de la erodabilidad del suelo (K) fueron ajustadas por calibración con mediciones en reglas milimetradas en campo, pasando de valores iniciales de suelos estables con baja permeabilidad (0.28), suelos medianamente estables conformados por suelos aluviales con permeabilidad moderada – alta (0.3) y suelos inestables, con desprendimiento de rocas con posibilidad de desprendimiento de masas de suelo y permeabilidades moderadas – altas (0.48); los mismos que fueron validados en trabajo de investigación de Ramos (2001).

Los coeficientes calibrados fueron de 0.16 para suelos estables de estructura granular media, textura gruesa y gravosa con muy rápida permeabilidad y gran capacidad de infiltración; 0.24 para suelos estables con moderada permeabilidad y textura gruesa a media, por buena cohesión de partículas del suelo; 0.31 para suelos medianamente estables conformados por suelos aluviales de textura media, con cohesión mediana de las partículas y permeabilidad moderada; 0.39 para suelos poco estables conformados por suelos aluviales, textura media a fina, con estructura de bloques angulares y permeabilidad lenta y 0.52 para suelos inestables con desprendimiento de masas de suelo, de textura fina, con estructura de grano simple, bloques subangulares y permeabilidades muy lenta; en base a los valores de erosión laminar obtenidos en campo según análisis y calibración del modelo geoespacial.

Se realizaron los análisis de suelo en laboratorio apoyados del nomograma de Winschmeier y Smith (1978) y Paez y Pla (1985), para una mayor consistencia de la erodabilidad del suelo, para las condiciones del ámbito de estudio, con una serie de pasos descritos en el ítem 3.3.1 c.

Los análisis de suelos consistieron en 30 muestras extraídas de campo con la determinación de la clase textural del suelo estableciendo el porcentaje de arena, limo, arcilla, arena gruesa y arena muy fina, porcentaje de materia orgánica, densidad aparente (g/cm^3), estructura y permeabilidad.

La densidad aparente se estableció en campo por el método del cilindro, la estructura en función al tipo y acomodo de las partículas del suelo y la permeabilidad se realizó según metodología FAO y nomograma erodabilidad del suelo.

Se efectuaron en laboratorio los análisis de materia orgánica por el método de *Walkley and Black*, muestra de bodefal por calcinación y textura por el hidrómetro de Bouyucos.

Para suelos inestables, con movimiento de masas, de textura muy fina, alto porcentaje de limo y muy lenta permeabilidad se encontraron en las muestras analizadas y representativas de las reglas N° 8, 9, 21, 31 y 32, valores de la erosión del modelo muy similares a los valores de erosión medidos en campo; encontrando una correlación altamente confiable de $r^2 = 0.98$ y un coeficiente promedio para este tipo de suelos de 0.52, como se indica en el Cuadro 14.

Cuadro 14: Calibración del coeficiente 0.52, en base erosión medida en campo

N° de Regla	Erosión campo (T/ha/año)	Erosión modelo (T/ha/año)	F_K
8	50.60	50.60	0.48
9	208.50	167.50	0.53
21	73.00	73.00	0.53
29	132.00	122.76	0.48
31	80.00	80.00	0.48
32	98.00	98.00	0.60
$r^2 = 0.983$			0.52

Para suelos con desprendimiento de masas, textura fina-media y lenta permeabilidad de manera análoga se encontraron en las muestras representativas de las reglas N° 7, 24, 26, 30, 39, 40, 41, 44 y 45 valores de la erosión del modelo muy similares que los valores de erosión medidos en campo, encontrando una correlación altamente confiable de $r^2 = 0.988$ y un coeficiente promedio para este tipo de suelos de $K = 0.39$, como lo demuestran los valores del Cuadro 15.

Cuadro 15: Calibración del coeficiente 0.39, en base erosión medida en campo

N° de Regla	Erosión campo (T/ha/año)	Erosión modelo (T/ha/año)	F_K
7	61.20	61.65	0.37
24	140.00	123.25	0.39
26	22.60	22.60	0.37
30	5.70	5.70	0.39
39	57.50	57.50	0.40
40	79.80	79.80	0.40
41	82.80	82.80	0.40
44	132.00	132.00	0.40
45	132.00	132.00	0.39
$r^2 = 0.988$			0.39

Con metodología similar se realizaron los análisis de los demás tipos de suelo para encontrar los coeficientes respectivos, sintetizando en los resultados finales de los coeficientes, correlaciones y tipos de suelo.

d. Factor de cobertura vegetal (C)

Los resultados de los índices de cobertura vegetal (C), fueron calibradas en campo mediante las mediciones en reglas milimetradas instaladas para tal fin. Los valores iniciales, tomados como referencia de la tabla publicada por Wischmeier 1978, fueron de 0.02 para bofedales; 0.15 para pastos cultivados y naturales densos; 0.25 para *Parastrephia lepidophylla* (tólares); 0.35 para pajonal de puna predominancia Calamagrostis – Stipa (ichu); 0.45 para Canlly y 0.55 para cubierta inapreciable. Según la pradera encontrada en campo, los valores finales calibrados fueron de 0.01, 0.10, 0.22, 0.29, 0.46 y 0.51, respectivamente, pero en esta ocasión en relación a los rangos de los índices de vegetación normalizada (NDVI) de 0.283-0.525, 0.180-0.283, 0.116-0.180, 0.077-0.116, 0.048-0.077, (-0.023)-0.048, del NDVI bajadas de las imágenes satelitales del 2014 con los valores que se conectaron adecuadamente a las condiciones de campo, según la calibración de las reglas milimetradas efectuadas en campo desde febrero del 2015 hasta junio del 2016.

La calibración se realizó comparando la erosión del modelo con la erosión evaluada en campo a través de correlaciones lineales de cada uno de los coeficientes del factor C. Por ejemplo los resultados para el índice de cobertura vegetal (0.46) se muestran en Cuadro 16.

Cuadro 16: Calibración del índice 0.46 en base medición en campo

Nº Regla	Erosión campo (T/ha/año)	Erosión modelo (T/ha/año)	F_C
5	135.00	76.24	0.55
6	26.80	26.80	0.46
10	28.80	28.80	0.45
14	31.40	31.40	0.39
24	140.00	123.25	0.55
27	211.5	212.36	0.46
28	42.00	42.00	0.28
29	132.00	122.76	0.55
35	53.60	42.36	0.55
46	21.00	21.00	0.41
Herbazal Abierto			0.46

Para ver la confiabilidad de la calibración de los coeficientes del factor C (0.51, 0.46, 0.29, 0.22 y 0.16) se realizaron regresiones para cada uno de los coeficientes, en base a la comparación de la erosión obtenida del modelo y las mediciones realizadas en campo.

La calibración para cubierta inapreciable (Fig.49) se muestra en el Cuadro 17 y su regresión en la Fig. 50.

Cuadro 17: Calibración del coeficiente C = 0.51

Nº Regla	Campo	Modelo	F_C
1	23.24	27.18	0.40
9	208.50	167.50	0.55
15	62.80	13.38	0.55
36	101.60	48.00	0.55
Cubierta inapreciable			0.51



Figura 49: Cubierta inapreciable

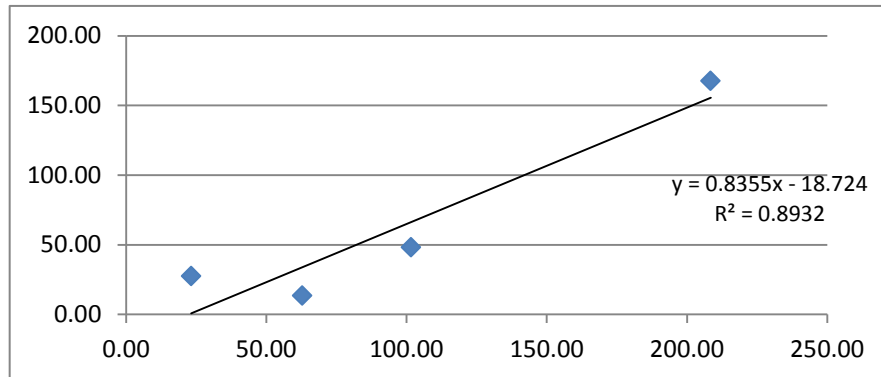


Figura 50: Regresión del coeficiente cubierta inapreciable C = 0.51

En la Fig. 51 se muestra la regresión para herbazal abierto, validación en campo (Fig.52) y su calibración en el Cuadro 18.

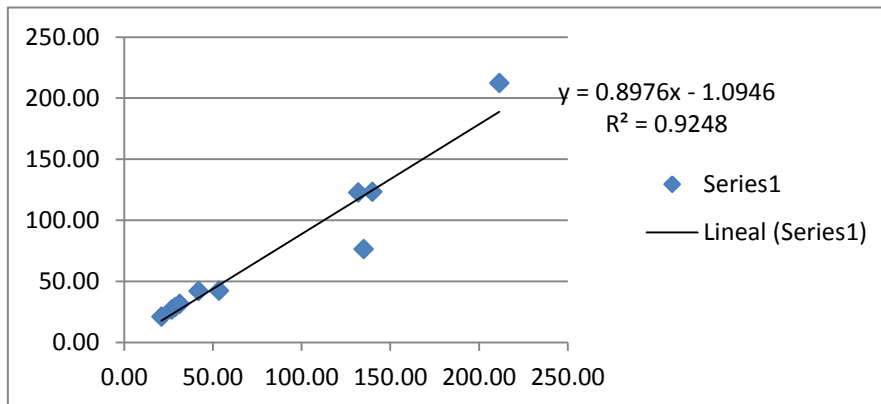


Figura 51: Regresión del coeficiente de herbazal abierto C = 0.46

Cuadro 18: Calibración del coeficiente C = 0.46

N° Regla	Campo	Modelo	F_C
5	135.00	76.24	0.55
6	26.80	26.80	0.46
10	28.80	28.80	0.45
14	31.40	31.40	0.39
24	140.00	123.25	0.55
27	211.5	212.36	0.46
28	42.00	42.00	0.28
29	132.00	122.76	0.55
35	53.60	42.36	0.55
46	21.00	21.00	0.41
Herbazal abierto (r2=0.92)			0.46



Figura 52: Herbazal abierto – Canly

La calibración para pajonal andino – predomina ichu (Fig.53) se muestra en el Cuadro 19 y su regresión en la Fig. 54.

Cuadro 19: Calibración del coeficiente $C = 0.27$

N° Regla	Campo	Modelo	F_C
2	28.20	28.20	0.27
4	46.20	46.20	0.30
7	61.20	61.65	0.29
8	50.60	50.60	0.18
11	42.30	85.08	0.29
21	73.00	73.00	0.27
25	13.80	13.80	0.29
31	80.00	80.00	0.29
32	98.00	98.00	0.28
39	57.50	57.50	0.25
40	79.80	79.80	0.21
41	82.8	82.80	0.22
44	132	132	0.39
Pajonal Andino - <i>Calamagrostis</i> - <i>Stipa</i>			0.27



Figura 53: Pajonal andino – Ichu

La regresión para pajonal andino – predomina tola (Fig.55) se muestra en la Fig. 56.

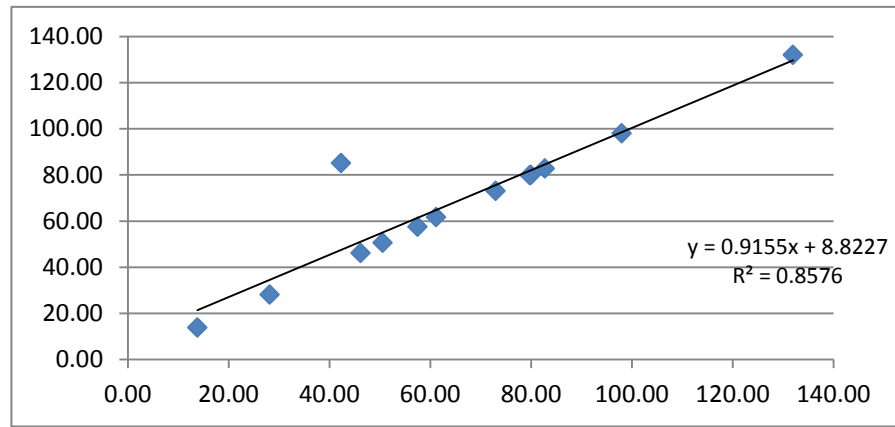


Figura 54: Regresión del coeficiente pajonal andino, predomina Ichu, $C = 0.27$



Figura 55: Pajonal andino con preponderancia de *Parastrephia lepidophylla* (tola)

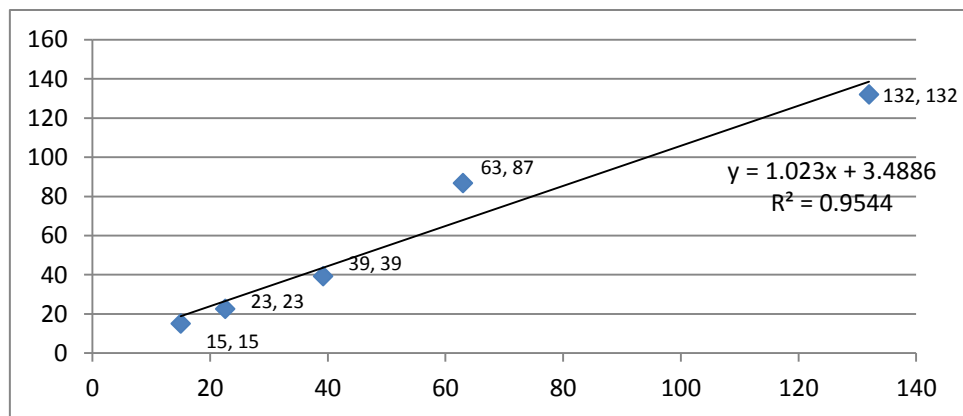


Figura 56: Regresión del coeficiente pajonal andino – tola, $C = 0.22$

La regresión para turbera (Fig.57) se muestra en la Fig. 58.



Figura 57: Bofedal

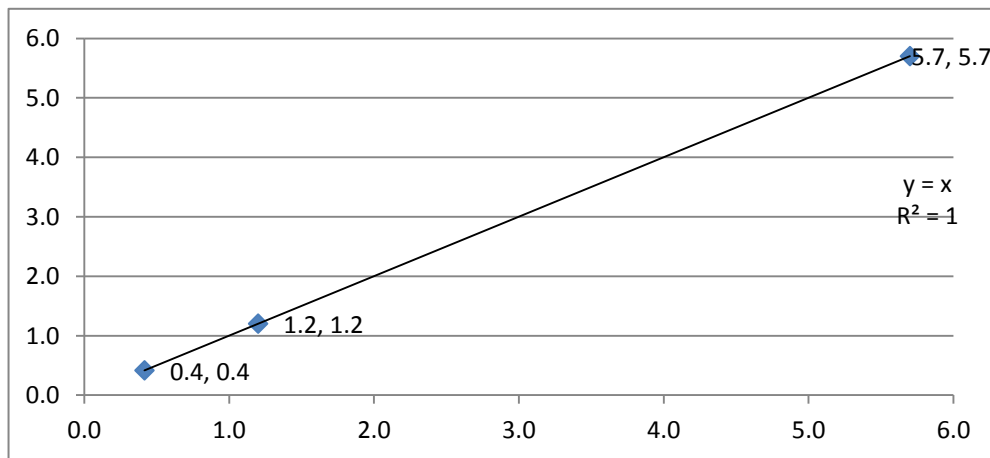


Figura 58: Regresión del coeficiente turbera, $C = 0.01$

Los resultados de los demás coeficientes promedio del factor C se obtuvieron con buena confiabilidad (correlaciones superiores al 85 por ciento) con validación similar de evaluación de erosión en campo; resumidos los corolarios de los coeficientes promedio según el tipo de cobertura e índices del NDVI.

Los índices del factor C fueron calibrados en base a la cobertura vegetal obtenida según el DNVI que fueron bajadas de imágenes satelitales *Landsat* TM 2014 y contrastadas con las evaluadas en campo; obteniendo coeficientes de correlaciones superiores al 85 por ciento al comparar la erosión del modelo con las erosión obtenida en campo en cada uno de los coeficientes del factor C, considerando dichos coeficientes valederos para cobertura vegetal y pisos altitudinales similares en las cuencas del país.

En ANEXO 8, se presenta la calibración ampliada de los coeficientes USLE del MC78.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 COEFICIENTE CALIBRADOS DE LOS FACTORES USLE

Los resultados de los coeficientes se sintetizan en los índices de R, LS, K y C, cuyo proceso metodológico se describió en ítem 3.3.1 a, b, c y d, respectivamente, y cuyos corolarios de calibración de los factores referidos del modelo MC78 con sus respectivas área se indican a continuación.

4.1.1 Factor lluvia (R)

Se obtuvieron los coeficientes del factor R para el modelo geoespacial de la cuenca aportante Aguada Blanca debidamente calibrados, que van desde los valores de 134 hasta 203 para 250 mm a 650 mm con sus respectivas áreas, los mismos que fueron digitalizados en el mapa de isoyetas y resumidos en el Cuadro 20.

Cuadro 20: Factor R según isoyetas determinadas

<i>Isoyetas (mm)</i>	<i>Factor _ R</i>	<i>Area (ha)</i>
250	134	1 082
350	151	62 059
450	169	199 117
550	186	129 147
650	203	10 255

4.1.2 Factor topográfico (LS)

Los resultados de los coeficientes del factor LS, debidamente calibrados, variaron significativamente desde 0.3 hasta 28.5, en las pequeñas unidades del área de análisis del Modelo Digital de Elevación (DEM) por la topografía con pendientes muy pronunciadas y relieve agreste del territorio de la cuenca en estudio, resumidos en el Cuadro 21.

Cuadro 21: Factor LS según DEM

Grupos de Pendientes (por ciento)	Factor LS	Área (ha)
0 - 3	0,3	15 980
3 -12	1,5	161 867
12 – 18	3,4	83 245
18 - 24	5,6	55 023
24 – 30	8,7	32 969
30 – 60	14,6	47 918
60 - 70	20,2	2 242
70 - 100	25,2	2 133
> 100	28,5	283

4.1.3 Factor de erodabilidad del suelo (K)

Los coeficientes del factor K, según la erosión calibrada en campo, muestran índices desde 0.16 para suelos estables de textura gruesa y alta permeabilidad hasta 0.52 para suelos inestables con movimiento de masas, textura fina (alto por ciento limo) y muy lenta permeabilidad, con sus respectivas áreas, los mismos que son representativos del ámbito de estudio y constituyen los datos de entrada del mapa de erodabilidad del modelo (Cuadro 22).

Cuadro 22: Factor K según análisis del suelo

Descripción del suelo	Factor K	Área (ha)
Suelo estable, textura gruesa y rápida permeabilidad	0.16	19 479
Suelo estable, franco arenoso y permeabilidad moderada a rápida	0.24	13 971
Medianamente estable, suelo franco y permeabilidad moderada	0.31	65 103
Desprendimiento de suelo, textura fina media y lenta permeabilidad	0.39	173 251
Movimiento de masas, textura fina, alto por ciento limo, y muy lenta permeabilidad	0.52	1242

4.1.4 Factor de cobertura vegetal (C)

Los coeficientes de cobertura vegetal en base al NDVI 2014, muestran los resultados calibrados, desde 0.51 para cubierta inapreciable hasta 0.01 para bofedales, correspondientes áreas, resumidos en el Cuadro 23.

Cuadro 23: Factor C según cobertura vegetal.

Cobertura Vegetal representativa en campo	Factor_C	Área (ha)
Cubierta inapreciable	0.51	85 375
Herbazal abierto predominancia de cubierta muy escasa sobrepastoreada, predomina Tetraglochim cristatum (canlly)	0.46	142 793
Pajonal andino, predominancia del Calamagrostis - Stipa (ichu)	0.29	119 668
Pajonal andino, predominancia de Parastrephia lepidophylla (tola), pradera herbácea medianamente densa	0.22	37 898
Pajonal andino, predominancia de gramíneas y gramíoides (césped), pradera herbácea densa	0.10	10 035
Turberas – bofedales, predomina Distichia muscoides	0.01	5 322

4.2 NIVELES DE EROSIÓN EN MODELOS

4.2.1 Coeficientes USLE calibrados en modelos

Se muestran los resultados de los índices R, LS, K y C para el modelo de erosión calibrado 78 (MC78) y escenarios debidamente calibrados en base a la erosión encontrada en campo (T/ha/año). Por ejemplo, para la zona de análisis en regla N°1 se tiene un R = 151, LS = 1.5, K = 0.3, C= 0.4 y cuyos demás corolarios se presentan en el Cuadro 24.

Se expresan los resultados de los índices calibrados y digitalizados en los polígonos de sus mapas respectivos de isoyetas (R) y pendientes (LS), con la superposición de ambos mapas referidos en el modelo MC78. De manera similar se ejecutó la superposición de los resultados de los índices K (0.16, 0.24, 0.31, 0.39 y 0.52) y C (0.01, 0.22, 0.29, 0.46 y 0.51) calibrados, reportando los valores respectivos en cada uno de los polígonos que lo contiene en su correspondiente mapa y posteriormente en el mapa de la intersección de los cuatro factores referidos del modelo de erosión calibrado - MC78.

Cuadro 24: Resultados de los índices R, LS, K y C, en el ámbito de estudio

N° Regla	Erosión Campo	Modelo MC78	Factor_R	Factor_LS	Factor_K	Factor_C
1	23.24	27.18	151.00	1.50	0.30	0.40
2	28.20	28.20	151.00	3.40	0.20	0.27
4	46.20	46.20	151.00	3.40	0.30	0.30
6	26.80	26.80	151.00	1.50	0.26	0.46
7	61.20	61.65	169.00	3.40	0.37	0.29
8	50.60	50.60	169.00	3.40	0.48	0.18
9	208.50	167.50	169.00	3.40	0.53	0.55
10	28.80	28.80	169.00	1.50	0.25	0.45
13	1.08	1.03	169.00	3.40	0.18	0.01
14	31.40	31.40	169.00	1.50	0.32	0.39
16	39.20	39.20	169.00	3.40	0.32	0.21
17	0.22	0.23	151.00	1.50	0.10	0.01
18	94.50	106.97	151.00	5.60	0.23	0.55
21	73.00	73.00	151.00	3.40	0.53	0.27
24	140.00	123.25	169.00	3.40	0.39	0.55
25	13.80	13.80	169.00	1.50	0.19	0.29
26	22.60	22.60	186.00	1.50	0.37	0.22
27	211.50	212.36	186.00	14.60	0.17	0.46
28	42.00	42.00	186.00	3.40	0.24	0.28
29	132.00	122.76	186.00	2.50	0.48	0.55
30	5.70	5.70	169.00	8.70	0.39	0.01
31	80.00	80.00	169.00	3.40	0.48	0.29
32	98.00	98.00	169.00	3.40	0.60	0.28
35	53.60	42.36	151.00	3.40	0.15	0.55
39	57.50	57.50	169.00	3.40	0.40	0.25
40	79.80	79.80	169.00	5.60	0.40	0.21
41	82.80	82.80	169.00	5.60	0.40	0.22
43	15.00	15.00	151.00	1.50	0.29	0.23
44	132.00	132.00	151.00	5.60	0.40	0.39
45	132.00	132.00	169.00	8.70	0.39	0.23
46	21.00	21.00	169.00	1.50	0.20	0.41

Se complementa los resultados de los índices de los factores K y C con los reportes específicos de las zonas calibradas del mapa Intersec K_C_ del modelo de erosión calibrado (MC78). Por ejm la Fig. 59 muestra la evaluación y la Fig. 60 los resultados de la calibración de la regla N°1, donde el índice $K = 0.3$ y $C = 0.4$.

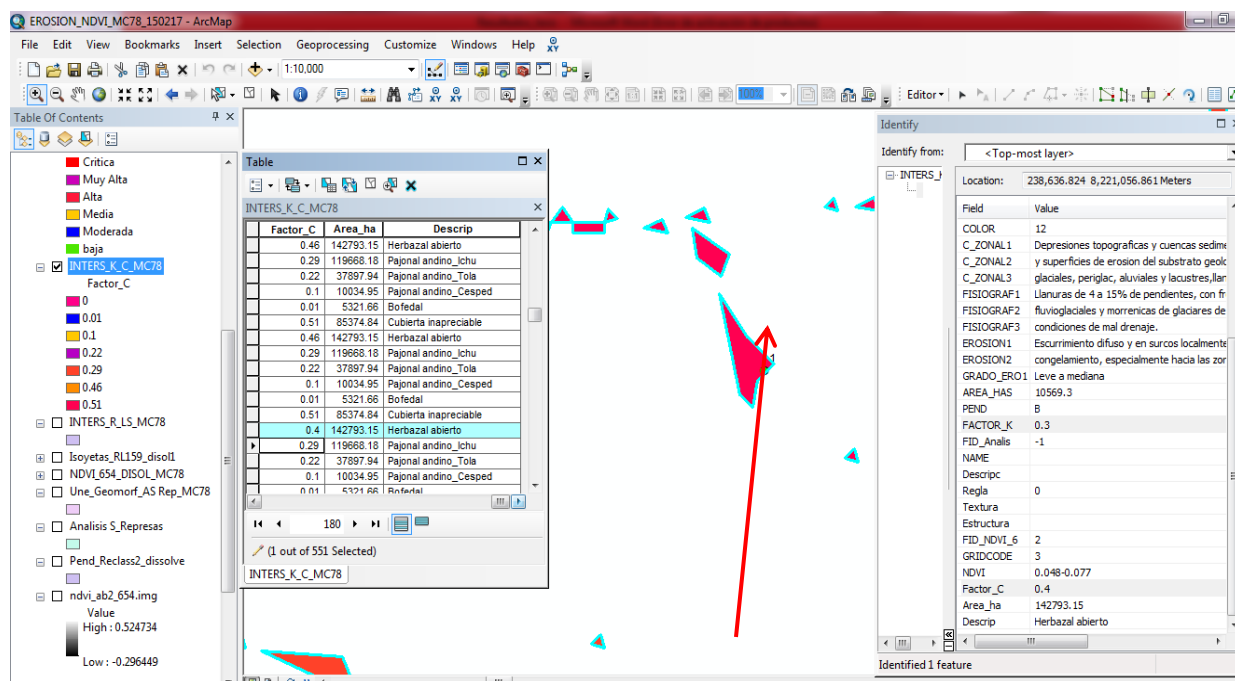


Figura 59: Evaluación N°1, con factores K y C en mapa de Intersec K_C_MC78



Figura 60: Calibración N°1, suelos medianamente estable y herbazal abierto

En las Fig. 61 y 62 se muestran los índices de K y C en zona de turbera, para la regla N° 13.

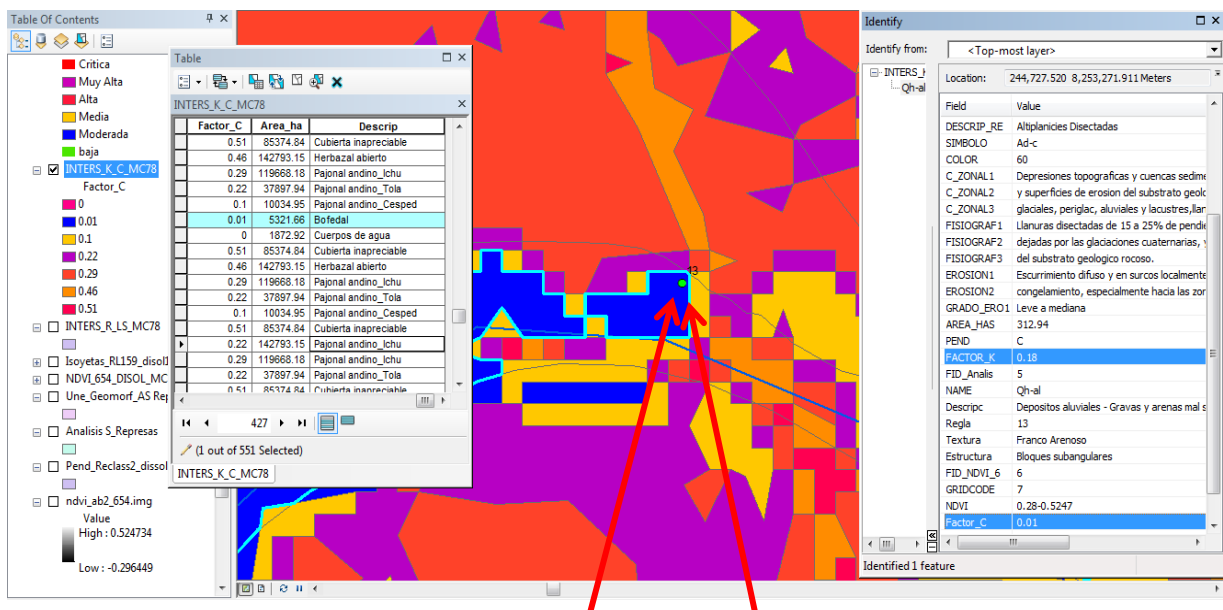


Figura 61: Evaluación N°13, con resultados del Factor K y C



Figura 62: de Calibración N° 13, en zona de turbera

En las Fig. 63 y 64 se muestran los índices de K= 0.6 en suelo volcánico erosivo con textura franca limosa y C = 0.28, para la regla N° 32.

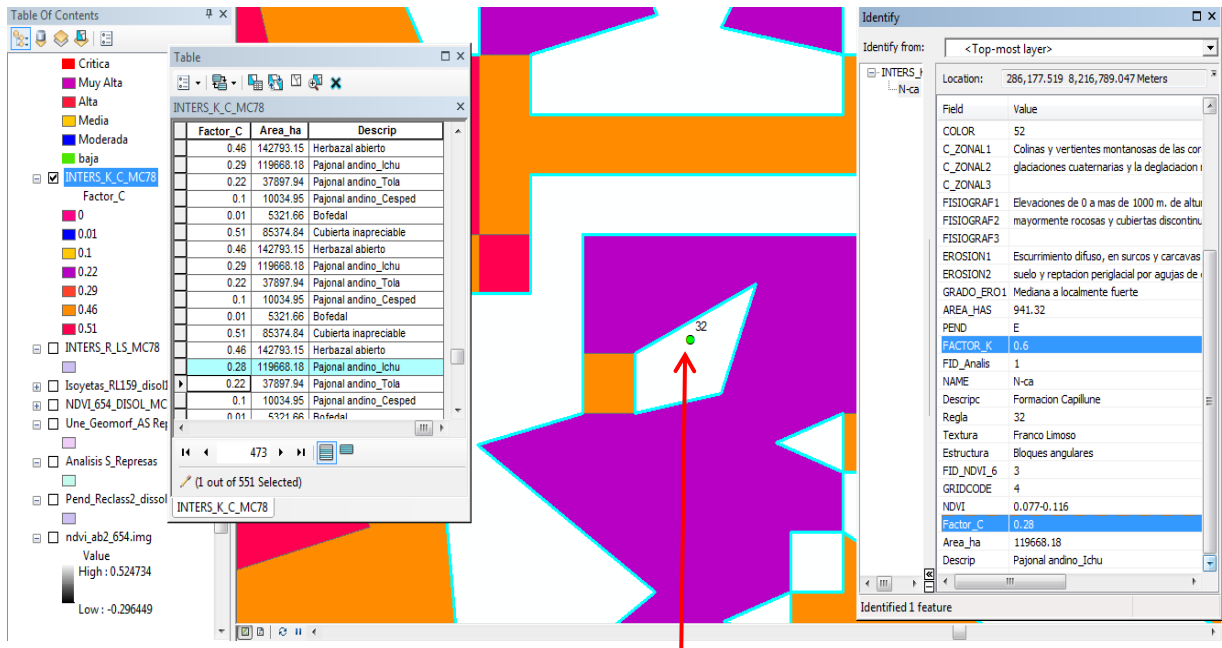


Figura 63: Evaluación N°32, con resultados del Factor K y C



Figura 64: Calibración N°32, suelo volcánico erosivo con textura franco limoso

En las Fig. 65 y 66 se muestran los índices de K y C con pajonal andino, para la regla N° 44.

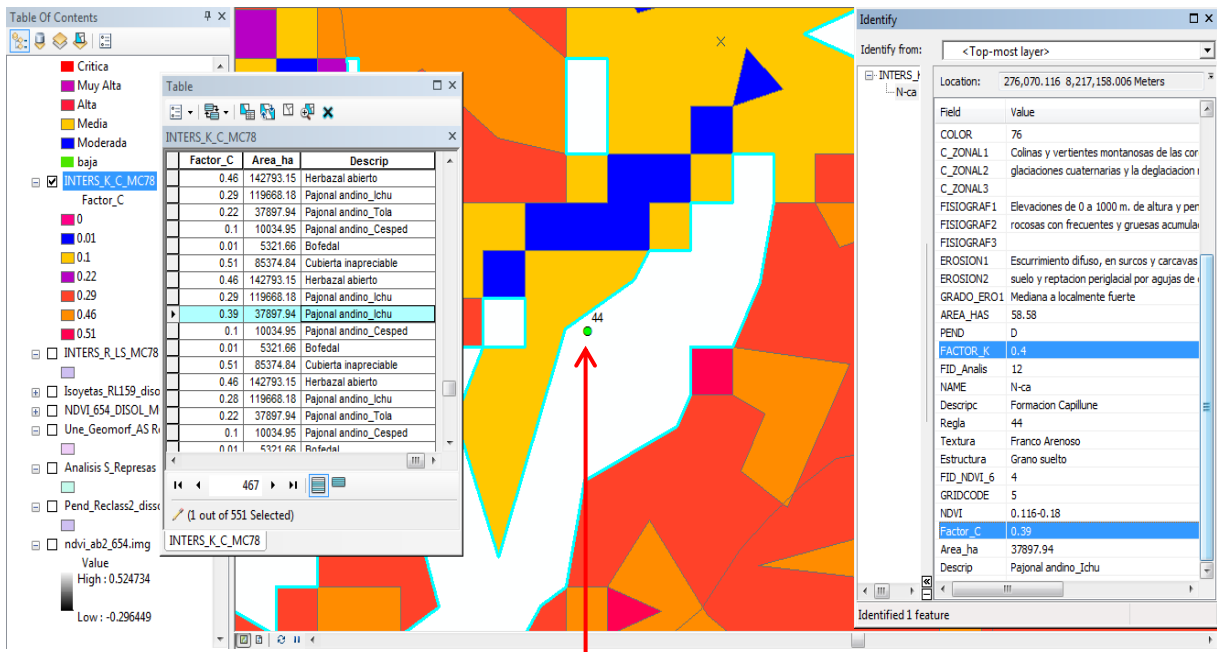


Figura 65: Evaluación N°44, con resultados del Factor K y C



Figura 66: Calibración N°44, pajonal andino con primacía de *Calamagrostis – Stipa*

La erosión del modelo calibrado - MC78 alcanzo una área de 88 477.59 ha de erosión crítica (mayor de 200 T/ha/año) hasta 13 189.48 ha de erosión baja (menos de 5 T/ha/año baja)

En el ANEXO 9 se presentan los resultados del modelo de erosión calibrado - MC78.

De manera similar se procesaron los índices de los cuatro factores (R, LS, K y C) que fueron calibrados en el modelo de erosión MC80 - NDVI 2001 en los diferentes puntos señalados, según la erosión medida en sus correspondientes reglas milimetradas, reportando los mismos valores calibrados en cada uno de los polígonos que lo contiene en el mapa de la Intersec

R_LS_MC80 de manera satisfactoria, es decir los valores de los índices son los mismos para los 03 factores en ambos modelos, lo que cambia básicamente el proceso entre un modelo y otro en el tiempo son las coberturas vegetales en los polígonos geoespaciales.

Los mapas de isoyetas, pendientes y erosionabilidad son los mismos de los modelos de erosión calibrados MC78 y MC80, lo que cambia entre ambos modelos es el mapa de cobertura vegetal, por lo cual se formuló otro mapa de cobertura vegetal con su tabla de atributos que contiene los índices calibrados de F_C (0.01, 0.22, 0.29, 0.46 y 0.51), según los prototipos del NDVI 2001, como se puede visualizar en Fig. 67, con los resultados en su tabla de atributos

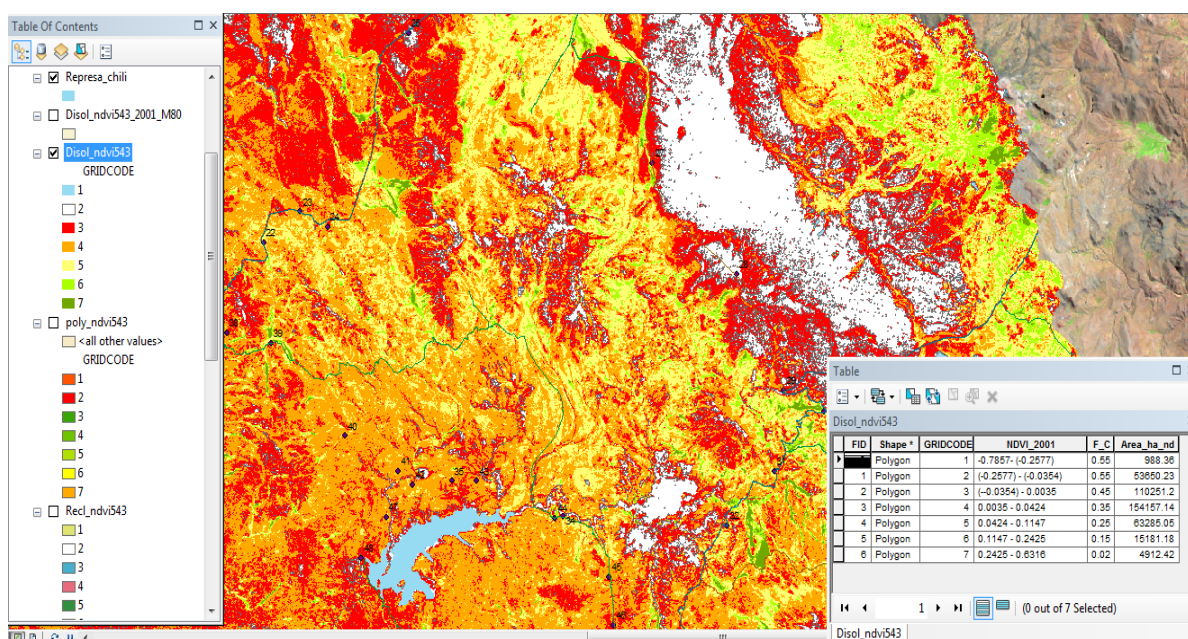


Figura 67: Mapa de cobertura vegetal con su tabla de atributos

4.2.2 Índice de precipitación estandarizado

Se analizó el nivel de precipitación del 2015 con su serie hidrológica y si corresponde a un año normal, seco o húmedo mediante el método del porcentaje de precipitación normal (PPN). Los resultados indicaron que el 2015 fue un año normal respecto de la serie histórica analizada (64-2014). También se analizó por el método del índice de precipitación estandarizado (IESP), que según la revisión bibliográfica, muestra una mayor consistencia en los resultados, resumido en:

$$ZAPAc_i = \frac{APAc_i - \overline{APAc}}{\sigma APAc}$$

La anomalía pluviométrica acumulada estandarizada del mes i ($ZAPAc_i$) está en función:

- Anomalía pluviométrica acumulada del mes i ($APAc_i$).
- Valor medio de las anomalías pluviométricas acumuladas de todos los meses de la serie de análisis 64-2015 (\overline{APAc}).
- Desviación típica de las anomalías pluviométricas acumuladas de todos los meses de la serie analizada ($\sigma APAc$).

Reportando como resultado una sequía moderada, específicamente en las estaciones meteorológicas: Aguada Blanca (IESP = -1.07), Frayle (IESP = -0.61), Pampa Arrieros (IESP = -0.40), Pillones (IESP = -0.89) e Imata (IESP = -0.89), que representan a la zona de estudio. En el ANEXO 10 se presentan los resultados del índice de precipitación estandarizada y PPN.

4.2.3 Erosión en modelo MC78

Los resultados del modelo calibrado -MC78 caracterizado por el NDVI 2014 fueron agrupados por el nivel de erosión crítica, muy alta, alta, media, moderada y baja según USLE, logrando como resultado el mapa de erosión hídrica consolidado en base al producto de la superposición de los cuatro mapas bases (isoyetas, pendientes, erosionabilidad y cobertura vegetal).

El grado de erosión de la cuenca aportante Aguada Blanca, con un nivel de erosión crítica (mayor de 200 T/ha/año) asciende a 88,477.59 ha y representa el 22.40 por ciento respecto de la superficie total, la erosión muy alta alcanza las 70,942.95 ha, erosión alta muestra 76,281.81 ha y erosión media, moderada y baja según valores mostrados en la Fig 68.

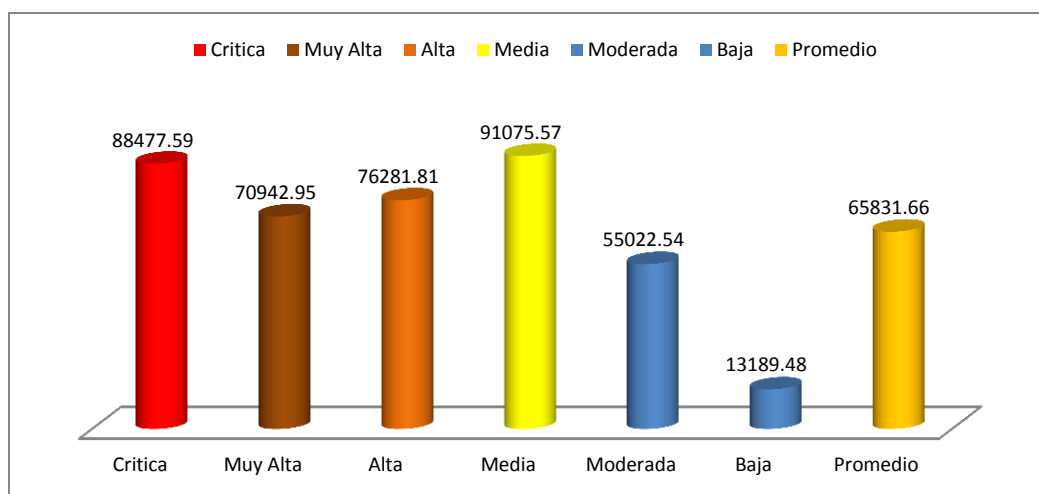


Figura 68: Nivel de erosión del MC78 - (ha)

Se indica el detalle de los resultados con la tasa anual de erosión del modelo que están por encima de la erosión promedio y de la máxima tasa anual de erosión recomendada por ICONA (12.5 T/ha/año) y FAO (11.2 T/ha/año), con sus correspondientes reportes de erosión crítica, muy alta y alta en el mapa de erosión geoespacial consolidado.

a. Áreas con tasa de erosión anual > 200 T/ha/año

Los resultados de la erosión crítica con valores mayores a 200 T/ha/año en el mapa consolidado de erosión por el metodo de USLE, muestran una gran cantidad de poligonos que ascienden a 1667 y una área de 88 477.59 ha, que representa el 22.4 por ciento del área total con un promedio de 53.076 ha por cada poligono (Fig. 69).

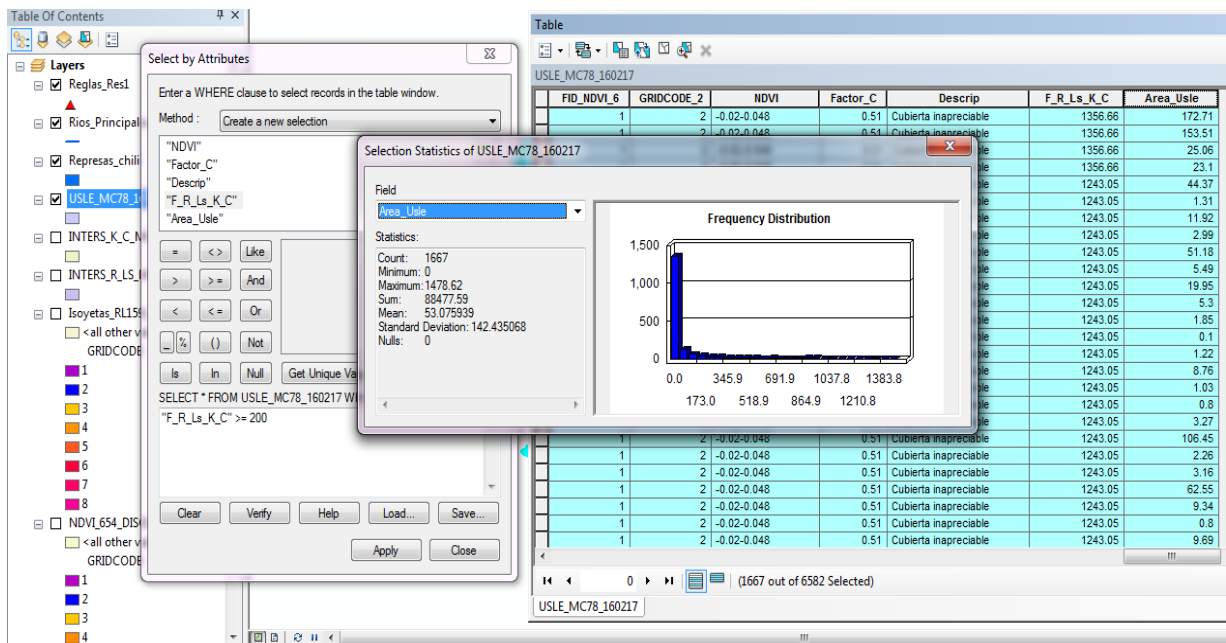


Figura 69: Resultados de áreas de erosión mayores de 200 T/ha/año

b. Áreas con tasa de erosión anual > 100.01 - 200 T/ha/año

En el mapa consolidado de erosión USLE, los resultados de erosión muy alta (valores entre 100.01 y 200 T/ha/año), muestran una área de 70,942.95 ha, representando el 17.96 por ciento.

c. Áreas con tasa de erosión anual > 50.01 - 100 T/ha/año

En el mapa consolidado de erosión USLE, los resultados de la erosión alta (valores entre 50.01 y 100 T/ha/año), muestran una área de 76, 281.81 ha, que representa el 19.31 por ciento.

En el ANEXO 11 se presentan los mapas de erosión georeferenciados del modelo MC78.

4.2.4 Erosión en modelo MC80

Los corolarios del modelo de erosión calibrado 80 (MC80) caracterizado por el NDVI obtenido de imagen satelital Landsat 2001, cuyo producto resultante de la superposición de los cuatro mapas es el mapa consolidado de erosión del ámbito de estudio, fueron agrupados por el grado de erosión en crítica, muy alta, alta, media, moderada y baja, según USLE.

El grado de erosión de la cuenca aportante Aguada Blanca, con un nivel de erosión crítica (mayor de 200 T/ha/año) asciende a 77,758.17 ha y representa el 19.69 por ciento respecto de la superficie total, la erosión muy alta alcanza las 65,978.58 ha, erosión alta 79,799.9 ha y erosión media, moderada y baja según valores revelados en la Fig. 70.

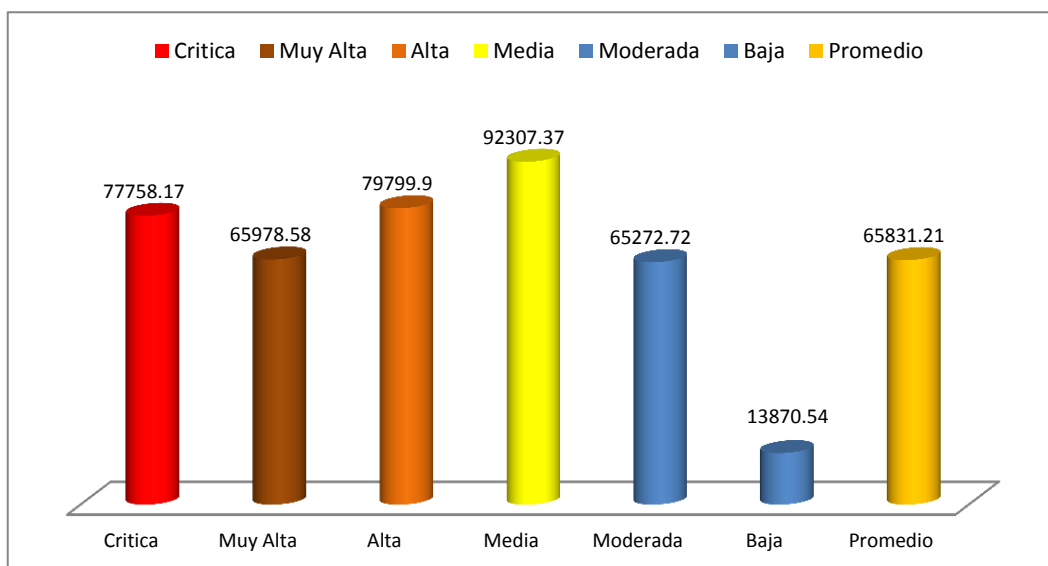


Figura 70: Nivel de erosión del MC80 - (ha)

El detalle de los resultados con la tasa anual de erosión del modelo que están por encima de la erosión promedio y principalmente de la máxima tasa anual de erosión recomendada por ICONA (12.5 T/ha/año) y FAO (11.2 T/ha/año), con sus correspondientes reportes de erosión crítica, muy alta y alta en el mapa de erosión geoespacial consolidado.

a. Tasa de erosión anual > 200 T/ha/año

En el mapa consolidado de erosión por el método de USLE, los resultados de la erosión crítica (valores mayores a 200 T/ha/año), muestran una gran cantidad de polígonos que ascienden a 1836 y una área de 77 758.17 ha, que representa el 19.69 por ciento del área total, con un promedio de 42.35 ha por cada polígono, como se muestra en la Fig. 71.

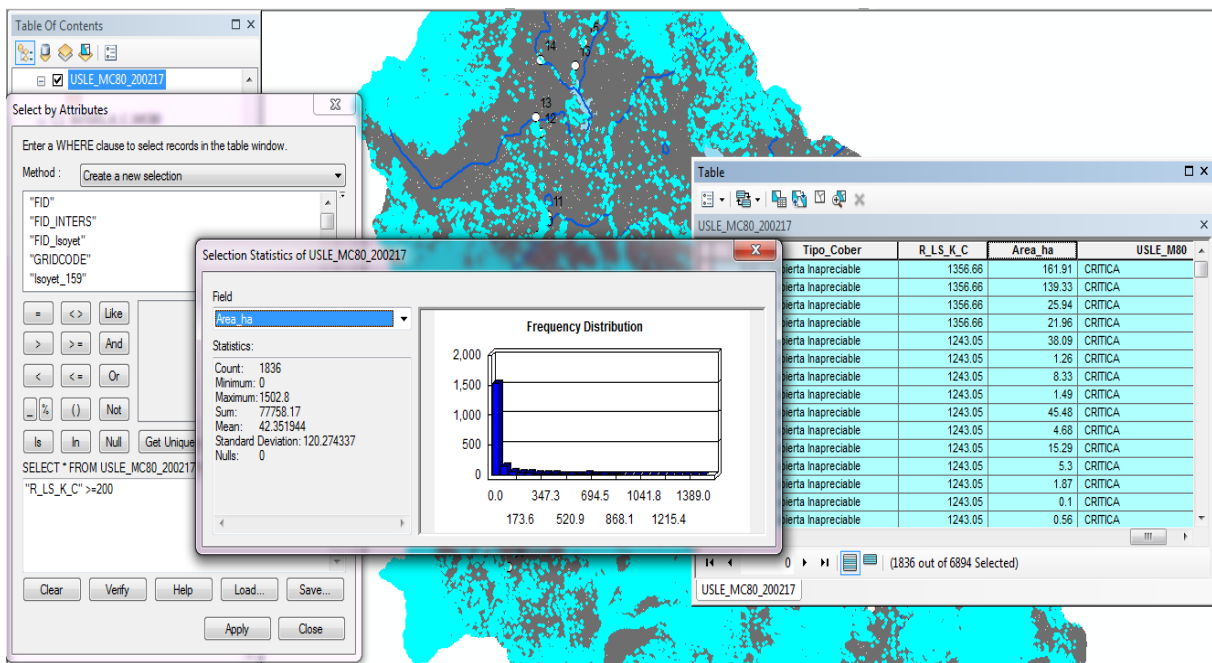


Figura 71: Erosión crítica mayor de 200 T/ha/año_MC80

b. Tasa de erosión anual muy alta > 100.01 - 200 T/ha/año

En el mapa consolidado de erosión, los resultados de la erosión muy alta (valores entre 100.01 y 200 T/ha/año), muestran una área de 65,978.58 ha, que representa el 16.70 por ciento.

c. Tasa de erosión anual alta > 50.01 - 100 T/ha/año

En el mapa consolidado de erosión, los resultados de la erosión alta (50.01-100 T/ha/año) muestran una área de 79,799.9 ha, que representa el 20.20 por ciento del total.

En el ANEXO 12 se muestran los mapas de erosión georeferenciados del modelo-MC80.

4.2.5 Erosión de la cuenca aportante Aguada Blanca

Los resultados de la erosión de cada una de las tres fases del proceso descrito fueron de manera diferenciada, según los atributos del mapa de erosión generado para cada fase.

Los corolarios de erosión en la fase I (2002-2006), muestran los diferentes niveles de erosión crítica, muy alta, alta, media, moderada y baja del modelo MC80. La erosión crítica muestra el área de 53,742.82 ha, representando el 18.5 por ciento del total (289,971.05 ha) y los valores de las otras erosiones se indican en la Fig. 72.

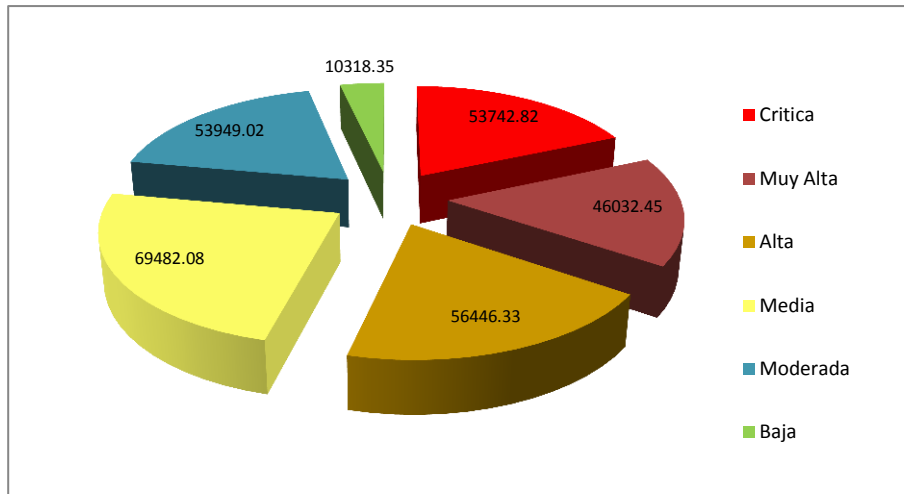


Figura 72: Niveles de erosión en fase I (ha)

Los efectos de erosión de la fase II (2006-2010), enseñan los diferentes niveles de erosión crítica, muy alta, alta, media, moderada y baja del modelo MC78. En esta ocasión la erosión crítica muestra el área de 55,413.5 ha, representando el 19.1 por ciento del total y los valores de las otras erosiones se indican en la Fig. 73.

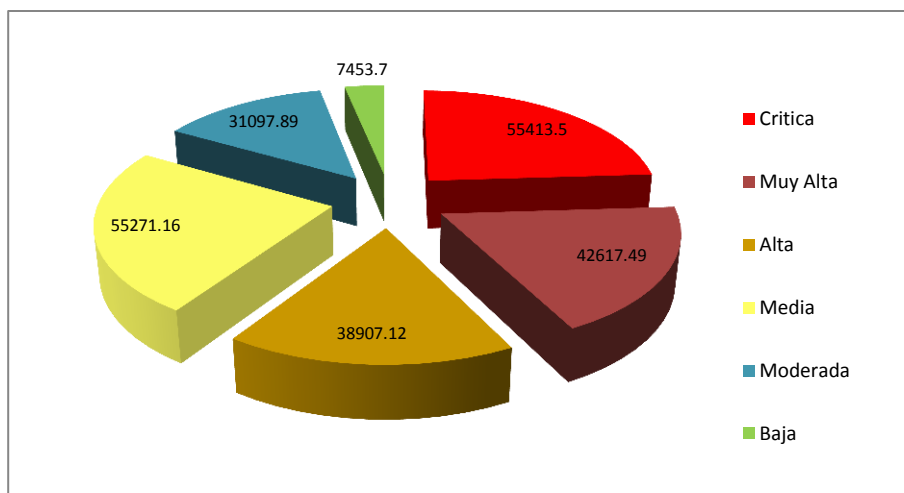


Figura 73: Niveles de erosión en fase II (ha)

Los resultados de erosión de la fase III (2010-2015), exteriorizan los diferentes niveles de erosión crítica, muy alta, alta, media, moderada y baja del modelo MC78. La erosión crítica muestra el área de 52,071.88 ha, representando el 18 por ciento del total y los valores de las otros niveles de erosión siguen diferente tendencia que las fases anteriores (Fig. 74).

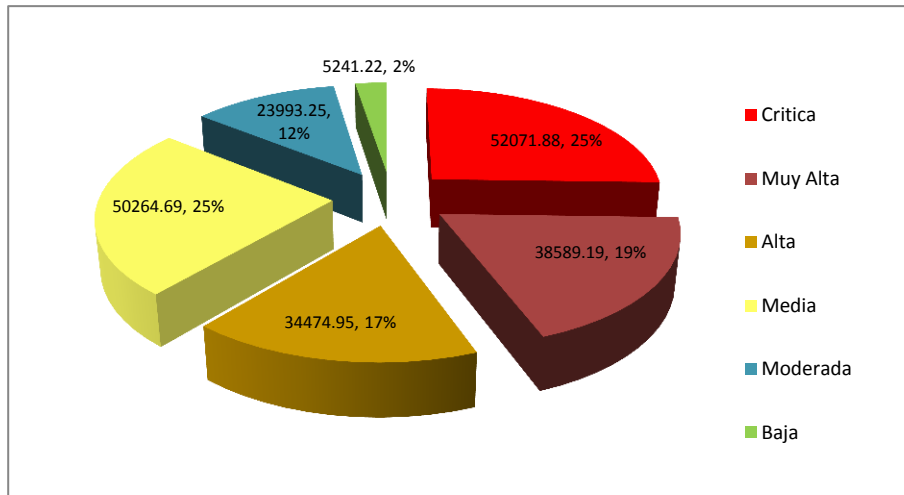


Figura 74: Niveles de erosión en fase III (ha)

a. Erosión en la cuenca aportante Aguada Blanca del 2002-2006

En esta primera fase del 2002 al 2006 los resultados de erosión, área (ha) y otros corresponden a los atributos del modelo MC80 con NDVI 2001 en el ámbito respectivo (área de cuenca menos área de la subcuenca del río Blanco).

Los corolarios muestran los valores mínimo, máximo, medio y suma total que alcanza el área erosionada de 289,972.87 ha y que al relacionar con la erosión total indica una tasa media de erosión de 125.145 T/ha/año, para la colmatación de sedimentos del embalse Aguada Blanca. Los efectos muestran los niveles de erosión crítica (53,742.82 ha), muy alta (46,032.45 ha), alta (56,446.33 ha), media (69,482.08 ha), moderada (53,949.02 ha) y baja (10318.35 ha), en el área aportante de la fase I (Fig. 75).

b. Erosión en la cuenca aportante Aguada Blanca del 2006-2010

Los resultados de erosión (T/ha) y otros en la segunda fase corresponden a los atributos del modelo MC78 con NDVI 2014 en su respectiva área (área de cuenca menos área de influencia de sedimentación del embalse Frayle y Pillones).

Los corolarios indican los valores mínimo, máximo, medio y el área erosionada total de 230,760.99 ha y una tasa de erosión media de 154.942 T/ha/año, en el ámbito referido. Los reportes muestran niveles de erosión crítica con 55,413.5 ha, muy alta (42,617.16 ha), alta (38907.12 ha), media (55271.16 ha), moderada (31,097.89 ha) y baja (7453.7 ha), en el área

aportante del 2006-2010, visualizándose en la Fig. 76 dichos niveles de erosión a la llegada del embalse Aguada Blanca.

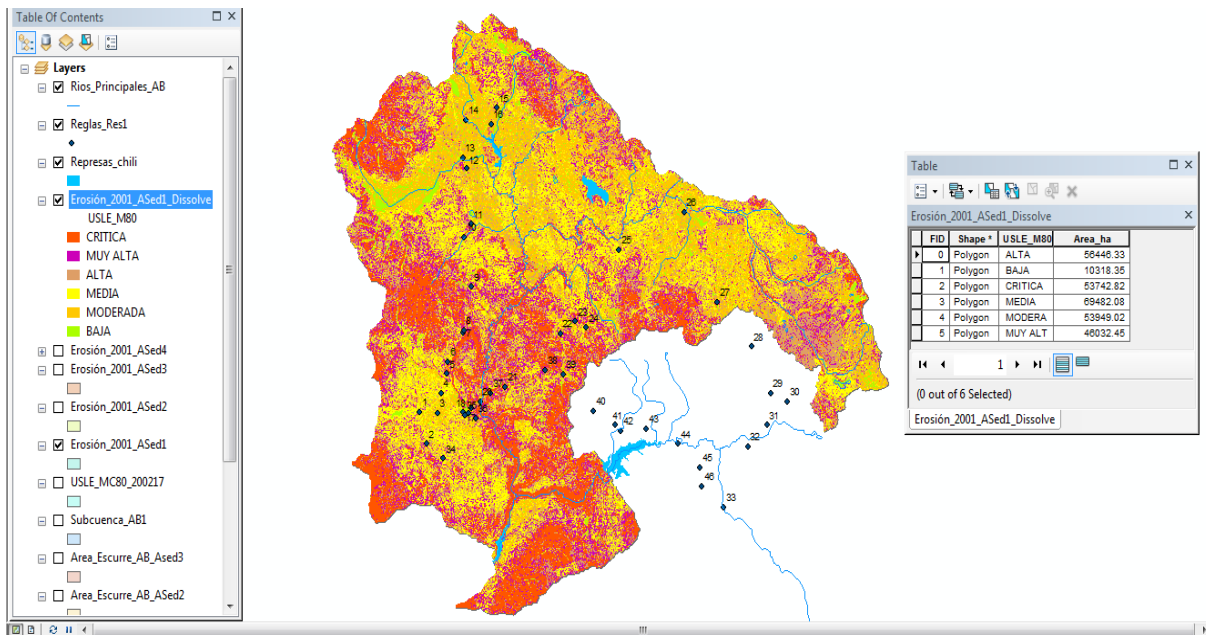


Figura 75: Resultados de niveles de erosión en la fase I

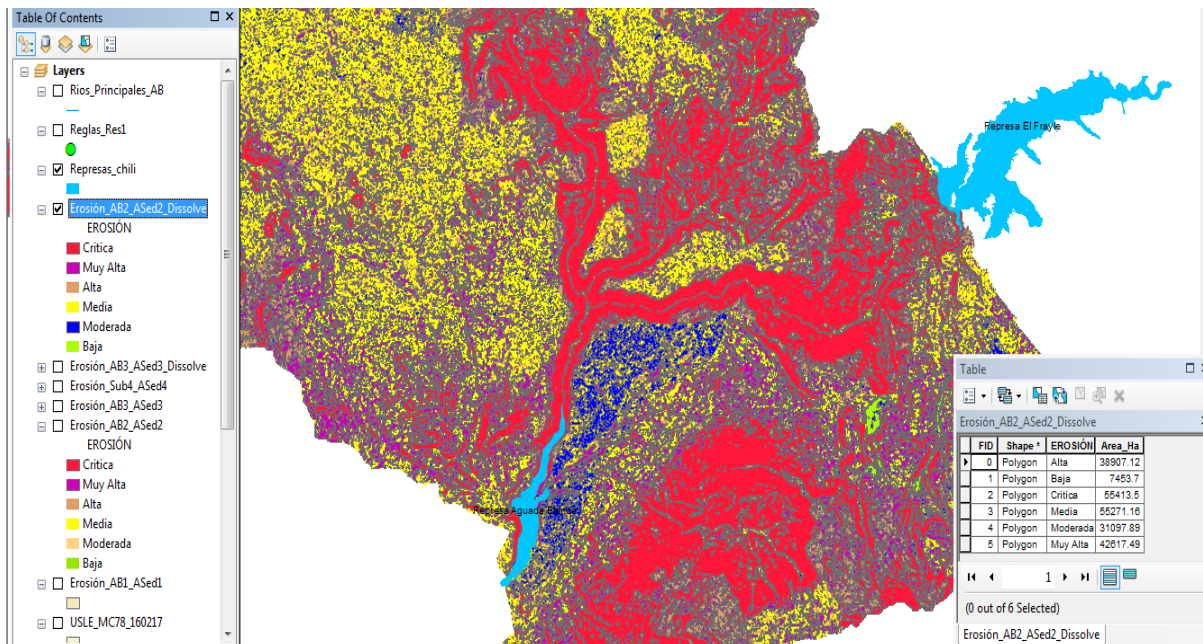


Figura 76: Niveles de erosión a la llegada del embalse Aguada Blanca

c. Erosión en la cuenca aportante Aguada Blanca del 2010-2015

En la tercera fase, del 2010 al 2015, los resultados corresponden a los atributos del modelo MC78 con NDVI 2014, en su respectiva área (cuenca menos área de influencia de sedimentación del embalse Frayle, Pillones y Chalhuanca).

Los corolarios muestran los valores mínimo, medio, máximo y el área erosionada total de 204,635.43 ha, con una tasa de erosión media de 162.731 T/ha/año (Fig. 77).

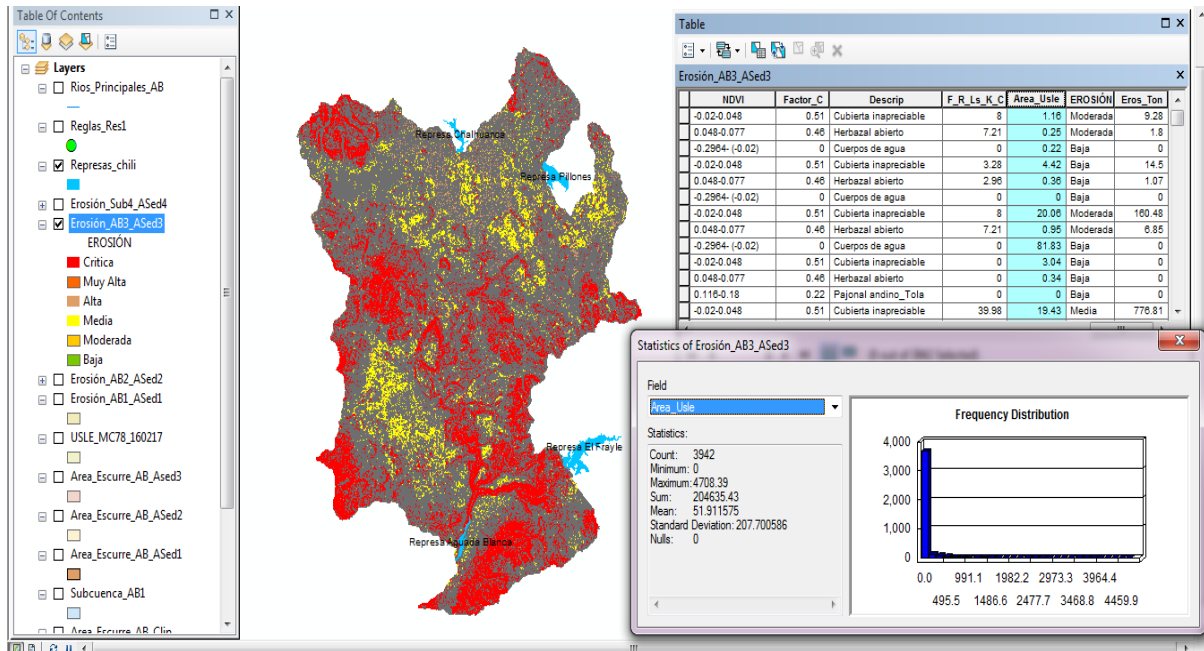


Figura 77: Resultados del valor máximo, medio y erosión total en fase III

Se realizó la identificación de coberturas vegetales de manera geoespacial en la cuenca aportante según el NDVI del 2014, quedando las áreas de pajonal andino con preponderancia del *Calamagrostis - Stipa* con 62, 185.19 ha, pajonal andino con primacía de *Parastrephia lepidophylla* con 12, 530.01 ha, gramíneas y gramioides de puna seca con 4,010.8 ha y turbera con 2,336.34 ha y otros, visualizándose en la Fig. 78.

Los resultados exponen los diferentes niveles de erosión crítica, muy alta, alta, media, moderada y baja con sus respectivas superficies de 52 071.88 ha, 38589.19 ha, 34 474.95 ha, 50 264.69 ha, 23 993.25 y 5 241.22 ha, en el área aportante de sedimentos en esta tercera fase, cuyo mapa señala el detalle con dichos niveles de erosión a la llegada del embalse (Fig. 79).

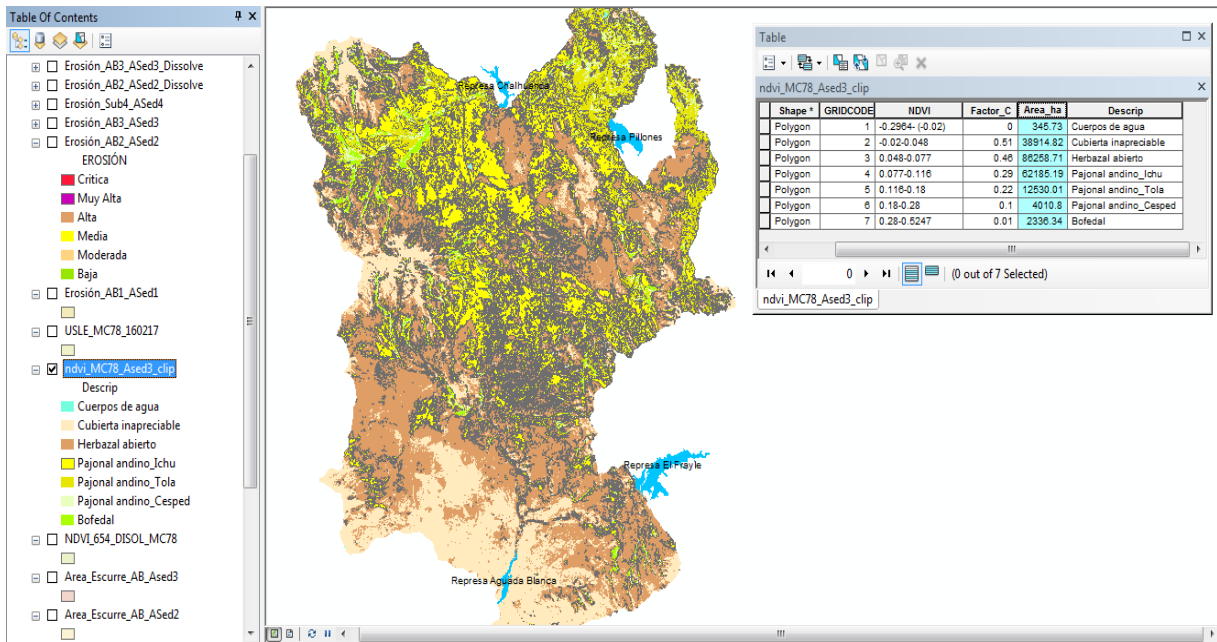


Figura 78: Resultados de las áreas de coberturas vegetales en fase III

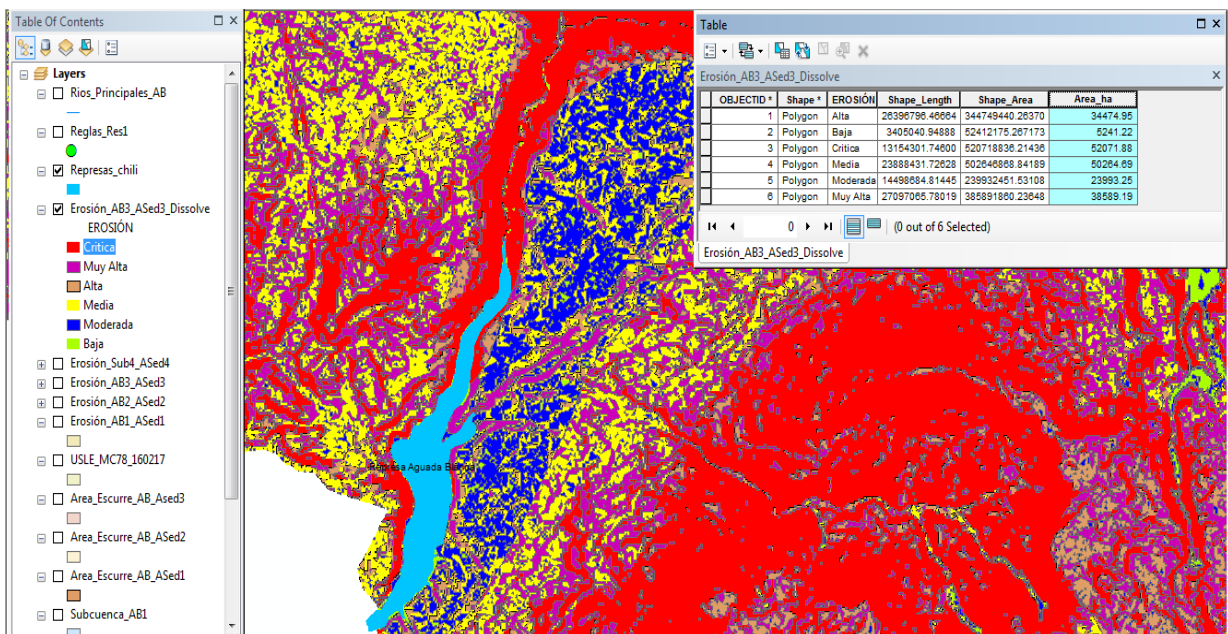


Figura 79: Niveles de erosión a llegada del embalse en fase III

En el ANEXO 13 se observan los mapas de erosión georeferenciados en fase I, II y III.

d. Erosión en la cuenca aportante Aguada Blanca – escenario prospectivo

En el nuevo escenario futuro deseado denominado M78-C1, las áreas de coberturas vegetales fueron incrementadas respecto a las coberturas actuales, con el fin de mitigar la erosión en la cuenca aportante actual y por ende disminuir la sedimentación en el embalse de Aguada Blanca, quedando las áreas de pajonal andino con preponderancia del *Calamagrostis - Stipa* con 101, 442.3 ha, pajonal andino con primacía de *Parastrephia lepidophylla* con 75, 934.66 ha, gramíneas y gramíoides de puna seca con 5,757.84 ha y turbera con 2,554.23 ha, de manera geoespacial y otros como se puede visualizar en la Fig. 80.

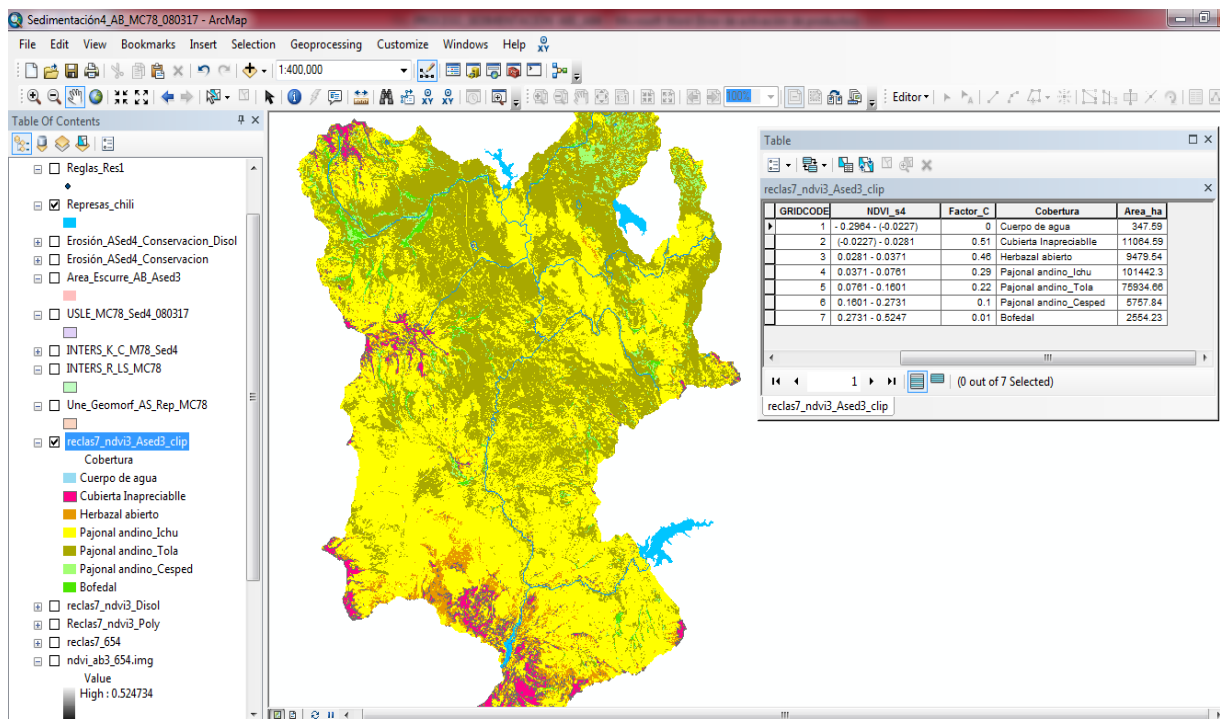


Figura 80: Áreas de coberturas vegetales de escenario M78-C1

La erosión total de 23 889,022.35 T/año de un escenario prospectivo deseado con actividades de conservación corresponde a una área de 204,635.4 ha, que refleja una tasa de erosión anual de 116.74 T/ha/año, con un valor medio de 43.03 ha/polígono.

El mapa final de erosión del escenario proyectado denominado M78-C1 de manera resumida, contiene un nivel de erosión crítica de 37,226.08 ha, muy alta de 30,591.13 ha, alta de 37,222.56 ha, media de 41,015.93 ha, moderada de 50,442.98 ha y baja de 8,236.63 ha y demás atributos como se señala la Fig. 81.

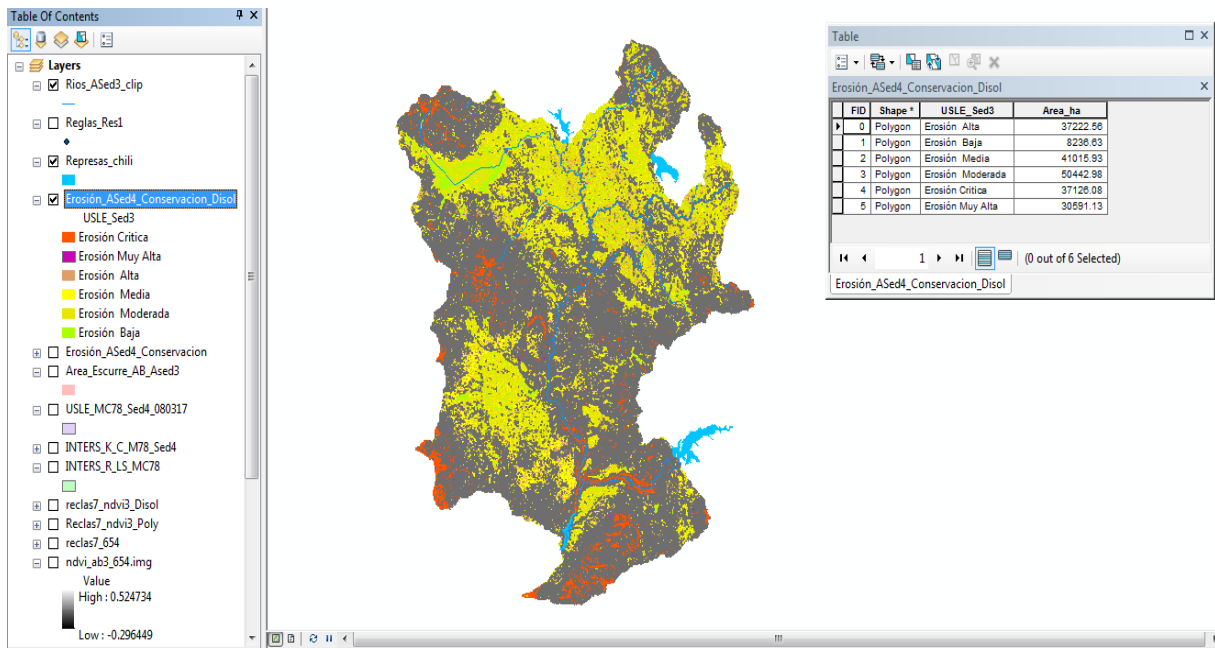


Figura 81: Resultados de niveles de erosión con sus correspondientes áreas

Los niveles de erosión crítica y muy alta se vieron disminuidos y los niveles de erosión moderada y baja se incrementaron, alcanzando los diferentes niveles de erosión en el ámbito de la cuenca aportante con los porcentajes siguientes, según Fig. 82.

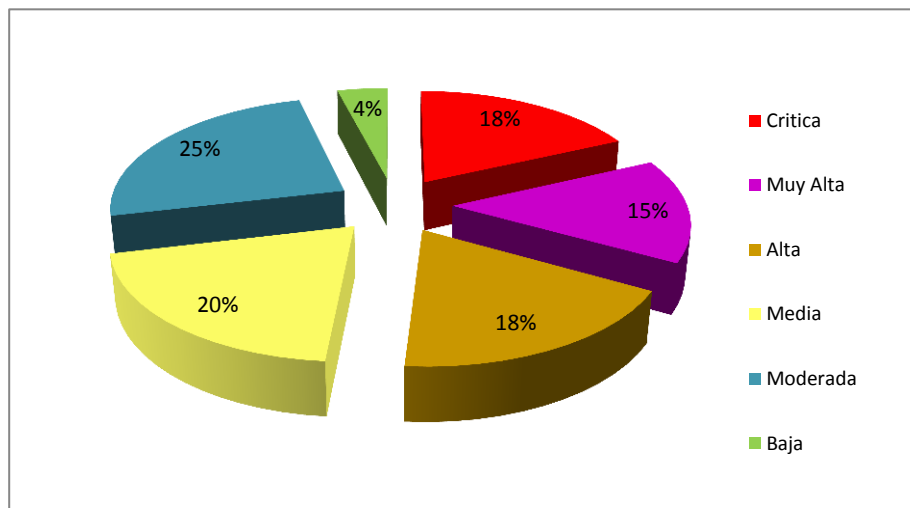


Figura 82: Niveles de erosión en M78-C1 (por ciento)

Los volúmenes totales de erosión al año ($\text{Hm}^3/\text{año}$) alcanzaron los valores de $27.49 \text{ Hm}^3/\text{año}$, $27.09 \text{ Hm}^3/\text{año}$ y $25.23 \text{ Hm}^3/\text{año}$ en las fases 1,2 y 3 respectivamente, que resultaron de dividir la erosión total ($\text{T}/\text{año}$) entre la densidad aparente promedio ($1.32 \text{ g}/\text{cm}^3$), según análisis de 24

muestras de suelo, con el propósito de poder comparar con los volúmenes colmatados de sedimentos (Hm^3) en el embalse Aguada Blanca.

La colmatación por sedimentos reportados en la zona del volumen útil del embalse de Aguada Blanca está en el orden de 5.43 Hm^3 en los últimos 13 años (2002-2015) que resultó de la diferencia del volumen encontrado de 25.66 Hm^3 (2015) a la cota 3666 m.s.n.m y 31.09 Hm^3 (2002) en el nivel de agua máximo de operación (NAMO), según el estudio Levantamiento topográfico y batimétrico del embalse Aguada Blanca, realizado por PEMS-AUTODEMA del gobierno regional de Arequipa, a través de la empresa Ingeniería y Construcción – PRW y que guarda relación con los resultados de la batimetría realizada en el 2009, que indicaba un volumen útil de 13.58 Hm^3 de 27 Hm^3 a la cota 3 658.5 m.s.n.m. (diseño).

La cantidad de sedimentos colmatados en la zona del volumen útil del embalse Aguada Blanca está en el orden de 12.43 Hm^3 desde el año 1985 al 2002, que resultó de la diferencia del volumen encontrado de 43.52 Hm^3 (diseño 2015) y 31.09 Hm^3 (2002) en el NAMO, reportando una tasa de sedimentación mayor de $0.73 \text{ Hm}^3/\text{año}$, según estudio realizado por EGASA.

En el ANEXO 14 se presentan los mapas georeferenciados, escenario prospectivo M78-C1

4.3 ANALISIS DE RESULTADOS DEL MODELO MC78 y MC80

Los resultados de los niveles de erosión de ambos modelos (MC78 y MC80) en la cuenca aportante, se basan en los coeficientes del factor de lluvia R, factor de pendiente LS, factor de erodabilidad K, factor de cobertura vegetal C y factor de prácticas de conservación P. Este último factor se desestimó por no encontrar actividades de conservación significativas en la cuenca; por lo cual se realizó una evaluación de los cuatro primeros coeficientes referidos.

Según el análisis de efectos del modelo MC78 con NDVI 2014 este muestra una erosión total de $57471,975.38 \text{ T}$ para una área de $394,989.94 \text{ ha}$, una tasa promedio de erosión anual elevada de 145.50 T/ha/año ; mientras el modelo MC80 con NDVI 2001 indica una erosión total de $50\,936,400.5 \text{ T}$ para una área de $394,987.28 \text{ ha}$ con una tasa promedio de erosión anual de 128.96 T/ha/año , representando una disminución de 11.4 por ciento por la mayor densidad de coberturas vegetales que existió en el año 2001 en proporción al 2014.

Los resultados del grado de erosión anual crítica y muy alta del modelo geoespacial MC78 es mayor que los niveles del MC80 por el método de USLE. Los niveles de erosión crítica, muy alta, alta y media de ambos modelos se encuentran por encima del nivel de tolerancia según el nivel de referencia propuesto por ICONA (12.5 Mg/ha-año) y los niveles de erosión moderada y baja en la gran mayoría de superficie se encuentran por debajo del patrón de referencia indicado. Los valores críticos del MC78 alcanzaron una considerable área (88,477.59 ha) y del MC80 alcanzó una menor área (77,758.17 ha), los demás niveles referidos de ambos modelos siguieron la misma tendencia excepto la erosión media, moderada y baja del modelo MC80, que muestran menores niveles de erosión (Fig. 83).

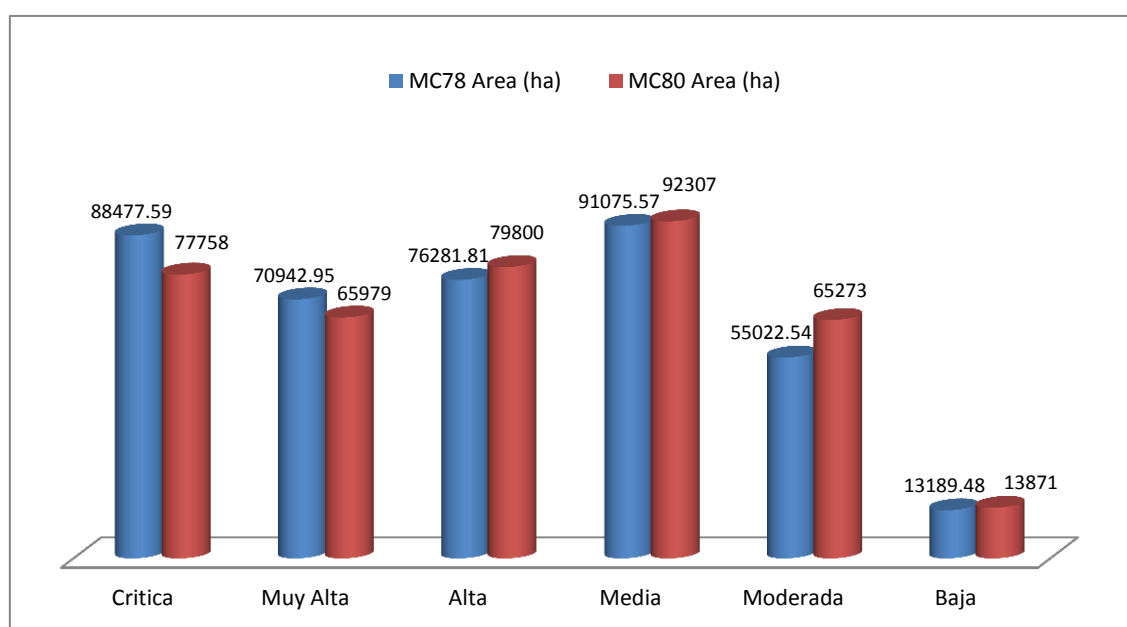


Figura 83: Nivel de erosión de modelos MC78 y MC80 (ha)

El grado de erosión más crítica por encima de las 200 T/ha-año que específicamente alcanzó el modelo MC78 fue de 88,477.59 ha, que representa el 22.4 por ciento del área total mientras que el modelo MC80 alcanzó las 77,758.17 ha, que representa un menor porcentaje (16.70 por ciento) del área total. Asimismo se encontró el nivel de erosión de ambos modelos referidos mayoritariamente en las zonas de mayor pendiente topográfica (superiores a 60 por ciento), alta precipitación, en suelos con desprendimiento de rocas y masas de suelo fácilmente de textura muy fina con predominancia de limo de muy lenta permeabilidad, así como suelos desnudos con cubierta vegetal inapreciable, que al mínimo nivel de precipitación producen muy altas tasas de erosión de las capas superiores de la superficie (Fig. 84).



Figura 84: Erosión crítica en campo que presentan grandes cárcavas

Los niveles de erosión muy alta (100.01-200 T/ha-año) y alta (50.01-100 T/ha-año) del modelo MC78 alcanzaron el mayor valor de 147,224.76 ha, que representa el 37.27 por ciento del área total, mientras el MC80 alcanzó una área menor de 145,778.48 ha. Dichas tasas de erosión recayeron mayormente en las zonas con pendiente considerables (superiores a 24 por ciento), precipitaciones altas en suelos inestables con desprendimiento de suelo de textura fina a media con predominancia de limo, arena muy fina de lenta a moderada permeabilidad, así como suelos con cubierta vegetal inapreciable y herbazal abierto con poca densidad de coberturas y donde predomina *Tetraglochim cristatum* (Canlly), como una respuesta al sobrepastoreo, señaladas en la Fig. 85.



Figura 85: Erosión muy alta, visualizando claramente la degradación de suelos

El nivel de erosión media (25.01-50 T/ha-año) del modelo MC78 alcanzó un valor de 91,075.57 ha. que representa el 23 por ciento del área total, mientras que el MC80 alcanzó una área mayor de 92,307.37 ha. Ambos modelos en este nivel de erosión incurrieron mayoritariamente en las zonas con pendiente media (12-24 por ciento), precipitación moderada y en suelos de mediana estabilidad de textura media (suelos francos, francos arenosos) de módica permeabilidad, así como suelos con cubierta vegetal medianamente densos clasificado en pajonal andino con predominancia del Calamagrostis - Stipa (ichu) y en menor escala *Parastrephia lepidophylla* (tola), visualizados en Fig. 86.



Figura 86: Erosión media en suelos estables con supremacía de ichu

El nivel de erosión moderada (5-25 T/ha-año) y baja (menores de 5.0 T/ha-año) del modelo MC78 alcanzó un valor de 68,212.02 ha, que representa el 17.27 por ciento del área total mientras que en el MC80 alcanzó un valor mayor de 79,143.26 ha, representando el 20.04 por ciento, mostrando que la erosión anual de ambas tasas deseadas fue mayor en el año 2001 que el 2014, correspondientes en ambos modelos usualmente a las zonas con pendiente baja (menores del 12 por ciento) y en suelos estables de textura media a gruesa (suelos arenosos, francos arenosos) de rápida permeabilidad y suelos con cubierta vegetal densos con predominancia del césped de puna y turberas (Fig. 87).

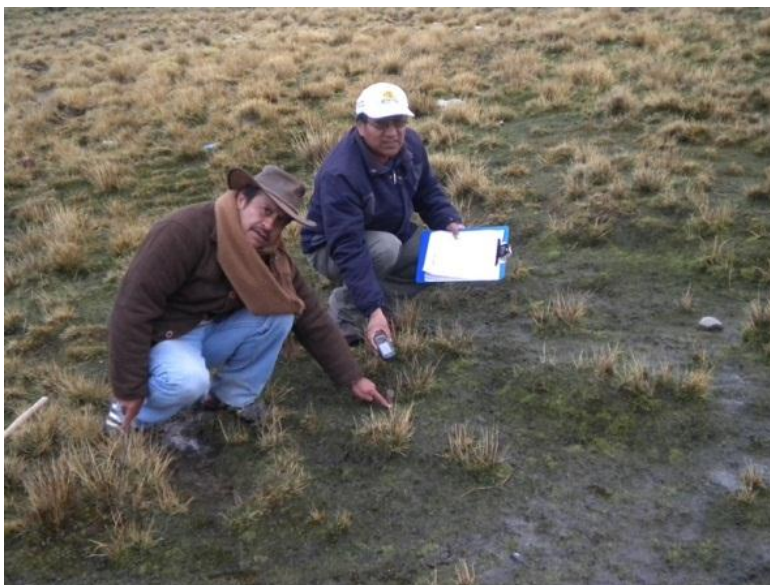


Figura 87: Erosión baja en zonas de bofedales con gran densidad de coberturas

4.4 ANALISIS DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN DEL EMBALSE AGUADA BLANCA

Los resultados de erosión en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca fueron diferenciados en cada una de las tres etapas del proceso. La primera fase alcanzó una erosión total de 36 288,729.34 T/año en 289 972.87 ha, la segunda fase y tercera fase alcanzaron valores diferentes que se sintetizan en Fig. 88.

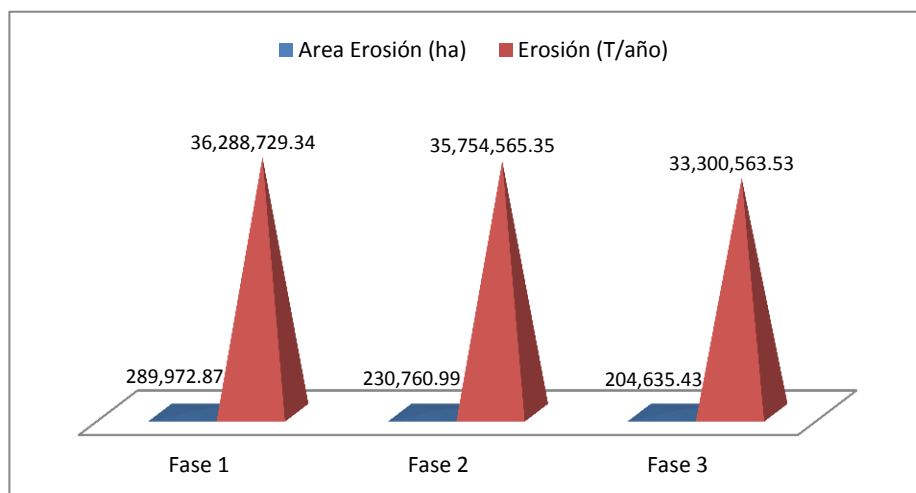


Figura 88: Erosión en cada etapa (T/año)

Las tasas de erosión media anual están en el orden de 125.15 T/ha/año para la primera fase (2002-2006) con el modelo MC80; 154.94 T/ha/año para la segunda fase con el modelo MC78 (2006-2010) y 162.73 T/ha/año para la tercera fase del modelo MC78 (2010-2015); con los mayores porcentajes en la tercera fase, revelando que la tendencia de erosión anual de los últimos años es mucho mayor que de años anteriores (Fig. 89).

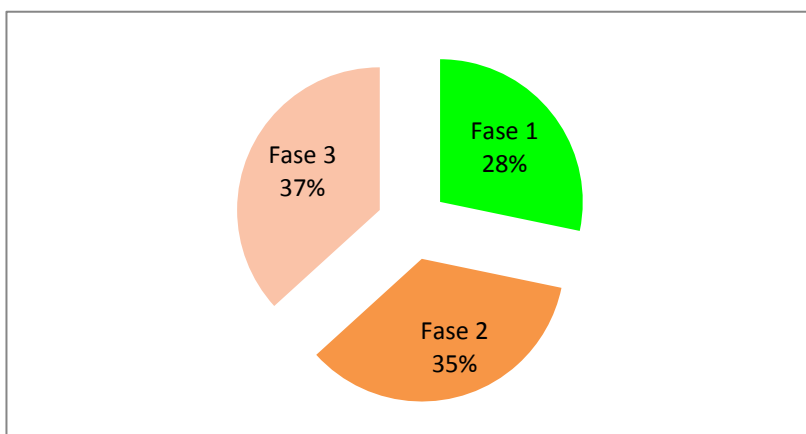


Figura 89: Tasa erosión media (T/ha/año)

4.4.1 Análisis de erosión y sedimentación en la cuenca aportante del 2002-2006

Los niveles de degradación en forma decreciente es la erosión media (69,482.08 ha), alta (56,446.33 ha), moderada (53,949.02 ha) y crítica (53,742.82 ha) en la cuenca aportante de Aguada Blanca, que están por encima de la erosión promedio (48,328.51 ha), mostrando una tendencia de erosión media a moderada para esta primera fase y la erosión muy alta y baja por debajo de la erosión promedio (Fig. 90).

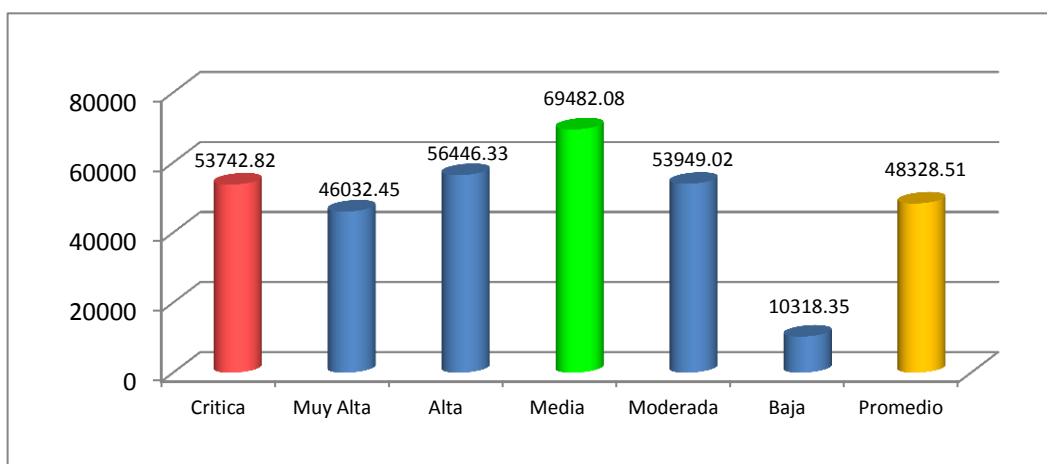


Figura 90: Niveles de erosión en fase I (ha)

La erosión total encontrada en esta primera fase fue de 36 288,729.34 T/año para un área de 289,972.87 ha, con una tasa anual promedio de 125.15 T/ha/año, en donde predomina la erosión media (25-50 T/ha/año) basada en los coeficientes de R, LS, K y C del modelo-MC80 con NDVI 2001, considerado debido a una densidad media de cubierta vegetal con especies arbustivas y/o pajonal andino con predominancia de tolares y asociación Calamagrostis - Stipa (ichu), suelos estables de textura media a gruesa (francos arenosos) y muy permeables en la zona alta (confitillo), precipitaciones variadas en función directa a los pisos altitudinales (a mayor altitud mayor precipitación) y pendientes muy variadas (3 por ciento a 100 por ciento) en la parte alta, baja y pendientes considerables en la zona media de la cuenca aportante.

4.4.2 Análisis de erosión y sedimentación en la cuenca aportante del 2006-2010

Los niveles de erosión crítica (55,413.5 ha), media (55,271.16 ha), muy alta (42,617.49 ha) y alta (38,907.12 ha), en la cuenca aportante Aguada Blanca están por encima de la erosión promedio (38,460.14 ha), mostrando una tendencia de crítica-media-alta en esta segunda etapa y encontrándose la erosión moderada (31,097.89 ha) y baja (7,453.7 ha) inferior a la erosión promedio, reveladas en Fig. 91.

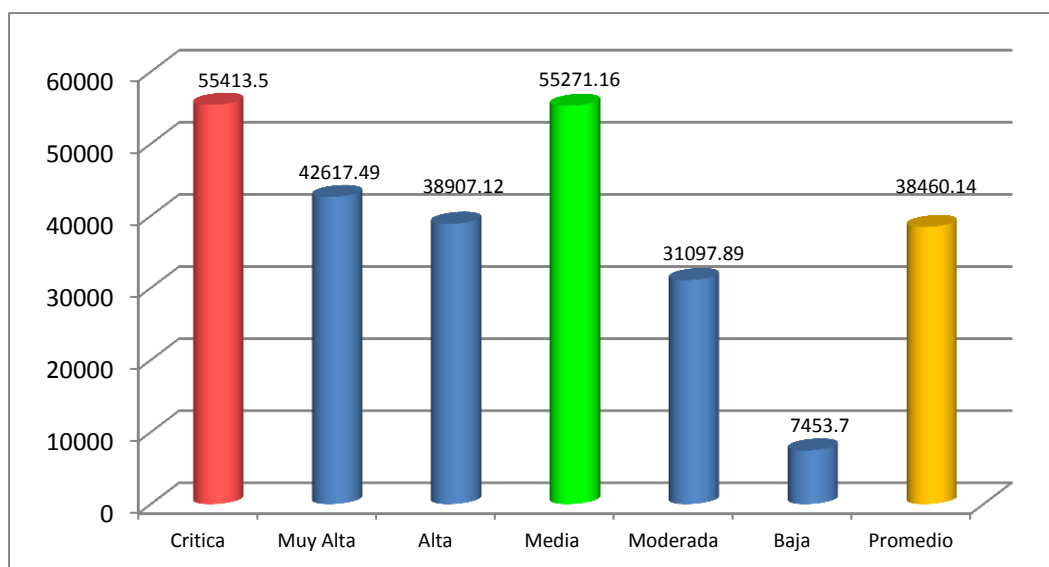


Figura 91: Niveles de erosión en fase II (ha)

La cantidad de erosión total encontrada en esta segunda fase fue de 35 754,565.35 T/año para una extensión de 230,760.99 ha, alcanzando una tasa anual promedio de 154.94 T/ha/año, mayor en 24 por ciento que la primera fase, en donde predomina la erosión media y crítica

(mayor 200 T/ha/año) basada en los coeficientes de R, LS, K y C del modelo MC78 con NDVI 2014; considerado debido a una concentración baja de cubierta vegetal por la disminución de las especies arbustivas principalmente *Parastrephia lepidophylla* (muy usado en hornos de panadería en ciudad Arequipa) y césped de puna, suelos de textura media a fina y moderada permeabilidad en la zona media y baja, precipitaciones variadas en función directa a los pisos altitudinales y pendientes muy variadas (3 por ciento a 100 por ciento), como considerables (superiores a 24 por ciento) en la zona media de la cuenca aportante.

4.4.3 Análisis de erosión y sedimentación en la cuenca aportante del 2010-2015

Los niveles de erosión crítica alcanzaron las 52,071.88 ha, que representa el 25.45 por ciento del total; erosión media alcanzó la extensión de 50,264.69 ha, que representa el 24.56 por ciento; erosión muy alta obtuvieron las 38,589.19 ha, que representa el 18.86 por ciento y erosión alta logró 38,907.12 ha, representado el 16.85 por ciento, las mismas que están por encima de la erosión promedio (34,105.86 ha) y mostrando una tendencia de erosión crítica-media similar a la Fase II, como señala la Fig. 92.

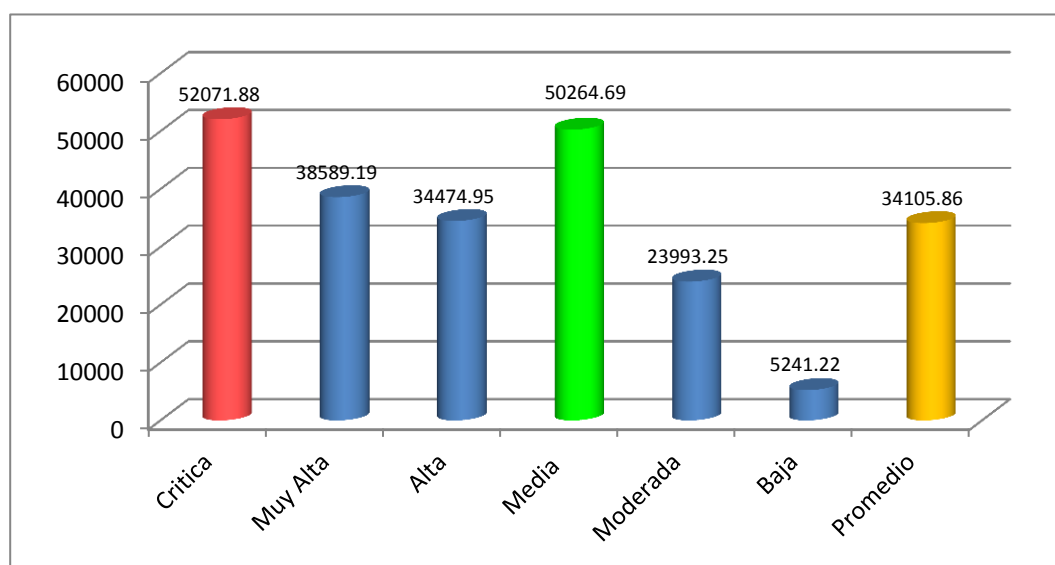


Figura 92: Niveles de erosión en fase III (ha)

La cantidad de erosión total encontrada en esta fase fue de 33 300,563.53 T/año para una extensión de 204,635.43 ha, con una tasa anual promedio de 162.73 T/ha/año, mayor en 30 por ciento que la primera fase, en donde predomina la erosión crítica (mayor 200 T/ha/año) basada en los coeficientes de R, LS, K y C del modelo MC78 con NDVI 2014; considerado debido a

una concentración baja de cubierta vegetal por la disminución considerable de las especies arbustivas principalmente tolares, Chilliguares, Polyplepis (queñuales) y césped de puna; los suelos, precipitaciones y pendientes son similares que la fase anterior.

4.4.4 Comparación de erosión – sedimentación, en la cuenca aportante y embalse Aguada Blanca

Los volúmenes totales de erosión ($\text{Hm}^3/\text{N}^\circ$ años) alcanzaron los valores de $109.97 \text{ Hm}^3/4$ años, $108.35 \text{ Hm}^3/4$ años y $126.14 \text{ Hm}^3/5$ años en la fase I, fase II y fase III, respectivamente; que resultaron de multiplicar los volúmenes de erosión al año ($\text{Hm}^3/\text{año}$) por el número de años en cada fase, mostrando la fase III un valor superior a la fase I y II y alcanzando los porcentajes de incidencia visualizados en Fig. 93.

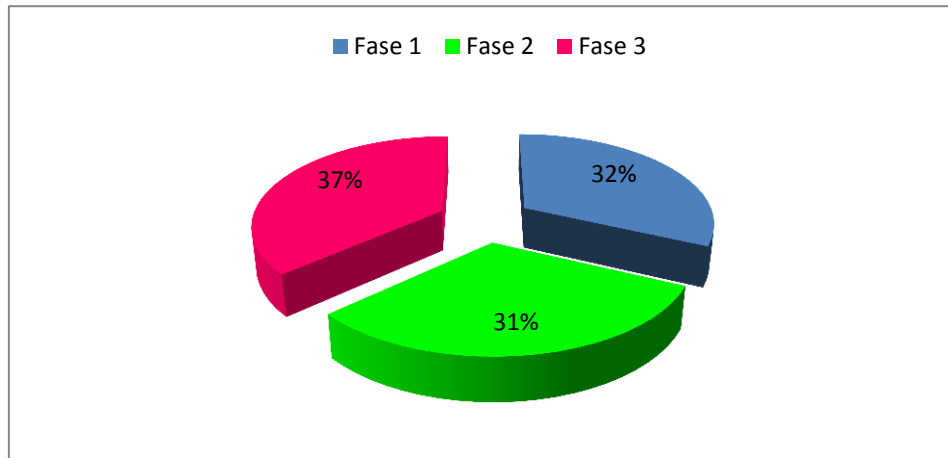


Figura 93: Volumen ($\text{Hm}^3/\text{N}^\circ$ años)

Si se compara directamente la erosión total de las tres fases descritas (344.45 Hm^3) con los sedimentos depositados en el embalse de Aguada Blanca (5.43 Hm^3) en los últimos 13 años (2002-2015), se encuentra que los sedimentos depositados representan el 1.58 por ciento del total erosionado en la cuenca aportante del referido embalse. Cabe precisar que el embalse al 2015 ya perdió 41.04 por ciento del volumen útil según su diseño, que era de 43.52 Hm^3 y de continuar con la misma tasa de erosión (0.42 Hm^3) en 17 años perderá el 75 por ciento de su capacidad de almacenamiento.

La cantidad de sedimentos colmatados desde el año 1985 (inicio operación) al 2002 en la zona del volumen útil del embalse de Aguada Blanca está en el orden de 12.43 Hm^3 , representando una tasa de sedimentación de $0.73 \text{ Hm}^3/\text{año}$, mayor a la tasa de sedimentación de 0.42

Hm³/año del año 2002-2015, que para algunos tomadores de decisión viene generando confusión ya que da entrever que la tendencia de la colmatación anual de sedimentación en el sistema de embalses es menor e incluso algunos alegan que la sedimentación se debe porque la compuerta de fondo está trabada por donde salen los sedimentos, sin embargo no se está tomando en cuenta la colmatación en los otros nuevos embalses de Pillones y Chalhuanca, que entraron en operación el 2006 y 2010, respectivamente y gran parte de la sedimentación que debería entrar al embalse Aguada Blanca ahora está en los otros dos embalses indicados y respecto al otro punto las descargas usualmente son por la válvula de descarga de Charcani y no por la compuerta de fondo, decantando los sedimentos (limo) en el vaso del embalse referido de forma natural.

Para hacer una comparación más específica de la erosión total con el material de sedimentos depósitos en el referido embalse, se considera pertinente comparar con el material en suspensión (limo) por el transporte de sedimentos que viene por el cauce, teniendo presente que las arenas se quedarán en el trayecto de los cauces por su densidad y peso específico y por las distancias considerables de los cauces de la red hídrica al embalse Aguada Blanca y adicionalmente que la arcilla pasa en suspensión por la válvula de descarga aguas abajo del embalse, es decir tanto la arena como la arcilla del suelo erosionado de la cuenca aportante no se quedan en el embalse, como lo confirma el material sedimentado en dicho embalse.

El porcentaje de limo por arrastre de transporte de sedimentos en la cuenca aportante Aguada Blanca está en el orden del 19.40 por ciento, según el promedio de las 24 muestras de análisis de suelo realizada para tal fin.

Al comparar la sedimentación desde el año 2002 al 2015, en esta ocasión la erosión por transporte de sedimentos del limo en la cuenca aportante otorga el valor de 66.824 Hm³ en las tres fases descritas según porcentaje referido (19.4 por ciento) con los sedimentos depositados en el embalse Aguada Blanca (5.43 Hm³) en los últimos 13 años, encontrando de manera más precisa que los sedimentos depositados representan el 8.13 por ciento del volumen erosionado en la cuenca aportante, mostrando un volumen promedio anual de 5.14 Hm³/año en la cuenca aportante y del embalse 0.418 Hm³/año con los porcentajes respectivos, como se visualiza en la Fig. 94.

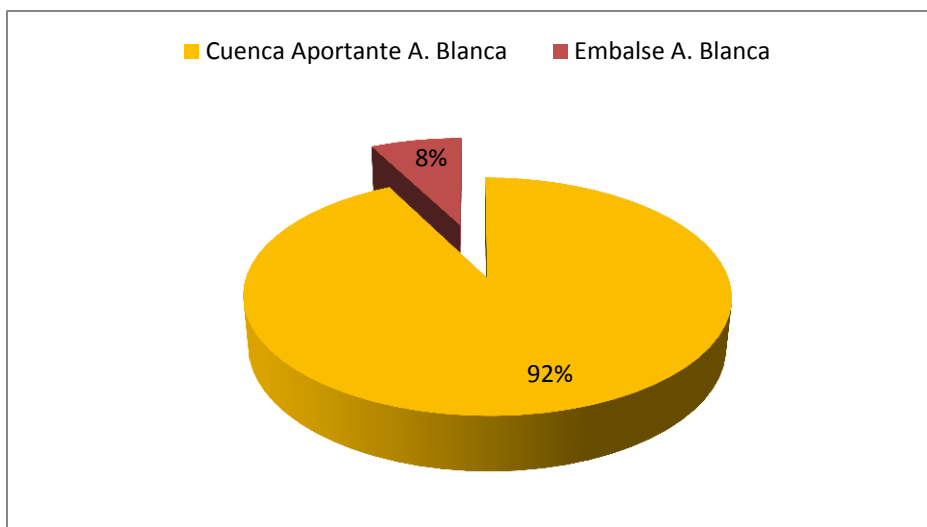


Figura 94: Volumen promedio anual ($\text{Hm}^3/\text{año}$)

4.4.5 Escenarios de erosión en la cuenca aportante Aguada Blanca

En un futuro no muy lejano se consideran tres posibles escenarios por presentarse que dependerán del contexto de los niveles de erosión, producto de los cambios climáticos y principalmente del manejo antrópico de la pradera en la cuenca aportante Aguada Blanca.

El primer escenario es conservador, ya que se asume un proceso erosivo en las siguientes décadas igual a la que se viene dando actualmente (fase III) en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca, en base al factor de lluvia R, factor topográfico L, factor de erodabilidad K y factor de cobertura vegetal C, como los actuales niveles de erosión del modelo MC78 con NDVI 2014.

De darse el primer escenario en un periodo no muy distante de 17 años se perdería el 75 por ciento de capacidad (32.64 Hm^3) del volumen útil de diseño (43.52 Hm^3) del embalse Aguada Blanca, basado en la misma tasa de erosión actual del proceso erosivo en la cuenca aportante del embalse de la fase III (162.73 T/ha/año), con una tasa promedio de sedimentación anual del embalse de $0.42 \text{ Hm}^3/\text{año}$ y teniendo presente que el 41 por ciento del embalse ya se encuentra colmatado de sedimentos.

El segundo escenario proyectado se basa en la tendencia creciente de la erosión que se viene presentando en la cuenca aportante del embalse. Se considera muy probable que suceda ya que al comparar la tasa promedio de erosión anual de la fase III del MC78 (162.73 T/ha/año), estos son superiores en un 30 por ciento a la fase I del MC80 (125.15 T/ha/año), en base a los

niveles de erosión de ambos modelos; debiendo tener presente que la erosión total es mayor en fase I (36 288 729 T/año) que en la fase III (33 300 563.53 T/año), ya que el área aportante del embalse es mayor en la fase I (289 972.87 ha) que fase III (204 635.43 ha) en un 29.4 por ciento (fig. 95)

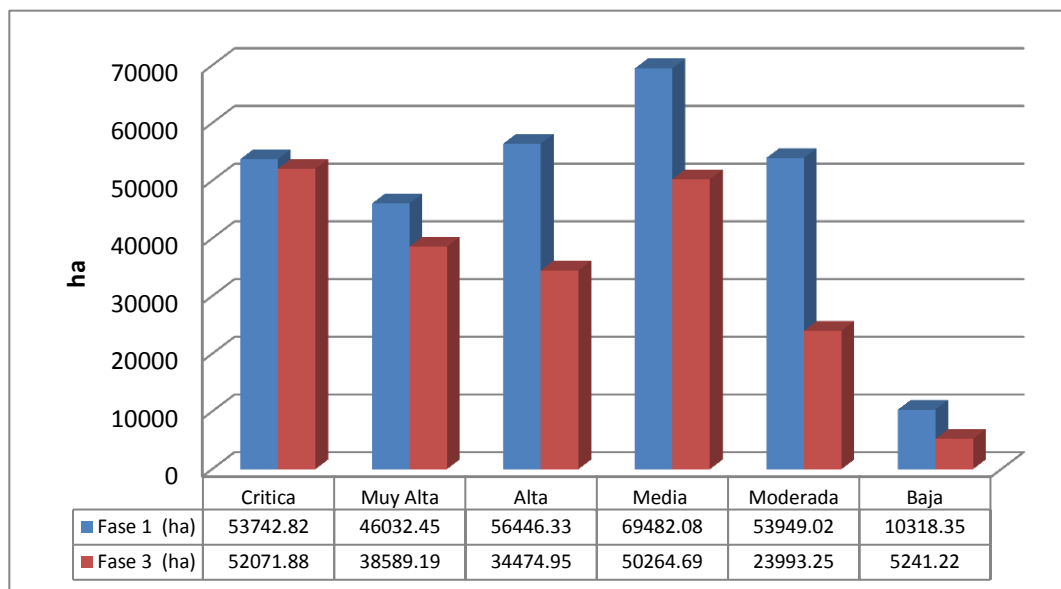


Figura 95: Comparación de la erosión en fases I y III

Si se continúa con la misma tendencia creciente del proceso erosivo en la cuenca aportante en un periodo cercano de 13 años se perdería el 75 por ciento de capacidad (32.64 Hm^3) del volumen útil de diseño del embalse Aguada Blanca, con una tasa de sedimentación anual de $0.546 \text{ Hm}^3/\text{año}$, proyectado en base al incremento del 30 por ciento de la tasa anual de erosión del 2014 respecto al 2001 de los modelos referidos, sin embargo se debe tener presente que el incremento de la tasa promedio anual es similar a la disminución del área aportante (29.4 por ciento), por lo cual la tasa promedio anual proyectada de sedimentación del embalse también quedaría en el orden de $0.42 \text{ Hm}^3/\text{año}$ ya que la sedimentación restante está ingresando a los embalses Pillones y Chalhuanca, construidos recientemente.

El tercer escenario más optimista denominado M78-C1, está referido a bajar la tasa anual de erosión de la fase III del modelo-MC78 (162.73 T/ha/año) a los niveles de la tasa de erosión anual del escenario deseado con actividades de conservación (116.74 T/ha/año), mediante el incremento de las áreas de coberturas vegetales.

La ampliación de las coberturas es un proceso gradual en este escenario deseado (M78-C1), alcanzando el área de 101,442.3 ha de pajonal andino con preponderancia del *Calamagrostis - Stipa*, 75,934.66 ha de pajonal andino con primacía de *Parastrephia lepidophylla* (tola), 5,757.84 ha con gramíneas y gramíoides de puna seca y 2,554.23 ha de bofedal en la cuenca aportante existente, que representa un incremento de 39,257 ha, 63,405 ha, 1,747 ha y 217.89 ha, respectivamente, según el mismo tipo de cobertura de la fase III del modelo-MC78. Las áreas con coberturas vegetales existentes reflejan densidades bajas en la fase III y las áreas con las coberturas ampliadas del escenario deseado (M78-C1) revelan una mayor densidad según las áreas respectivas de ambos modelos que se detallan en la Fig. 96.

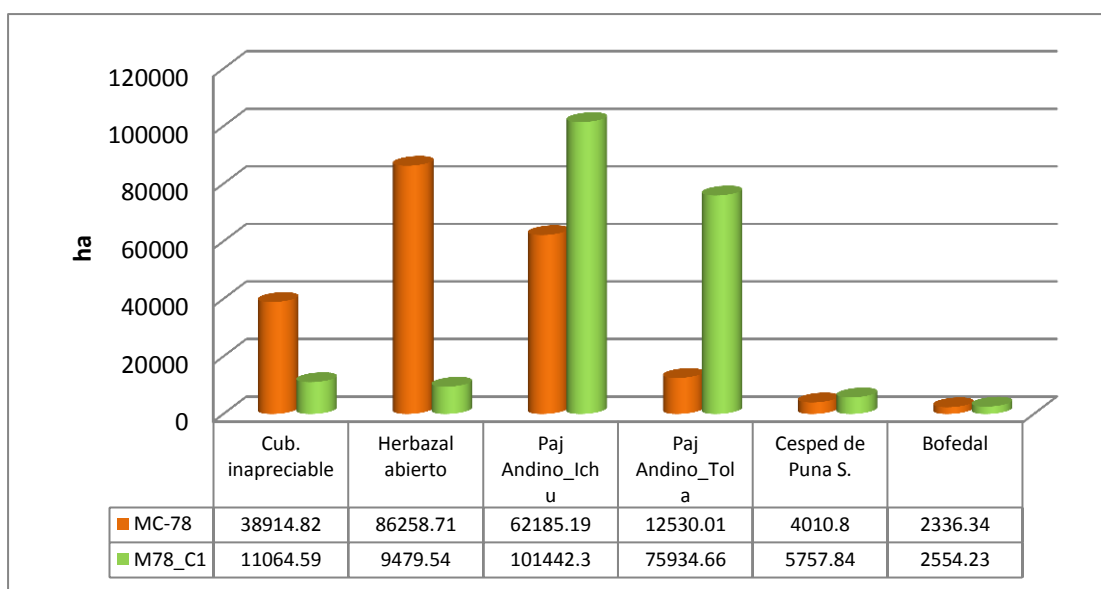


Figura 96: Comparación de coberturas MC78 y M78-C1

Alcanzar las áreas propuestas de las coberturas vegetales indicadas amerita tener toda una estrategia de corto y mediano plazo de actividades de conservación para llegar a dichas metas, partiendo de profundizar el diagnóstico y ver las causas por las que se está disminuyendo las coberturas vegetales en la cuenca aportante, si es por acción antrópica en la zona, cambio climático o ambas y qué medidas de remediación son necesarias según las condiciones del entorno; proponiendo la reducción de las áreas sobrepastoreadas, acciones de mitigación por el incremento de la temperatura debido al cambio climático, conservación de suelos y sobretodo ampliación de las áreas de cobertura vegetal con *Parastrephia lepidophylla* (tola), césped de puna seca, turberas, entre otras.

Los niveles de erosión bajarían para este escenario propuesto, ponderando en esta ocasión las superficies de la erosión moderada (50,442.98 ha), de manera decreciente la erosión media (41,015.93 ha) y en menor nivel la erosión alta (37,222.56 ha) y crítica (37,126.08 ha) en la cuenca aportante Aguada Blanca, estando los cuatro niveles referidos por encima de la erosión promedio (34,105.89 ha); mostrando una tendencia de erosión moderada a media para este escenario deseado a mediano plazo (5-10 años) y cuyo detalle de los niveles de erosión se indican en Fig. 97.

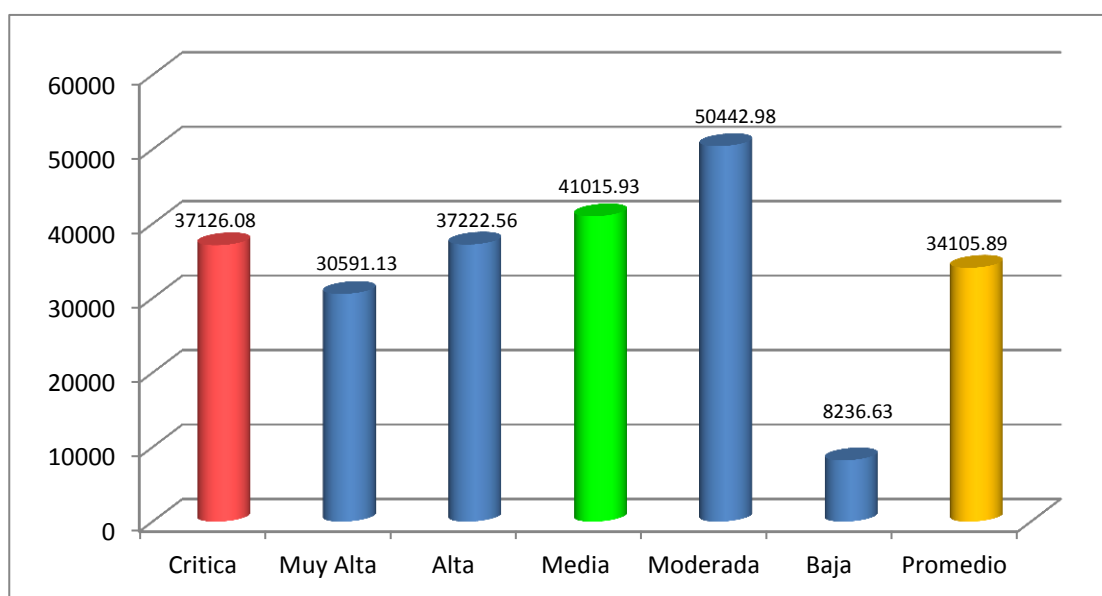


Figura 97: Niveles de erosión y actividades de conservación (ha)

De implementarse la ampliación de cobertura vegetal propuesta en este último escenario en un periodo más prolongado de 23 años se perdería el 75 por ciento de capacidad (32.64 Hm^3) del volumen útil de diseño del embalse Aguada Blanca, con una tasa de sedimentación anual de $0.30 \text{ Hm}^3/\text{año}$, en base a la disminución del 28.26 por ciento de la tasa anual de erosión respecto a la fase III del MC78; por lo cual amerita realizar actividades de conservación en la cuenca aportante para mitigar el proceso erosivo que se viene presentando de manera creciente ya que queda claro que cuanto mayor es el proceso de erosión de la cuenca aportante mayor será la colmatación con sedimentos de los diferentes embalses del sistema regulado Chili.

Las erosiones crítica y muy alta disminuyeron en 14,945.80 ha y 7,998.06 ha, representando el 29 por ciento y 21 por ciento, respectivamente, y las erosiones moderada y baja se incrementaron en 110 por ciento y 57 por ciento, respectivamente, según la comparación de

los niveles de erosión entre el escenario deseado (M78-C1, color verde) con actividades de conservación referidas y la erosión actual (fase III); por lo que se torna de suma importancia incrementar las áreas de coberturas vegetales si se desea mitigar la tendencia creciente de la erosión en la cuenca aportante y por ende disminuir la tasa de colmatación anual del embalse Aguada Blanca y mejorar la calidad del agua, detallándose los valores de erosión de ambos modelos referidos en la Fig. 98.

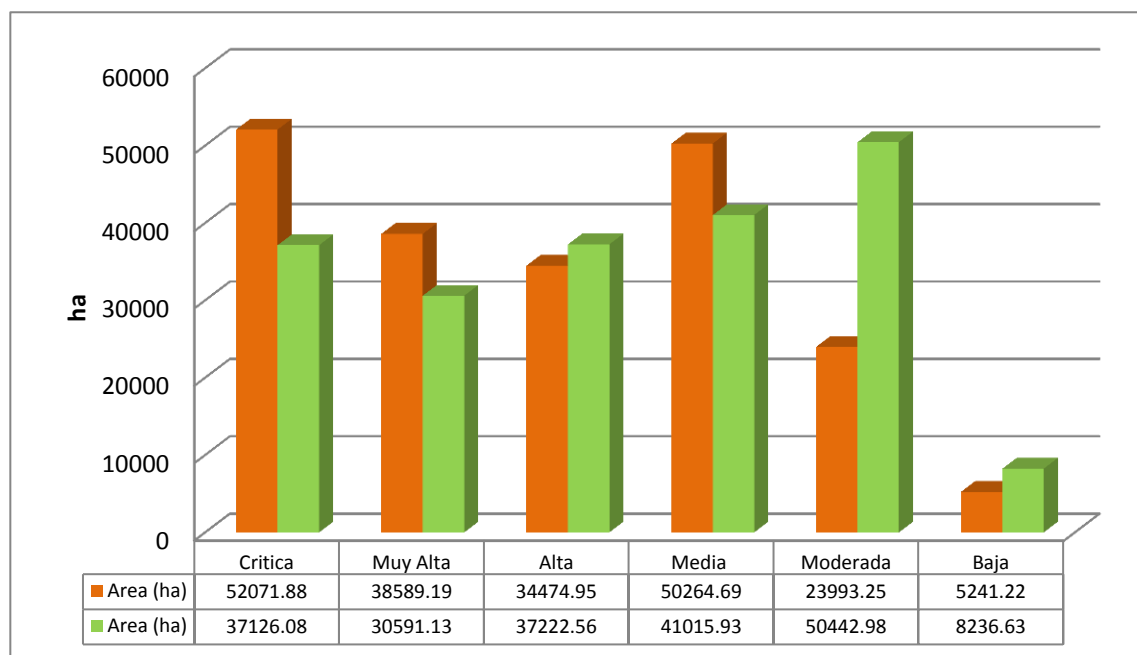


Figura 98: Comparación de los modelos MC78 y M78-C1

Al incrementarse la densidad de coberturas vegetales se incrementaría la infiltración y se disminuiría la escorrentía en períodos de lluvias, recargando los acuíferos y el flujo base aguas abajo de la cuenca aportante Aguada Blanca, además de disminuir los picos de agua en máximas avenidas por los eventos extremos; mitigando los daños e impactos negativos en las obras hidráulicas, infraestructura vial, zonas urbanas y viviendas asentadas en las zonas aledañas de los cursos de agua e incluso pérdidas de vidas humanas, evitando daños económicos y sociales incalculables; como los presentados en el presente periodo lluvioso a nivel nacional.

Con mayor densidad de coberturas en la cuenca se contribuiría en mejorar la calidad de agua por la disminución de los sedimentos en suspensión en periodo de lluvias y sobretodo en máximas avenidas; pudiendo atenuarse el daño e impactos similares a lo sucedido en el

presente año, que por la alta esorrentía y sedimentos en suspensión en el agua la empresa prestadora del servicio tuvo que racionar el agua por horas a la ciudad de Arequipa, siendo una excelente medida el incremento de coberturas para mejorar la calidad y por ende el servicio de agua potable para la población de Arequipa. Permitiendo sugerir que en ambos temas referidos (incremento de infiltración y calidad del agua) se debe profundizar el análisis de las coberturas referidas con sus implicancias de manera integral en el aspecto económico, social y ambiental mediante estudios de investigación.

V CONCLUSIONES

1. Los coeficientes del factor lluvia R, de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) presentan una buena confiabilidad en el ámbito de estudio según la ecuación modificada de Fournier $R = 2.688 F^{1.065}$, respaldada por la erosión medida en campo con una consistente correlación con $r^2 > 80$ por ciento en cada uno de los índices del factor R y que se considera de gran valía para aplicar dicha ecuación modificada en las cabeceras de cuencas altoandinas del país.
2. Los coeficientes del factor de erodabilidad K de la USLE son diversos según las características del suelo, básicamente de textura, estructura, materia orgánica, densidad aparente y permeabilidad, por lo cual fue necesario realizar los respectivos análisis de suelo en laboratorio y campo apoyados del nomograma de Wischmerier y Smith (1978) y de los índices propuestos por Paez y PLA, para la determinación de los índices calibrados (0.52, 0.39, 0.31, 0.24 y 0.16) de los correspondientes suelos analizados que se ajustaron adecuadamente y que son respaldados por los coeficientes de correlaciones superiores al 80 por ciento.
3. Los índices del factor C de la USLE fueron calibrados para la cubierta inapreciable (0.51), herbazal abierto (0.46), pajonal andino Calamagrostis - Stipa (0.29), pajonal andino predominio de tola (0.22) y bofedales (0.01), en base a la cobertura vegetal obtenida según el NDVI que fue bajada de imágenes satelitales Landsat TM del 2014; obteniendo coeficientes de correlaciones superiores al 85 por ciento al comparar los valores de erosión del modelo con las medidas en campo en cada uno de los índices referidos, considerando dichos coeficientes valederos para coberturas vegetales y pisos altitudinales afines.
4. El modelo de erosión calibrado MC78 geoespacial con el método de USLE basado en el NDVI 2014 alcanzó una tasa anual de erosión de 145.50 T/ha/año, con una erosión crítica de 88,477.59 ha, mientras que el modelo MC80, con el NDVI 2001, alcanzó una tasa anual menor de 128.96 T/ha/año, que representa una disminución del 11.4 por

ciento, respecto del MC78 y una erosión crítica con 77,758.17 ha (12.1 por ciento menos); afirmando que la tasa anual de erosión y la erosión crítica es mayor considerablemente en el 2014 que en el 2001, encontrándose la erosión crítica en las zonas de mayor pendiente topográfica (superiores a 60 por ciento) y en suelos de textura muy fina con predominancia de limo, suelos desnudos con cubierta vegetal inapreciable, por lo cual amerita una estrategia de intervención en la mitigación de la erosión referida.

5. Los resultados de erosión en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca fueron diferenciados en cada una de las tres etapas del proceso, la primera fase (2002-2006) alcanzó una erosión de 36 288,729.34 T/año, con una tasa de erosión anual de 125.15 T/ha/año; la segunda fase (2006-2010) alcanzó la erosión de 35 754,565.35 T/año, con una tasa de erosión de 154.94 T/ha/año y en la tercera fase (2010-2015) alcanzó 33300,563.53 T/año, con una tasa de erosión de 162.73 T/ha/año, mostrando que la tendencia de erosión anual es mayor en los últimos años respecto de años anteriores.
6. Los sedimentos depositados en el embalse de Aguada Blanca desde el año 2002 al 2015 (5.43 Hm³) representa el 8.13 por ciento respecto del volumen erosionado en su cuenca aportante (66.82 Hm³), mostrando una tasa promedio anual de sedimentación de 0.42 Hm³/año en el embalse y 5.14 Hm³/año en la cuenca aportante y de continuar con la misma tendencia creciente de la erosión en los siguientes 17 años se estima que se perderá 32.64 Hm³ (75 por ciento de su volumen útil de diseño), proyectado con una tasa promedio de 0.42 Hm³/año.
7. En el escenario deseado (M78-C1), con la implementación de estrategias de conservación basadas principalmente en el incremento de la cobertura vegetal en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca, los niveles de erosión bajarían en la erosión crítica y muy alta en 29 por ciento y 21 por ciento, respectivamente, y ponderando la erosión moderada y media, respectivamente, con respecto a la erosión actual (fase III); disminuyendo la tasa media anual de sedimentación del embalse (de 0.42 Hm³/año a 0.30 Hm³/año) en base a la mengua del 28.26 por ciento de la tasa anual de erosión respecto a la fase III del modelo-MC78.

VI RECOMENDACIONES

1. Se sugiere implementar los coeficientes del factor lluvia R en base a la ecuación modificada de Fournier $R = 2.688 F^{1.065}$, ya que presentan una buena confiabilidad en el rango de las isoyetas de 250 a 650 mm para su aplicación en la cuenca Aguada Blanca y por consiguiente en las cabeceras de las cuencas altoandinas del país.
2. Aplicar los coeficientes calibrados del factor K (0.52, 0.39, 0.31, 0.24 y 0.16) para suelos similares a los evaluados y de otras características de suelo en base a los análisis de suelo en laboratorio y campo referidos, apoyados del nomograma de Wischmerier y Smith y de los índices propuestos por Paez y Pla.
3. Implementar los índices calibrados del factor C, que se sintetiza en 0.51, 0.46, 0.29, 0.22 y 0.01, para la cubierta inapreciable, herbazal abierto, pajonal andino (ichu y tola) y bofedales, respectivamente; en base a las coberturas vegetales obtenidas según el NDVI de imágenes satelitales Landsat TM actualizadas y validar los índices del NDVI con las coberturas evaluadas en campo, para aplicar en las cabeceras de otras cuencas altoandinas del país.
4. Implementar actividades de conservación en la cabecera de la cuenca Chili, principalmente con especies arbustivas y mejoramiento de bofedales, para bajar los niveles de erosión crítica, muy alta y alta ya que se encuentra con tendencia creciente según los resultados del modelo-MC78 (145.50 T/ha/año) y MC80 (128.96 T/ha/año) y que están muy por encima a lo recomendado según el patrón de erosión indicado por ICONA (12.5 T/ha/año) y FAO (11.2 T/ha/año), teniendo como propósito principal bajar los niveles de sedimentación en los diferentes embalses (Frayle, Pillones, Chalhuanca, Aguada Blanca) de la cuenca en estudio.
5. Disminuir la tasa de erosión de 162.73 a 116.74 T/ha/año, implementando una estrategia de conservación a corto y mediano plazo, analizando las causas de los niveles altos de erosión (sobrepastoreo, cambio climático, otras) con sus medidas de mitigación, incrementando las áreas de cobertura vegetal con especies arbustivas y/o

pajonal andino existentes (*Parastrephia lepidophylla*, *Polylepis rugulosa*, gramíneas y gramíoides de puna, bofedales); con el fin de bajar los niveles de colmatación con sedimentos (28 por ciento) en la cuenca aportante y en los embalses del sistema.

6. Realizar batimetrías periódicas (anual) en los embalses Aguada Blanca, Frayle, Pillones y Chalhuanca, para conocer la cantidad de sedimentación por efecto de la erosión de las respectivas cuencas aportantes en el sistema de embalses del Chili y los verdaderos volúmenes útiles de cada una de las embalses indicadas; profundizando los niveles de erosión en sus respectivas cuencas aportantes, tomando como referencia la presente tesis.
7. Implementar la estrategia de conservación propuesta en un escenario deseado (M78-C1) basado principalmente en incrementar las áreas de cobertura referidas con el propósito de bajar los niveles de erosión crítica y muy alta, ponderando la erosión moderada y media; bajando la tendencia creciente de la sedimentación del embalse Aguada Blanca y prolongando de 17 a 23 años la colmatación, por la disminución de la tasa promedio de sedimentación (0.42 a 0.30 Hm³/año).
8. Ejecutar un trabajo de investigación de la precipitación, infiltración y escorrentía en la cabecera de la cuenca Chili y ver las implicancias de variedad y la densidad de cobertura vegetal en la infiltración y la recarga de los acuíferos como la disminución de la escorrentía, sobretodo en periodos de máximas avenidas, con el fin de mitigar los eventos extremos y recargar las fuentes hídricas para el periodo de estiaje.
9. Disminuir los niveles de erosión a tasas anuales por debajo de las 100 T/ha/año (erosión moderada a baja) con una política institucional agresiva y articulado del Ministerio del Ambiente, Autoridad Nacional del Agua (ANA) y otras afines para la implementación de proyectos y actividades de conservación a mediano y largo plazo en las cabeceras de las cuencas altoandinas del país.
10. Realizar investigaciones respecto del transporte de sedimentos en la cuenca y ver sus implicancias en la calidad de agua para la ciudad de Arequipa y sus medidas de remediación a fin de mejorar el servicio de agua potable que, usualmente, es restringido en periodo de máximas avenidas.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Belmonte, S y Núñez, V. 2006. Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG. Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo – Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta – CONICET. Salta, Argentina.

Berry, J. 1990. Maps as data: Fundamental concepts and applications in GIS technology for resource management, en Internal Report, Natural resources. Colorado University, Fort Collins, Colorado, USA.

Blum, W. y Aguilar, A. 1994. A concept of sustainability and resilience based on soil function: the role of ISSS in promoting sustainable land use. En: Soil resilience and sustainable land use. D.J. Greenland and I. Szabolcs (Editors), CAB International, Wallingford, UK.

Bosque Sendra (2009). Los SIG y los modelos globales de simulación. Geografía y Sistemas de información geográfica: GESIG. Universidad Nacional de Luján, Buenos Aires. ISBN: 978-987-05-7535-1.

Cléricali C. y García P. 2001. Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdida de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del río de la Plata. Agrociencia. Revista científica de la Facultad de Agronomía – UDELAR. Montevideo, Uruguay. Vol. 5. N° 1. En: <http://www.fagro.edu.uy/agrociencia/VOL5/1/p92-103.pdf>

Correa, C. 1980. Conservación de Suelos. Secretaria de Agricultura de Antioquia. Medellín, Colombia.

El Swaify, S. Dangler, E. y Armstrong, C. 1982. Soil erosion by water in the tropics college of tropical agriculture and human resources, University of Hawaii.

Empresa de Generación Eléctrica de Arequipa S.A (EGASA). 2003. Actualización de la información hidrológica hasta el año 2003. Resultado de la batimetría efectuada en el embalse Aguada Blanca. Informe completo realizado por EGASA. EM-2002 Embalse Aguada Blanca.

Dirección web http://www2.osinerg.gob.pe/procreg/tarifasbarra/ProcNov04-bril05/pdf/Absoluciones/Anexo%20K_1.pdf

Foster G, Moldenhauer W.C. y Wischmeier W.H. 1982. Transferability of US technology for prediction and control of erosion in the tropics. En: Soil Erosion and Conservation in the Tropics, Special Publication 43. American Society of Agronomy. 135-149 pp.

Foster y Dabney. 1995. Agricultural tillage systems: water erosion and sedimentation. Farming for a better environment, soil and water conservation. Ankeny, IA.

Foster, G, 1988. Medeling soil erosion and sediment yield. Soil Erosion Research Methods (Ed.R.Lal).Ankeny: Soil and Water Conservation Society. 97-117 pp.

García, F. y Maza, A. 1985. Manual de ingeniería de ríos. Cap. 10: Colmatación de embalses, transporte de sedimentos. UNAM. México: Dirección Web http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_73_183_38_677.pdf

Gilabert, M.; González, J, Piqueras y García, J, Haroc. 1997. Acerca de los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Revista de Teledetección.

Gómez, A. y Alarcón, H. 1975. Erosión en Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Manual de conservación de suelos de ladera. CENICAFE. Colombia.

Gregory, K. y Walling, D. 1973. Drainage basin form and process, London. Edward Arnold.

Harbor, J. 1999. Engineering geomorphology at the cutting edge of land disturbance: erosion control on construction sites. Geomorphology 31. Summary Plus; PDF 3954 K.

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). 2013. Anuario de estadísticas ambientales. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1140/cap01.pdf

Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA). 1982. Paisajes erosivos en el sur este español: ensayo de metodología para el estudio de su cualificación y cuantificación. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España. Monografía 26.

Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA). 1988a. Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la ecuación universal de pérdidas de suelo. Instituto para la

Conservación de la Naturaleza. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España.

Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA). 1988b. Mapas de estados erosivos, Madrid. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza; Agresividad de la lluvia en España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España.

Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA). 1991. Mapas de los estados erosivos. Cuenca hidrográfica de Guadiana. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España.

Jakubauskas, M. y de Noyelles, J. (2008) Methods for assessment of sedimentation in reservoirs applied science and technology for reservoir assessment (ASTRA). Biological Survey University of Kansas, Lawrence. USA.

Lecaros, Matías. 2011. Estudio de sedimentación en el embalse Rapel. Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Santiago de Chile.

León, P. 2001. Estudio y control de la erosión hídrica. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Primera Edición – mayo 2001.

Mannaerts. 1999. Modelo de la ecuación universal de pérdida de suelos revisado (RUSLE); Miliarium.com Ingeniería civil y medio ambiente; Dirección Web <http://www.miliarium.com/prontuario/MedioAmbiente/Suelos/Rusle.htm>

Marcano J. 2016. Educación ambiental en la República Dominicana. Importancia de los bosques: el agua. Educación ambiental, ecología y ambiente. Dirección Web <http://www.jmarcano.com/bosques/important/agua.html>

Masso, Fernando. 1974. Levantamientos batimétricos, bibliografía y métodos topográficos en batimetría. Web http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-ii/Teoria_Batimetria_Tema_13.pdf

Montes, L. Domínguez, C. Ventura, R. 2001. Metodología para la estimación del riesgo de erosión hídrica en cuencas hidrográficas utilizando un SIG. Tesis de Maestría en Hidráulica. Facultad de Ingeniería - División del Posgrado, Universidad Autónoma de Querétaro. México.

Moreira, M. (1991). Capacidad de uso y erosión de suelos. Una aproximación a la evaluación de tierras en Andalucía. Agencia de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. Sevilla, España.

Morgan R, 1974. Estimating regional variations in soil erosion hazard in Peninsular Malaysia. Malay Nature Journal 28: 94-106.

Morgan R, 1978. Field studies of rainsplash erosion. Earth Surface Processes 3:295-299.

Morgan, R. 1986. Soil erosion and conservation. Longman, New York.

Morgan, R., Quinton, J. y Rickson, R. (1994). Modelling methodology for soil erosion assessment and soil conservation design: the EUROSEM approach. Outlook in Agriculture 23.

Olaya, Víctor. 2014. Sistemas de información geográfica; este libro utiliza código CSS adaptado de Better Web Readability Project. Dirección Web <http://volaya.es/writing>. http://volaya.github.io/libro-sig/chapters/Introduccion_fundamentos.html.

ONERN (Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales). 1974. Inventario, evaluación y uso racional de los recursos naturales de la costa, cuencas de los ríos Quilca y Tambo. Dpto. Arequipa, Moquegua y Puno. Situación del estudio de suelos en el Perú.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia.

Páez, M. y Pla, I. 1985. Erodabilidad relativa e índices de erodabilidad en suelos agrícolas de Venezuela. Trabajo presentado en la IV Conferencia Internacional sobre Conservación de Suelos. Maracay, Venezuela. Noviembre, 1985.

Palau, Antonio. 2016. La sedimentación en embalses. Medidas preventivas y correctoras. Dirección de Medio Ambiente y Calidad. Endesa Servicios, S. L. C. Madrid, España. Dirección Web apalau@enher.es

Proyecto Especial Majes Siguan (PEMS) - Autoridad Autónoma de Majes (AUTODEMA). 2015. Estudio del levantamiento topográfico y batimétrico del embalse de Aguada Blanca. Gobierno Regional de Arequipa, Perú.

Ramos Taipe, Cayo. 2001. Modelamiento ambiental para el análisis de susceptibilidad erosiva en la cuenca media y alta del río Cañete y determinación del mapa de erosión.

<http://tarwi.lamolina.edu.pe/~cramost/MODELO%20DE%20EROSION%20HIDRICA%20-%20SIG.pdf>

Rocha, Arturo. 2006. La problemática de la sedimentación de embalses en el aprovechamiento de los ríos peruanos; aplicada al embalse de Poechos. Primer Congreso Internacional de Hidráulica, Hidrología, Saneamiento y Medioambiente. HIDRO 2006.

Rodríguez, M; Florentino, A; Gallardo J y García, R. 2004. Sistemas de información geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en Badajoz – España, aplicando la metodología USLE. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CENIAP). Laboratorio de Sistemas en Agroecológicos. Maracay, Venezuela.

Roose, E. 1995. Natural mulch or chemical conditioners for reducing soil erosion in humid tropical area. Soil Science Society of Civil Engineers 98 2087–2098.

Sainz de Regoyos, Marta. 2003. Metodología para la evaluación de la erosión hídrica con modelos informáticos. Aplicación del modelo Geowepp a dos pequeñas cuencas en Madrid. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Madrid, España.

Sánchez, Jesús. 2016. Sedimentación en embalses. Manual de ingeniería de ríos. Capítulo 18. Instituto de Ingeniería, UNAM. Dirección Web http://eias.utalca.cl/isi/publicaciones/unam/sedimento_en_embalses.pdf

Santacruz De León. 2011. Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso del suelo en la cuenca del río Cahoacán, Chiapas, México. Aqua-LAC-Vol. 3 – N°1 – Mar. 2011.

Suárez, F. 1980. Conservación de suelos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José, Costa Rica. Editorial IICA. 3ra Edición.

Tazvitya L. 2001. Evaluación de la tasa de erosión hídrica y la producción de sedimentos en las cuencas de Ourense. Universidad Santiago de Compostela. España.

Triviño, A. y Munir, M. 2001. Sistemas de información geográfica y modelizaciones hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación. Generalitat Valenciana, Instituto Universitario de Geografía, Universidad de Alicante. Boletín de la A.G.E. N° 31-2001. Alicante, España.

Uri, N. y Lewis, J. 1998. The dynamics of soil erosion in US agriculture. *Sci. Total Environ.* 218 (1998). Summary Plus; Full text + links; PDF (171 k)

Verdín J, Pedreros D, Eilerts G. 2003. Índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI), FEWS - Red de alerta temprana contra la inseguridad alimentaria, Centroamérica, USGS/EROS Data Center, 2003

Wikipedia®. 2016. Sistema de información geográfica. Fundación Wikimedia, Inc. Dirección Web https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_informaci%C3%B3n_geogr%C3%A1fica

Wischmeier, W. y Smith, D. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions of the American geophysical Union.* 39: pp 258-291.

Wischmeier, W. y Smith, D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Agriculture Handbook N°. 537. USDA/Science and Education Administration, US. Govt. Printing, Washington.

La parte de anexos se encuentra disponible en la Sala Tesis
de la Biblioteca Agrícola Nacional "Orlando Olcese"