

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS Y SANITARIAS



**“ESTIMACIÓN DE SEDIMENTOS EN EMBALSES
APLICACIÓN PRÁCTICA: PRESA LA HONDURA”**

Por:

HORACIO MARCELO TAVERA ALTAMIRANO

Semestre II - 2020

TARIJA – BOLIVIA

DEDICATORIA

A Dios por ser fuente de inspiración en el proceso de mi formación profesional.

A mi señora madre Primitiva Altamirano por su amor, apoyo incondicional, su inagotable esfuerzo y sacrificio en pos de mi formación personal y profesional.

A mis hermanos por estar siempre a mi lado en los momentos buenos y difíciles de mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Dedicatoria	
Agradecimiento	
Resumen	
1. Generalidades.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Planteamiento del problema	3
1.4. Justificación del proyecto	4
1.5. Objetivos del proyecto.....	4
1.5.1. Objetivo General.....	4
1.5.2. Objetivos Específicos	4
1.5.3. Hipótesis	5
1.6. Alcance	5
1.6.1. Ubicación del Proyecto.....	5
1.6.2. Antecedentes de la presa.....	6
1.6.3. Ubicación de las estaciones meteorológicas.....	9
2. Marco Teórico.....	11
2.1. Método doble masa.....	11
2.2. Erosión.....	12
2.2.1. Tipos de erosión.....	12
2.2.2. Pérdida de suelo.....	13
2.2.3. Efectos de la erosión en la agricultura.....	13

2.3. Modelo USLE.....	13
2.3.1. Erosividad (R).....	14
2.3.2. Erodabilidad (K).....	15
2.3.3. Factor topográfico (LS)	16
2.3.4. Factor de cubierta (C).....	17
2.3.5. Práctica conservacionista, Factor (P).....	18
2.3.6. Niveles de erosión de suelos según USLE	18
2.4. Teledetección.....	18
2.4.1. Elementos básicos teledetección	19
2.4.2. Energía electromagnética	19
2.5. Tipos de resolución.....	20
2.5.1. Resolución espacial	20
2.5.2. Resolución espectral.....	21
2.5.3. Resolución radiométrica.....	22
2.5.4. Resolución temporal.....	23
2.6. Introducción LandSat	24
2.6.1. Antecedentes LandSat	24
2.6.2. Generalidades LandSat.....	25
2.6.3. Tipo de resolución – Espacial.....	28
2.6.4. Tipo de resolución - Radiométrica	29
2.6.5. Tipo de resolución – Espectral	30
2.6.6. Tipo de resolución – Temporal.....	31
2.7. Corrección atmosférica de superficie	32
2.7.1. ND a Radiancia.....	32

2.7.1.1. Método de escalamiento de la radiancia espectral.....	32
2.7.2. Conversión de radiancia a reflectancia.....	33
2.7.2.1. Cálculo de la reflectancia con corrección atmosférica el por método de sustracción de superficie oscuras (DOS1) para satélites ASTER L1T, Sentinel2, Landsat 4, 5, 7 y 8... 33	
2.8. Índice de imágenes satelitales.....	36
2.8.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada - NDVI.....	36
3. Marco Metodológico.....	40
3.1. Tipo de investigación a realizar.....	40
3.2. Materiales y equipos.....	40
3.3. Métodos.....	40
3.3.1. Factor topográfico LS.....	47
3.3.1.1. Cálculo de las pendientes de la cuenca.....	47
3.3.1.2. Cálculo de F.....	49
3.3.1.3. Cálculo de m.....	49
3.3.1.4. Cálculo del factor L.....	50
3.3.1.5. Cálculo del factor S.....	50
3.3.1.6. Calculo del factor LS.....	51
3.3.2. Cálculo de la erodabilidad del suelo o factor K.....	52
3.3.2.1. Descarga de información de los suelos a nivel mundial.....	52
3.3.2.2. A través de muestras de suelo.....	60
3.3.2.3. Factor lluvia o índice de erosividad pluvial (R).....	64
3.3.2.4. Ubicación de estaciones cercanas.....	64
3.3.2.5. Cálculo del IMF.....	66
3.3.2.6. Cálculo del R ecuación 1.....	77

3.3.2.7. Cálculo del R ecuación 2.....	78
3.3.2.8. Cálculo del R ecuación 3.....	79
3.3.3. Factor de cobertura vegetal C.....	80
3.3.3.1. Descarga de imágenes satelitales.....	80
3.3.3.2. Corrección de las bandas.....	83
3.3.3.3. Por una facilidad de manejo se usa el programa ENVI.....	85
3.3.3.4. Recorte y proyección.....	87
3.3.3.5. Conversión de números digitales a radiancia.....	90
3.3.3.6. Cálculo de la bruma.....	94
3.3.3.7. Cálculo de radiancia a reflectancia con corrección atmosférica.....	99
3.3.3.8. Cálculo del NDVI.....	102
3.3.3.9. Cálculo del factor de cobertura vegetal C.....	104
3.3.4. Cálculo del factor de prácticas de conservación P.....	106
3.3.5. Cálculo de la erosividad anual USLE.....	106
3.3.6. Cálculo de las áreas.....	108
3.3.7. Cálculo del volumen de suelo erosionado.....	110
3.3.8. Cálculo de la erosividad anual con Erosión 6.0 (USLE modificado).....	111
4. Análisis e interpretación de resultados.....	114
4.1. USLE método 1 con R1 y K1.....	114
4.2. USLE método 2 con R2 y K1.....	116
4.3. USLE método 3 con R3 y K2.....	118
4.3.1. Tiempo de vida útil del embalse.....	120
4.4. USLE método 4 con R3 Y K2 con EROSIÓN 6.0 (modificado).....	121
4.4.1. Coeficientes de erosividad (R3) medios anuales.....	121

4.4.2. Coeficientes de cobertura (C) medios anuales	121
4.4.3. Coeficiente de erodabilidad (K2) medio anual.....	122
4.4.4. Volumen anual de sedimentos.....	122
4.5. USLE método 5 con R3 y K1	123
4.5.1. Tiempo de vida útil del embalse.....	124
4.5.2. Ecuación USLE recalculada.....	124
4.5.3. Tiempo de vida útil del embalse (valor recalculada).....	125
4.6. Cuadro comparativo de los diferentes métodos.....	126
Conclusiones.....	128
Recomendaciones.....	131
Bibliografía.....	132

Anexos

Anexo A: Metadatos de las bandas espectrales del 2000 al 2018

Anexo B: Cálculo de la transmisividad de cada banda del 2000 al 2018

Anexo C: Planos de ubicación de las estaciones pluviométricas

Anexo D: Planos del Factor R método 1 del 2000 al 2016

Anexo E: Planos del Factor R método 2 del 2000 al 2016

Anexo F: Planos del Factor R método 3 del 2009 al 2018

Anexo G: Planos del Factor K del 2000 al 2018

Anexo H: Planos del Factor LS del 2000 al 2018

Anexo I: Planos del Factor C del 2000 al 2018

Anexo J: Planos USLE método 1 del 2000 al 2016

Anexo K: Planos USLE método 2 del 2000 al 2016

Anexo L: Planos USLE lluvia método 3 con muestras de suelo del 2009 al 2018

Anexo M: Planos USLE lluvia método 3 y datos FAO del 2009 al 2018

Anexo N: Erosión 6.0 del 2009 al 2018

Anexo O: Delimitación de cuenca Arc Map

Anexo P: Estaciones pluviométricas y análisis de consistencia

Anexo Q: Estudios de laboratorio del suelo

Anexo R: Cálculos de volúmenes de sedimento de cada modelo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Vista satelital de la presa La Hondura y la cuenca de aporte	5
Figura 1.2 Geometría del cuerpo de la presa "La Hondura"	6
Figura 2.1 Elementos de Teledetección.....	19
Figura 2.2 Representación de la energía electromagnética	20
Figura 2.3 Ejemplo de energía electromagnética	20
Figura 2.4 Resolución espacial.....	21
Figura 2.5 Resolución espectral.....	22
Figura 2.6 Resolución radiométrica.....	22
Figura 2.7 Resolución temporal.....	23
Figura 2.8 LandSat orbitando la tierra.....	24
Figura 2.9 Satélites lanzados desde 1970 a la fecha.....	26
Figura 2.10 Satélites activados y desarmados	27
Figura 2.11 Resolución espacial.....	28
Figura 2.12 Niveles de grises	29
Figura 2.13 Resolución espectral.....	30
Figura 2.14 Resolución temporal.....	31
Figura 2.15 Característica de NDVI en una planta sana y enferma	37
Figura 3.1 Procedimiento para obtener el factor LS.....	41
Figura 3.2 Procedimiento para obtener el factor K	42
Figura 3.3 Procedimiento para obtener el factor R.....	43
Figura 3.4 Procedimiento para obtener el factor C.....	44
Figura 3.5 Factores usados en la primer combinación	45

Figura 3.6 Factores usados en la segunda combinación.....	45
Figura 3.7 Factores usados en la tercer combinación.....	45
Figura 3.8 Factores usados en la cuarta combinación.....	46
Figura 3.9 Factores usados en la quinta combinación.....	46
Figura 3.10 Herramienta para recortar un DEM.....	47
Figura 3.11 DEM recortado.....	47
Figura 3.12 Herramienta para calcular las pendientes de la cuenca.....	48
Figura 3.13 Pendientes de la cuenca en grados.....	48
Figura 3.14 Cálculo del factor F.....	49
Figura 3.15 Cálculo del factor m.....	49
Figura 3.16 Cálculo del factor L.....	50
Figura 3.17 Cálculo del factor S.....	51
Figura 3.18 Cálculo del factor LS.....	51
Figura 3.19 Factor LS (adimensional).....	52
Figura 3.20 GeoNetwork.....	53
Figura 3.21 Archivo a descargar.....	53
Figura 3.22 Clasificación de suelos a nivel mundial.....	54
Figura 3.23 Clasificación de suelos a nivel nacional.....	55
Figura 3.24 Clasificación de suelos a nivel departamental.....	56
Figura 3.25 Clasificación de suelos de la cuenca.....	57
Figura 3.26 Ubicación de la herramienta Create Constant Raster.....	59
Figura 3.27 Utilización de la herramienta Create Constant Raster.....	59
Figura 3.28 Factor K ($T_n \cdot h / MJ \cdot mm$).....	60
Figura 3.29 Ubicación de las muestras de suelo.....	61

Figura 3.30 Muestra 1.....	61
Figura 3.31 Muestra 2.....	62
Figura 3.32 Muestra 3.....	62
Figura 3.33 Factor K ($T_n \cdot h / MJ \cdot mm$).....	63
Figura 3.34 Insertar ubicación de estaciones pluviométricas en Arc Map.....	64
Figura 3.35 Ubicación de las estaciones.....	65
Figura 3.36 Conversión de archivos a formato SHP.....	65
Figura 3.37 Ubicación de las estaciones en formato SHP.....	66
Figura 3.38 Tabla de contenidos Arc Map.....	67
Figura 3.39 Herramienta Join Arc Map.....	67
Figura 3.40 Opciones de la herramienta Join.....	68
Figura 3.41 Tabla de atributos formato SHP.....	68
Figura 3.42 Ubicación de la herramienta IDW.....	69
Figura 3.43 Llenado de datos de la herramienta IDW.....	69
Figura 3.44 Herramienta de configuración de entorno.....	70
Figura 3.45 Herramienta de configuración de entorno.....	70
Figura 3.46 Isoyetas mensuales de Enero a Marzo (mm).....	71
Figura 3.47 Isoyetas mensuales de Abril a Junio (mm).....	72
Figura 3.48 Isoyetas mensuales de Julio a Septiembre (mm).....	73
Figura 3.49 Isoyetas mensuales de Octubre a Diciembre (mm).....	74
Figura 3.50 Ubicación de la calculadora raster.....	75
Figura 3.51 Fórmula insertada.....	75
Figura 3.52 Suma de las isoyetas (mm).....	76
Figura 3.53 Ecuación del IMF en la calculadora raster.....	76

Figura 3.54 IMF resultante del año 2000 (mm).....	77
Figura 3.55 Ecuación de coeficiente R1 en la calculadora raster	77
Figura 3.56 Raster con la ecuación R1 (MJ*mm/ha*h) año 2000	78
Figura 3.57 Ecuación de coeficiente R2 en la calculadora raster	78
Figura 3.58 Raster con la ecuación R2 (MJ*mm/ha*h) año 2000	79
Figura 3.59 Ecuación de coeficiente R3 en la calculadora raster	79
Figura 3.60 Raster con la ecuación R3 (MJ*mm/ha*h) año 2009	80
Figura 3.61 Ubicación de la zona de estudio en la página USGS	80
Figura 3.62 Selección del LandSat 7	81
Figura 3.63 Nubosidad de las imágenes satelitales	81
Figura 3.64 Selección del indicador “Día”	82
Figura 3.65 Imágenes localizadas y que pueden descargarse.....	83
Figura 3.66 Archivo WinRar	84
Figura 3.67 Banda con errores de valor nulo.....	84
Figura 3.68 Extensiones Arc Map y ENVI.....	85
Figura 3.69 Manejo en ENVI	85
Figura 3.70 Banda corregida con ENVI	86
Figura 3.71 Exportar archivo de ENVI a Arc Map	86
Figura 3.72 Banda exportada a Arc Map.....	87
Figura 3.73 Ubicación de la cuenca en la banda	88
Figura 3.74 Model builder para recorte y proyección	88
Figura 3.75 Herramientas que contendrá el model builder	89
Figura 3.76 Herramienta creada con el model builder para proyectar	89
Figura 3.77 Raster recortado	90

Figura 3.78 Model builder para convertir ND a radiancia	91
Figura 3.79 Herramientas usadas para el Model Buiillder	91
Figura 3.80 Herramienta model builder para convertir ND a radiancia.....	92
Figura 3.81 MTL leídos con la herramienta Landsat Tools	93
Figura 3.82 Radiancia de la banda.....	93
Figura 3.83 MTL leídos con WordPad.....	94
Figura 3.84 Ubicación del día juliano en el MTL	95
Figura 3.85 Ubicación de la herramienta de raster constante.....	95
Figura 3.86 Uso de la herramienta de raster constante.....	96
Figura 3.87 Raster constante creado.....	96
Figura 3.88 Model builder para el efecto bruma	97
Figura 3.89 Herramientas usadas para el model builder	98
Figura 3.90 Model builder para el cálculo del efecto bruma.....	98
Figura 3.91 Efecto bruma calculado.....	99
Figura 3.92 Cálculo de la transmisividad.....	100
Figura 3.93 Model Builder para el cálculo de radiancia a reflectancia	101
Figura 3.94 Model builder para el cálculo del efecto bruma.....	101
Figura 3.95 Herramienta creada para el cálculo de e radiancia a reflectancia	102
Figura 3.96 Model builder para el cálculo del NDVI.....	103
Figura 3.97 Herramienta usada en el model builder para el cálculo del NDVI	103
Figura 3.98 Herramienta creada para el cálculo del NDVI	103
Figura 3.99 NDVI “Índice de vegetación” calculado (adimensional).....	104
Figura 3.100 Uniformizando el valor de las fuentes de agua	104
Figura 3.101 Fuentes de agua con valor único	105

Figura 3.102 Cálculo del coeficiente C	105
Figura 3.103 Coeficiente C calculado (Adimensional)	106
Figura 3.104 Cálculo del USLE	106
Figura 3.105 USLE método 1 (Tn/ha*año) año 2000	107
Figura 3.106 USLE método 2 (Tn/ha*año) año 2000	107
Figura 3.107 USLE método 3 (Tn/ha*año) año 2009	108
Figura 3.108 Model builder creado para el cálculo de las áreas de los raster	108
Figura 3.109 Model builder para el cálculo de las áreas	109
Figura 3.110 Archivo SHP que contiene las áreas	109
Figura 3.111 Tabla de atributos del SHP creado	110
Figura 3.112 Ingreso de factores a Erosión 6.0	112
Figura 4.1 Volumen de suelo erosionado método 1	115
Figura 4.2 Volumen de suelo erosionado método 2	117
Figura 4.3 Volumen de suelo erosionado método 3	119
Figura 4.4 Volumen de suelo erosionado método 5	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Niveles característicos del embalse "La Honduras"	7
Tabla 1.2 Volúmenes característicos del embalse "La Honduras".	7
Tabla 1.3 Parámetros morfométricos de la cuenca Pajchani	8
Tabla 1.4 Ubicación de las estaciones meteorológicas.....	9
Tabla 2.1 Clasificación de la erosión.....	18
Tabla 2.2 Rangos que abarcan los niveles de gris	23
Tabla 2.3 Variables de la ecuación de ND a radiancia.....	32
Tabla 2.4 Valores de irradiancia Media Sola Exo-atmosférica $ESUN_{\lambda}$ Landsat.....	34
Tabla 2.5 Rango espectral de las bandas	35
Tabla 2.6 Ejemplo de cálculo y valor de NDVI	38
Tabla 3.1 Ubicación de las muestras	60
Tabla 3.2 Resultados de las muestras	63
Tabla 3.3 Precipitación mensual año 2000 de las estaciones cercanas	66
Tabla 3.4 Volumen de suelo erosionado	110
Tabla 3.5 Volúmenes actuales del embalse la Honduras	111
Tabla 3.6 Valores medios de los factores R, K y C.....	112
Tabla 4.1 USLE anuales método 1	114
Tabla 4.2 Volúmenes actuales del embalse la Honduras	114
Tabla 4.3 USLE anuales método 2	116
Tabla 4.4 Volúmenes actuales del embalse la Honduras	116
Tabla 4.5 USLE anuales método 3	118
Tabla 4.6 Volúmenes actuales del embalse la Honduras	118

Tabla 4.7 Volumen de sedimentos anual.....	119
Tabla 4.8 R medio de cada año.....	121
Tabla 4.9 Coeficiente C de cada año	121
Tabla 4.10 Coeficiente K de cada año.....	122
Tabla 4.11 USLE método 4 Erosión 6.0.....	122
Tabla 4.12 USLE anuales método 5	123
Tabla 4.13 Volúmenes actuales del embalse La Hondura.....	123
Tabla 4.14 Volumen anual de sedimentos método 5.....	124
Tabla 4.15 Zonas que presentaron una mayor erosión en 2018	125
Tabla 4.16 Resumen de los resultados de cada método	126