

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA Y OBRAS SANITARIAS**



**"ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO EN LA PRESA LA
HONDURA DE LA CUENCA DEL RÍO PAJCHANI, APLICANDO LA ECUACIÓN
UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS (USLE) Y EL MODELO EMPÍRICO
GAVRILOVIC"**

Por:

ITAMAR FRANCO FLORES ACOSTA

Proyecto presentado a consideración de la "UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN
MISAEL SARACHO", como requisito para optar el grado académico de Licenciatura de
Ingeniería Civil

Semestre II -2020

Tarija-Bolivia

DEDICATORIA

A mi papá Henry Flores Sullca por haberme inculcado valores y principios, a él que siempre me dio su apoyo incondicional y confianza en todas las actividades que he realizado.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	5
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	6
1.4. HIPÓTESIS	7
1.5. OBJETIVOS.....	7
1.5.1. Objetivo general.....	7
1.5.2. Objetivos específicos	7
1.6. DELIMITACIONES	7
1.6.1. Límite geográfico.....	7
1.6.2. Límite temporal.....	9
1.7. ALCANCE DEL TRABAJO.....	9
1.8. JUSTIFICACIÓN.....	9
II. MARCO TEÓRICO	11
2.1. MARCO HISTÓRICO	11
2.2. MARCO CONCEPTUAL	12
2.2.1. Suelo	12
2.2.2. Erosión de los suelos.....	12
2.2.2.1. Erosión natural	12
2.2.2.2. Erosión acelerada	13
2.2.3. Tipos de erosión.....	13
2.2.4. Formas de erosión hídrica.....	14
2.2.4.1. Erosión por salpicadura.....	14

2.2.4.2.	Erosión laminar	14
2.2.4.3.	Erosión por surcos	14
2.2.4.4.	Erosión por cárcavas	15
2.2.5.	Factores que originan la erosión hídrica	15
2.2.5.1.	Clima	15
2.2.5.2.	Suelo	15
2.2.5.3.	Vegetación	16
2.2.5.4.	Topografía	16
2.2.5.5.	Humano	16
2.2.6.	Presa	16
2.2.7.	Embalse	17
2.2.8.	Proceso de sedimentación en embalses	17
2.2.9.	Efectos de la sedimentación de embalses	18
2.2.10.	Transporte de sedimento	19
2.2.11.	Métodos para estimar pérdida de suelo por erosión	20
2.2.11.1.	Método de medición directa	21
2.2.11.2.	Método de modelos matemáticos	21
2.2.12.	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo - USLE	25
2.2.12.1.	Factor lluvia o índice de erosividad pluvial (R)	26
2.2.12.2.	Factor de erosionabilidad o erodabilidad del suelo (K)	28
2.2.12.3.	Factor topográfico (LS)	32
2.2.12.4.	Factor de cobertura vegetal (C)	37
2.2.12.5.	Factor de prácticas de conservación (P)	38
2.2.13.	Método de Gavrilovic	39
2.2.14.	Coeficiente de entrega de sedimentos o factor de entrega (SDR)	44

2.3.	MARCO LEGAL Y/O NORMATIVO	45
2.3.1.	Ley del Medio Ambiente (Ley N° 1333).....	45
2.3.2.	Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) - Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (VRHR)	46
2.4.	SITUACIÓN ACTUAL DEL ARTE	46
III.	MARCO METODOLÓGICO	48
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	48
3.2.	UNIVERSO DE TRABAJO Y MUESTRA.....	48
3.3.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	49
3.4.	INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN	49
3.4.1.	Material de campo.....	49
3.4.2.	Material de gabinete.....	50
3.5.	DESCRIPCIÓN DEL DESARROLLO DEL PROYECTO	50
3.5.1.	Fase de pre-campo	50
3.5.2.	Fase de campo.....	50
3.5.3.	Fase de gabinete	51
IV.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	52
4.1.	TRABAJO DE CAMPO.....	52
4.2.	TRABAJO DE GABINETE.....	59
4.2.1.	Caracterización de la cuenca.....	60
4.2.2.	Estimación de los factores del método USLE.....	60
4.2.3.	Estimación de los coeficientes del método Gavrilovic	65
4.2.4.	Estimación de volúmenes de sedimento	68
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
5.1.	ASPECTOS GENERALES DE LA CUENCA.....	69

5.2.	DATOS TÉCNICOS DE LA PRESA LA HONDURA.....	72
5.3.	PRECIPITACIONES.....	73
5.4.	ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE EROSIVIDAD PLUVIAL (R).....	79
5.5.	ESTIMACIÓN DE LA ERODABILIDAD DEL SUELO (K)	82
5.6.	ESTIMACIÓN DEL FACTOR TOPOGRÁFICO (LS).....	83
5.7.	ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE COBERTURA VEGETAL (C).....	85
5.8.	ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN (P)	85
5.9.	DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA MEDIA ANUAL DE SUELO (A) – USLE	86
5.10.	DETERMINACIÓN DE LA DESCARGA MEDIA ANUAL DE SUELO EROSIONADO (G) - GAVRILOVIC	86
5.11.	CURVA ALTURA VOLUMEN	87
5.12.	DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO.....	88
5.12.1.	Metodología USLE	88
5.12.2.	Metodología Gavrilovic	90
5.12.3.	Metodología de Gavrilovic aplicando el coeficiente de pendiente	91
5.12.4.	Tiempo de vida útil estimado.....	93
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
6.1.	CONCLUSIONES.....	97
6.2.	RECOMENDACIONES	98

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ANEXO 1. REGISTRO DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS

ANEXO 2. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA

ANEXO 3. ANÁLISIS DE HOMOGENEIDAD

ANEXO 4. PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE

ANEXO 5. ZONIFICACIÓN Y SUB-ZONIFICACIÓN PLUVIOMÉTRICA

ANEXO 6. FACTOR DE EROSIVIDAD PLUVIAL (R)

ANEXO 7. FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO (K)

ANEXO 8. FACTOR TOPOGRÁFICO (LS)

ANEXO 9. FACTOR DE COBERTURA VEGETAL (C)

ANEXO 10. MÉTODO DE GAVRILOVIC

ANEXO 11. MÉTODO DE GAVRILOVIC (considerando el coeficiente de pendiente)

ANEXO 12. ANÁLISIS DE LABORATORIO

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imagen satelital de la cuenca aportante de la presa La Hondura.....	5
Figura 2. Erosión en el estribo derecho de la presa.	6
Figura 3. Erosión en el estribo izquierdo de la presa.....	6
Figura 4. Ubicación del área de estudio.....	8
Figura 5. Vía de acceso a la presa La Hondura.	9
Figura 6. Proceso de erosión.....	12
Figura 7. Embalse en proceso de sedimentación.	18
Figura 8. Fórmulas para la estimación del transporte de sedimentos.	20
Figura 9. Modelos de estimación de sedimentos.	24
Figura 10. Monograma de erodabilidad del suelo K.	30
Figura 11. Efecto del grado y longitud de la pendiente sobre la pérdida de suelo.	33
Figura 12. Representación gráfica de la aplicación del método “contorno-Punto extremo”.....	36
Figura 13. Universo de trabajo.	48
Figura 14. Ubicación de puntos de muestra de suelo.	53
Figura 15. Extracción de muestra de suelo.	54
Figura 16. Muestra de suelo antes del proceso de ignición o calcinación de M.O.....	55
Figura 17. Suelo en el horno de ignición o calcinación.....	55
Figura 18. Muestra de suelo después del proceso de ignición o calcinación de M.O.	56
Figura 19. Determinación del (%) arena, limo y arcilla.	57
Figura 20. Proceso de decantación del material.	57
Figura 21. Triángulo de textura de suelo.	58
Figura 22. Vegetación herbácea.....	58
Figura 23. Matorral ralo.....	59
Figura 24. Tierra erosionada con escasa vegetación.....	59
Figura 25. Proceso para la determinación de parámetros geomorfométricos de la cuenca.	60
Figura 26. Esquema metodológico para la obtención del factor R.....	61
Figura 27. Esquema metodológico para la obtención del factor K.....	62
Figura 28. Esquema metodológico para la obtención del factor LS.....	63

Figura 29. Esquema metodológico para obtener el factor C.....	64
Figura 30. Esquema metodológico para obtener la pérdida media anual de suelo A.	64
Figura 31. Esquema metodológico para el coeficiente T.....	65
Figura 32. Esquema metodológico para la obtención del coeficiente Z.	66
Figura 33. Esquema metodológico para la determinación del coeficiente R.....	67
Figura 34. Mapa de la cuenca Pajchani.	69
Figura 35. Curva hipsométrica.....	70
Figura 36. Perfil del río principal.....	70
Figura 37. Mapa de ubicación de estaciones.	73
Figura 38. Análisis de curva doble masa estación (Aeropuerto-Trancas).	74
Figura 39. Análisis curva doble masa estación (Aeropuerto-Canasmoro).	74
Figura 40. Análisis curva doble masa estación (Aeropuerto-Sella Qdas.).	75
Figura 41. Análisis curva doble masa estación (Aeropuerto-Tucumillas).....	75
Figura 42. Zonificación pluviométrica.	78
Figura 43. Sub-zonificación pluviométrica.	78
Figura 44. Sub-zonificación I.	79
Figura 45. Sub-zonificación II.	79
Figura 46. Gráfica del hietograma de intensidad para un T = 10 años.	80
Figura 47. Curva altura volumen Presa La Honduras	88
Figura 48. Comparación de volúmenes de sedimento método USLE y Gavrilovic.	90
Figura 49. Comparación de alturas de sedimento método USLE y Gavrilovic.....	91
Figura 50. Volúmenes de sedimento método USLE y Gavrilovic considerando el coeficiente de pendiente.....	92
Figura 51. Altura de sedimento método USLE y Gavrilovic considerando el coeficiente de pendiente.	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ecuaciones para determinar el factor de erosividad pluvial	27
Tabla 2 Factor de erodabilidad del suelo K	32
Tabla 3 Valor de LS, según la pendiente del terreno	36
Tabla 4 Factor de cobertura vegetal	37
Tabla 5 Factor de prácticas de conservación P	39
Tabla 6 Coeficiente de uso del suelo X	41
Tabla 7 Coeficiente de resistencia del suelo a la erosión Y	41
Tabla 8 Coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados ϕ	42
Tabla 9 Situación actual del arte	46
Tabla 10 Operacionalización de variables	49
Tabla 11 Coordenadas de los puntos de muestreo de suelo	53
Tabla 12 Parámetros geomorfométricos cuenca Pajchani	70
Tabla 13 Datos técnicos Presa La Hondura	72
Tabla 14 Estaciones meteorológicas	73
Tabla 15 Resumen del análisis de consistencia	75
Tabla 16 Resumen de homogeneidad Test Mann-Kendall	76
Tabla 17 Resultados del análisis de ajuste	77
Tabla 18 Hietograma de diseño para un periodo de retorno T = 10 años	80
Tabla 19 Energía cinética de la lluvia (E)	81
Tabla 20 Número de lluvias erosivas en la estación Tucumillas	81
Tabla 21 Factor de erosividad pluvial R	82
Tabla 22 Cálculo del factor K en función al contenido de materia orgánica y textura ...	82
Tabla 23 Resumen de resultados factor K	83
Tabla 24 Cálculo del factor K en función al (%) arena, limo y arcilla	83
Tabla 25 Cálculo del factor LS según Horton	84
Tabla 26 Cálculo del factor LS según Williams y Berndt	84
Tabla 27 Resumen de resultados factor LS	85
Tabla 28 Valores del factor C	85
Tabla 29 Valores de pérdida de suelo por erosión	86
Tabla 30 Resultados de la pérdida media anual de suelo - USLE	86

Tabla 31 Descarga media anual de suelo erosionada - Gavrilovic	86
Tabla 32 Valores de área y volumen presa La Hondura	87
Tabla 33 Proceso de cálculo del coeficiente de entrega de sedimento CES.....	88
Tabla 34 Volumen de sedimento en función a la vida útil – N° lluvia erosiva = 20	89
Tabla 35 Volumen de sedimento en función a la vida útil – N° lluvia erosiva = 25	89
Tabla 36 Volumen de sedimento en función a la vida útil	90
Tabla 37 Coeficiente de pendiente (j).....	91
Tabla 38 Volumen de sedimento aplicando el coeficiente de pendiente	92
Tabla 39 Comparación de resultados en la estimación del tiempo de la vida útil de la presa La Hondura.....	93
Tabla 40 Comparación de datos de entrada y cálculo con ambos métodos USLE y Gavrilovic	95
Tabla 41 Comparación del volumen de sedimento USLE, Gavrilovic- Batimetría periodo 2009-2019	96