

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
PROGRAMA ESPECIAL DE TITULACIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TRABAJO DIRIGIDO
“DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN HÍDRICA Y LA
PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS DE LA CUENCA DE LA
QUEBRADA EL COMÚN DE CARAPARÍ”

Por:

DANIEL GERONIMO YURQUINA GALLARDO

Tesis, presentada a consideración de la “**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO**”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

Junio 2012

TARIJA-BOLIVIA

V° B°

Tutor: Ing. Marcela E. Hoyos López

Ing. Luis Alberto Yurquina F.
DNO. FAC. CIENCIAS Y TECNOLOGIA

MSc. Lic. Marlene Hoyos M.
DIRECTORA DE "P.E.T."

APROBADO POR:

TRIBUNAL:

Ing. Dámaris Nogales E.

TRIBUNAL 1

Ing. Andrea Shimura Méndez

TRIBUNAL 2

El tribunal calificador del presente Trabajo de Tesis, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el trabajo, siendo las mismas únicamente responsabilidad del autor.

DEDICATORIA

Dedicado a mi hija, por ser el motivo que me lleva a seguir adelante cada día.

A mi familia que siempre me apoya incondicionalmente.

AGRADECIMIENTO

Un profundo agradecimiento a mi familia por su predisposición y gentil cooperación en todo momento.

A todos mis amigos y compañeros de trabajo.

RESUMEN

Dada la incertidumbre con la que se emplean las fórmulas empíricas (modelos) existentes, para determinar el arrastre de sedimentos en ríos con pendientes considerables, se vio por conveniente desarrollar este proyecto de grado. El cual tiene como objetivo fundamental, calibrar una fórmula semiempírica la misma que se desarrollará partir de los datos de la cuenca de estudio y permitirá determinar de manera rápida el caudal sólido en función del caudal líquido.

La fórmula a determinar, se calibrará a partir de datos, los que se determinarán con fórmulas o modelos empíricos propuestos por varios investigadores. Además que se obtendrán previamente muestras del sedimento del lecho, para su posterior estudio en laboratorio (granulometría, peso específico, etc.) también se realizarán levantamientos topográficos del lecho, con el fin de determinar las propiedades morfométricas del cauce.

Para estimar el Caudal Líquido (primer parámetro fundamental de la ecuación a calibrar) se desarrollará un análisis completo de la cuenca vertiente, es decir, se determinará todas sus propiedades. Igualmente se hará un estudio hidrológico de la cuenca para determinar caudales medios y máximos, este último para cada período de retorno.

En la estimación de sedimentos se utilizarán varios tipos de ecuaciones y/o fórmulas empíricas, siendo las más importantes:

- ❖ Ecuaciones que consideran una relación de esfuerzos cortantes, conocidas como ecuaciones del tipo Du Boys.
- ❖ Ecuaciones que consideran una relación de caudales, conocidas como ecuaciones del tipo Schoklistch.
- ❖ Ecuaciones basadas en consideraciones estadísticas, del tipo Eistein.

Se dedicará un capítulo completo al análisis climatológico de la cuenca. En este se determinará la temperatura media anual, la evapotranspiración potencial, además de clasificar el tipo de clima de nuestra cuenca de acuerdo a la clasificación de Vladimir Koeppen.

Por ultimo, se hará un estudio detallado de la erosión hídrica de la cuenca aplicando modelos como el USLE, MUSLE Y RUSLE. También se realizará un análisis comparativo entre la pérdida de suelo de la cuenca y el arrastre de sedimentos que llegan al embalse.

ÍNDICE

	PÁGINA
INTRODUCCIÓN	01
1. ASPECTOS GENERALES	03
1.1. GENERALIDADES	03
1.2. JUSTIFICACIÓN	03
1.3. OBJETIVOS	03
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	03
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	03
2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO	05
2.1. INTRODUCCIÓN	05
2.2. UBICACIÓN	05
2.3. HIDROGRAFÍA	08
2.4. CLIMATOLOGÍA	08
2.5. VEGETACIÓN Y SUELO	09
2.6. GEOMORFOLOGÍA	09
2.7. GEOLOGÍA	11
2.8. FISIOGRAFÍA	16
3. ANÁLISIS Y ESTUDIO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA	17
3.1. DEFINICIÓN DE CUENCA	17
3.2. PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA CUENCA DE ESTUDIO	18

3.2.1.	ÁREA DE LA CUENCA	18
3.2.2.	PERÍMETRO REAL Y ESTILIZADO	19
3.2.3.	ÍNDICE DE COMPACIDAD	19
3.2.4.	MEDIDAS DE RECTÁNGULO EQUIVALENTES	20
3.2.5.	FACTOR DE FORMA	20
3.3.	PROPIEDADES DE RELIEVE DE LA CUENCA DE ESTUDIO	21
3.3.1.	INDICE GLOBAL O PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA	21
3.3.2.	PEDIENTE MEDIA DE LA CUENCA	21
3.3.3.	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	23
3.3.4.	CURVA HIPSOMÉTRICA	25
3.3.5.	ALTITUDES CARACTERÍSTICAS	26
3.4.	PROPIEDADES MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA DE ESTUDIO	26
3.4.1.	ORDEN DE LOS RÍOS	26
3.4.2.	DENSIDAD DE DRENAJE	29
3.4.3.	RELACIÓN DE CONFLUENCIA	29
3.4.4.	RELACIÓN DE LONGITUD	30
4.	ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DE ESTUDIO	31
4.1.	DEFINICIÓN DE HIDROLOGÍA	31
4.2.	CICLO HIDROLÓGICO	31
4.3.	ANÁLISIS DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN	32
4.3.1.	MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN	33
4.3.2.	ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS	33

4.4.	PRECIPITACIONES MÁXIMAS	34
4.4.1.	PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 24 HORAS	34
4.4.1.1.	LEY DE DISTRIBUCIÓN DE GUMBELL	37
4.4.2.	PRECIPITACIÓN MÁXIMA PARA PERÍODOS DE RETORNO INFERIORES A LAS 24 HORAS Y SUPERIORES A LAS 2 HORAS	39
4.4.3.	PRECIPITACIÓN MÁXIMA PARA PERÍODOS DE RETORNO INFERIORES A LAS 2 HORAS	40
4.4.3.1.	MÉTODO DE BELL	40
4.4.3.2.	MÉTODO DE LA REGRESIÓN	42
4.4.4.	CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN - FRECUENCIA	42
4.5.	CAUDALES MÁXIMOS	44
4.5.1.	ESCORRENTÍA DIRECTA	44
4.5.1.1.	MÉTODO DE LA CURVA FUNDAMENTO	44
4.5.1.2.	PROCEDIMIENTO	49
4.5.2.	MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS	50
4.5.2.1.	FÓRMULA RACIONAL	52
4.5.2.2.	FÓRMULA DE PASSENTI	54
4.5.2.3.	HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR	55
4.5.2.4.	MÉTODO DE MONTECARLO	57
4.5.2.4.1.	FUNDAMENTACIÓN	57
4.5.2.4.2.	PROCEDIMIENTO	58
4.5.2.4.3.	FÓRMULAS EMPÍRICAS	58

4.5.3. COMPARACIÓN DE MÉTODOS	63
5. ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO DE LA CUENCA QUEBRADA EL COMÚN	65
5.1. EROSIÓN	66
5.1.1. DEFINICIÓN DE EROSIÓN	66
5.1.2. AGENTES EROSIVOS	67
5.1.3. TIPOS DE EROSIÓN DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO	67
5.2. MODELOS PARA ESTIMAR LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS	71
5.2.1. INTRODUCCIÓN	71
5.2.2. MODELOS UTILIZADOS EN LA DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO PROMEDIO	71
5.2.2.1. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS (USLE)	72
5.2.2.2. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS REVISADA (RUSLE)	79
5.2.2.3. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS MODIFICADA (MUSLE)	80
5.2.3. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS	81
5.2.3.1. MODELO USLE	81
5.2.3.2. MODELO RUSLE	83
5.2.3.3. MODELO MUSLE	84
5.2.4. APLICACIÓN PRÁCTICA	85
5.2.4.1. MODELO USLE	85
5.2.4.2. MODELO RUSLE	85

5.2.4.3. MODELO MUSLE	85
5.2.5. COMPARACIÓN DE MODELOS Y DETERMINACIÓN DEL VALOR FINAL	86
5.3. TRANSPORTE DE SEDIMENTO	87
5.3.1. INTRODUCCIÓN	87
5.3.2. PROPIEDADES DEL SEDIMENTO	88
5.3.3. PROPIEDADES DEL SEDIMENTO ALUVIAL	89
5.4. CONCEPTOS BÁSICOS	96
5.4.1. CORRIENTE ALUVIAL	96
5.4.2. FORMAS DEL LECHO	97
5.4.3. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DEL CAUCE	100
5.4.4. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS SEDIMENTOS	101
5.4.5. INICIACIÓN DEL MOVIMIENTO	103
5.4.6. REGÍMENES DEL LECHO	106
5.4.7. RUGOSIDAD DEL LECHO	107
5.5. CUANTIFICACIÓN DEL ARRASTRE DE SEDIMENTOS	108
5.5.1. CAPACIDAD DE TRANSPORTE SÓLIDO	108
5.5.2. ECUACIONES QUE CONSIDERAN UNA RELACIÓN DE ESFUERZOS	109
5.5.2.1. FÓRMULA DE DU BOYS	109
5.5.2.2. FÓRMULA DE BAGNOLD	112
5.5.2.3. ECUACIÓN DE FRIJLINK	114
5.5.3. ECUACIONES QUE CONSIDERAN UNA	114

RELACIÓN DE CAUDALES		
5.5.3.1.	FÓRMULA DE SCHOKLITSCH	114
5.5.3.2.	FÓRMULA DE MEYER-PETER Y MULLER	115
5.5.4.	ECUACIONES BASADAS EN CONSIDERACIONES ESTADÍSTICAS	117
5.5.4.1.	FÓRMULA DE EINSTEIN	117
5.5.5.	OTRAS ECUACIONES	128
5.5.5.1.	ECUACIÓN DE ACKERS – WHITE	128
5.5.5.2.	FÓRMULA DE ENGELUND	129
5.5.5.3.	ECUACIÓN DE DJOROVIC	130
5.5.6.	COMPARACIÓN DE MÉTODOS	132
5.5.7.	APORTE ESPECÍFICO DE SEDIMENTOS	133
5.6.	ECUACIÓN A CALIBRAR	135
5.6.1.	FUNDAMENTACIÓN	135
5.6.2.	PROCEDIMIENTO	136
5.6.3.	APLICACIÓN PRÁCTICA	136
5.6.4.	COMPARACIÓN DE VALORES ENTRE LOS MODELOS ESTUDIADOS Y LA FORMULA CALIBRADA	137
5.6.5.	DETERMINACIÓN FINAL DEL APORTE ESPECÍFICO DE SEDIMENTOS	137
5.6.6.	VALIDACIÓN DE RESULTADOS	137
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	138
6.1.	CONCLUSIONES	138

6.2. RECOMENDACIONES	140
7. BIBLIOGRAFÍA	142
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización en la Macro Región del Departamento de Tarija	05
Figura 2. Localización en la Micro Región del Departamento de Tarija	06
Figura 3. Mapa de localización en la Región	06
Figura 4. Mapa de localización en la Micro Región	07
Figura 5: Delimitación de la cuenca de la quebrada El Común	19
Figura 6. Desnivel de la cuenca de la quebrada El Común	23
Figura 7. Orden de los ríos de la cuenca de la quebrada El Común	28
Figura 8. Ciclo Hidrológico	32
Figura 9. Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia	44
Figura 10. Gráfico de Caudales máximos con fórmulas empíricas	63
Figura 11. Variación del ángulo de reposo Θ , con materiales de tamaño uniforme	95
Figura 12. Formas generales del lecho de un río	99
Figura 13. Diagrama de Shields	104
Figura 14. Acción del Esfuerzo Cortante	109
Figura 15. Parámetro de Straub 1	111
Figura 16. Parámetro de Straub 2	112
Figura 17. Gráfico logarítmico de Einstein y Barbosa	124
Figura 18. Resistencia de las formas de fondo según Einstein y Barbosa	125

Figura 19. Factor de Corrección “Y”	126
Figura 20. Factor de Corrección “ δ' ”	126
Figura 21. Funciones \emptyset^* y Ψ^* de Einstein	127
Figura 22. Factor de Corrección “ δ ”	126
Figura 23. Factor de Corrección “ δ ”	126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Precipitación mensual acumulada, estación Yacuiba	35
Tabla 2. Precipitación mensual acumulada, estación Caraparí	36
Tabla 3. Serie anual de precipitación máxima diaria, en estaciones indicadas	37
Tabla 4. Lluvias máximas diarias para distintos períodos de retorno	38
Tabla 5. Precipitación máxima para períodos de tiempo inferiores a las 24 horas y superiores a las 2 horas	40
Tabla 6. Precipitación máxima para períodos de tiempo inferiores a 2 horas	41
Tabla 7. Precipitación máxima para períodos de tiempo inferiores a 2 horas (Método de la regresión)	42
Tabla 8. Clases de suelos y tratamientos de suelos	46
Tabla 9. Precipitación efectiva	50
Tabla 10. Valores para el coeficiente de escorrentía	53
Tabla 11. Caudales máximos para diferentes períodos de retorno (Método Racional)	54
Tabla 12. Caudales máximos para diferentes períodos de retorno (Fórmula de Passenti)	55
Tabla 13. Caudales máximos para diferentes períodos de retorno (Hidrograma Triangular)	56

Tabla 14. Caudales máximos para diferentes períodos de retorno (Método de Montecarlo)	59
Tabla 15. Caudal específico de crecidas	60
Tabla 16. Coeficiente C para distintos períodos de retorno T	60
Tabla 17. Caudales máximos Fórmulas empíricas	62
Tabla 17. Caudales máximos para diferentes períodos de retorno (Hidrograma Triangular)	56
Tabla 18. Caudales máximos de los diferentes métodos analizados	63
Tabla 19. Comparación de caudales máximos	64
Tabla 20. Valores de erosividad para distintos tipos de suelos	74
Tabla 21. Valores de K –Clasificación SCS	77
Tabla 22. Valores de C – Coeficiente de cultivo	78
Tabla 23. Factor P –Según SCS	79
Tabla 24. Factor P – Según Mannaerts	80
Tabla 25. Determinación de R	81
Tabla 26. Determinación de K aplicando Wishmeier y Smith	82
Tabla 27. Erosividad de la lluvia	83
Tabla 28. Caudales máximos para un Tiempo de Concentración T_c	84
Tabla 29. Pérdidas de suelo Método de USLE	85
Tabla 30. Pérdidas de suelo Método de RUSLE	85
Tabla 31. Pérdidas de suelo Método de MUSLE	86
Tabla 32. Comparación entre modelos	86
Tabla 33. Diferencia entre modelos	86
Tabla 34. Grado de erosión	87

Tabla 35. Clasificación de tamaño de sedimento	90
Tabla 36. Valores de Diámetros	92
Tabla 37. Coeficientes característicos	93
Tabla 38. Peso específico	93
Tabla 39. Formas del lecho según el tipo de régimen	97
Tabla 40. Características morfométricas del cauce (ancho y pendiente)	100
Tabla 41. Tirantes máximos del cauce (m)	101
Tabla 42. Parámetros característicos	103
Tabla 43. Velocidad de arrastre crítica	105
Tabla 44. Regímenes del lecho	106
Tabla 45. Rugosidad del lecho	108
Tabla 46. Valores de los Coeficientes	129
Tabla 47. Valores de “X”	132
Tabla 48. Aporte específico de Sedimentos	133
Tabla 49. Valor Final del Aporte específico de Sedimentos	133
Tabla 50. Volumen anual de Sedimentos	134
Tabla 51. Volumen anual de Sedimentos vs. Caudal de Aporte	136
Tabla 52. Comparación de los Resultados aplicando la Fórmula Calibrada y Modelos	137