

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“ESTIMACIÓN DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES
MEDIANTE EL MÉTODO DE BALANCE HÍDRICO
THORNTHWAITE-MATHER, APLICADA A LA PRESA
CALDERAS”**

Por:

OMAR COLQUE HUANCA

Semestre I - 2017
TARIJA - BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA Y OBRAS SANITARIAS

**“ESTIMACIÓN DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES
MEDIANTE EL MÉTODO DE BALANCE HÍDRICO
THORNTHWAITE-MATHER, APLICADA A LA PRESA
CALDERAS”**

Por:

OMAR COLQUE HUANCA

Proyecto de Grado presentado a consideración de la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO” como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

Semestre I - 2017

TARIJA - BOLIVIA

.....
Ing. Juan Carlos Loza Vélez
DOCENTE CIV - 502

.....
M. Sc. Ing. Ernesto Álvarez Gozalvez.
DECANO
FACULTAD DE CIENCIAS Y
TECNOLOGÍA

.....
M. Sc. Ing. Silvana Paz Ramírez.
VICEDECANA
FACULTAD DE CIENCIAS Y
TECNOLOGÍA

TRIBUNAL:

.....
Ing. Eduardo Miranda Encinas

.....
M. Sc. Ing. Jaime Orlando Zenteno Benítez

.....
M. Sc. Ing. Henry Monzón de los Ríos

ADVERTENCIA

El docente y tribunal evaluador del Proyecto de Ingeniería Civil no se solidarizan con los términos, la forma, los modos y las expresiones empleadas en la elaboración del presente trabajo, siendo las mismas únicamente responsabilidad del autor.

DEDICATORIA

A mis amados padres, Fernando y Martina, a mis hermanos, Anibal, Fernando y Sergio, a mis amigos, a mis familiares y a todas las personas que me han brindado su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme dado la vida y la oportunidad de llegar hasta este momento.

A mis padres Fernando y Martina, que me han apoyado incondicionalmente.

A mis hermanos, Anibal, Fernando, y Sergio que me ayudaron a llegar hasta esta etapa.

Al Ing. Moisés Perales A., que me motivó a superarme académicamente, por brindarme su tiempo y ayuda para la elaboración de este trabajo.

A mis tribunales de proyecto por su colaboración y consejos.

A todos los docentes que me han ayudado a prepararme académicamente durante todos estos años que cursé la carrera.

Y a todas las personas que me han colaborado directa e indirectamente en la elaboración de este trabajo.

ÍNDICE

1.GENERALIDADES	1
1.1. Selección y definición del tema de investigación.....	1
1.1.1. Ubicación geográfica del proyecto	1
1.1.1.1. Latitud y longitud.....	1
a) Límites territoriales	2
1.1.2. Información general de la zona beneficiada	2
1.2. El problema de investigación	3
1.2.1. Planteamiento.....	4
1.2.2. Formulación.....	4
1.2.3. Sistematización	5
1.3. Objetivos del proyecto.....	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. Justificaciones.....	6
1.4.1. Justificación académica	6
1.4.2. Justificación técnica.....	6
1.4.3. Justificación social.....	6
1.4.4. Justificación institucional	6
1.5. Marco de referencia.....	7
1.5.1. Marco teórico.....	7
1.5.2. Marco conceptual.....	9
1.5.3. Marco espacial	12
1.5.4. Marco temporal.....	12
1.6. Alcance.....	12
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	13
2.1. Balance hídrico.....	13
2.1.2. Modelo hidrológico.....	14

2.1.3. Tipos de modelos hidrológicos.....	15
2.1.4. Modelos de balance hídrico mensual.....	16
2.1.5. Modelo de balance hídrico Thornthwaite y Mather (TM).....	17
2.2. Modelo de pérdidas del número de curva (CN) del SCS	19
2.2.1. Estimación del número de curva de escorrentía, CN.....	20
2.2.2. Clasificación hidrológica de los suelos.....	21
2.2.3. Condición de humedad antecedente	21
2.2.4. Usos y tratamiento del suelo.....	22
2.3. Evaporación y evapotranspiración	24
2.3.1. Medición y estimación.....	26
2.3.2. Estimación de la evapotranspiración potencial según el método de Thornthwaite.....	27
2.4. Criterios edáficos.....	28
2.4.1. La capacidad de retención de agua disponible.....	28

3. HIDROLOGÍA DEL PROYECTO	31
3.1. Geomorfología de la cuenca.....	31
3.1.1. Delimitación de la cuenca Calderas.....	31
3.1.2. Morfología de la cuenca	31
3.1.2.1. Parámetro de forma.....	31
3.1.2.2. Parámetros de relieve	33
3.1.2.3. Parámetros relativos de la red hidrográfica.....	40
3.2. Estudio estadístico de los datos	45
3.2.1. Zonificación pluviométrica de las estaciones en estudio.....	47
3.2.2. Análisis de los datos de precipitación.....	49
3.2.2.1. Estimación de datos faltantes	49
3.2.2.1.1. Estimación de registros diarios y mensuales faltantes	49
3.2.2.1.2. Estimación de registros anuales faltantes.....	50
3.3.1. Análisis de homogeneidad y consistencia	51
3.3.2. Pruebas estadísticas de homogeneidad	52

3.3.2.1. Pruebas de t de Student	52
3.3.2.2. Test de Mann-Kendall.....	54
3.3.4. Análisis de consistencia curva doble masa	55
4. GENERACIÓN DE MODELO HIDROLÓGICO.	58
4.1. Separación de la precipitación neta de la efectiva.....	58
4.1.1. Metodología de estimación de (CN).....	58
4.1.1.1. Tipo de suelo hidrológico.....	59
4.1.1.2. Mapa de tipos de suelo	60
4.2. Tratamiento de la información de cobertura vegetal	64
a) Número de curva ponderado para la cuenca calderas.	69
b) Cálculo de retención máxima de escurrimiento.	69
c) Cálculo de la abstracción inicial (perdida inicial).....	69
d) Separación de la precipitación neta de la efectiva.	69
4.3. Calculo de la precipitación efectiva o escurrimiento directo	70
4.4. Calculo de la evapotranspiración potencial	72
4.5. Estimación de la profundidad efectiva radicular.....	73
4.6. Estimación de la capacidad de agua disponible “CAD”	79
4.7. Aplicación del modelo hidrológico Balance hídrico Thornthwaite - Mather..	80
4.8. Métodos de comparación.....	83
4.8.1. Correlación de caudales específicos medios anuales en relación a la precipitación media anual	83
4.8.2. Datos disponibles del proyecto de la presa Calderas	85
4.9. Análisis estadístico de los resultados obtenidos.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Coordenadas de ubicación de la zona del proyecto.....	1
Figura 1.2. Esquema del modelo hidrológico Thornthwaite - Mather.....	9
Figura. 2.1 esquema de modelo de balance hídrico realizado por el SNET.	14
Figura.2.2. Representación esquemática del modelo de Thorthwaite - Mather.....	17
Figura 3.1. Delimitación de la cuenca de Calderas.....	31
Figura 3.2. Curva hipsométrica de la cuenca Calderas	34
Figura 3.3. Curva de frecuencia de altitudes de la cuenca Calderas.....	35
Figura 3.4. Rectángulo equivalente.....	37
Figura 3.5. Perfil longitudinal del rio Calderas.....	38
Figura 3.6. Pendiente del cauce por compensacion de áreas	39
Figura 3.7. Perfil longitudinal del rio de la cuenca Calderas.....	40
Figura 3.8. Esquema del número de orden de un río según Horton y Strahler	42
Figura 3.9. Red de drenaje de la cuenca de Calderas (Método de Strahler)	43
Figura 3.10. Resumen de los parametros hidrológicos de la cuenca Calderas	45
Figura 3.11. Ubicación de las estaciones en estudio.....	46
Figura 3.12. Zonificación de la cuenca Calderas.....	48
Figura 3.13. Análisis de la curva doble masa.....	56
Figura 4.1. Grupo hidrológico de suelo	63
Figura 4.2. Mapa de cobertura vegetal.....	67
Figura 4.3. Mapa de número de curva.....	68
Figura 4.4. Separación de precipitaciones.....	72
Figura 4.5. Precipitación infiltrada en el suelo y la evapotranspiración.....	73
Figura 4.6. Mapa de profundidad efectiva.....	75
Figura 4.7. Mapa de suelos	77
Figura 4.8. Mapa de suelo y profundidad efectiva.....	78
Figura 4.9. Precipitación – Escorrentía.....	82
Figura 4.10. Caudal simulado.....	82

Figura 4.11. Correlación de caudales específicos medios anuales en relación a la precipitación media anual areal.....	84
Figura 4.12. Isoyetas.....	86
Figura 4.13. Caudales de aporte directo a la presa Calderas.....	89
Figura 4.14. Volúmenes anuales de aporte directo a la presa Calderas.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Coordenadas geográficas.....	2
Tabla 3.1. Cálculos para la obtención de la curva hipsométrica.....	34
Tabla 3.2. Rectángulo equivalente.....	36
Tabla 3.3. Longitud de orden de la red hidrográfica.....	44
Tabla 3.4. Estaciones utilizadas en el estudio de la cuenca Calderas.....	46
Tabla 3.5. Resultado de la zonificación.....	47
Tabla 3.6. Distribución t de Student.....	53
Tabla 3.7. V crit para diferentes niveles de significación α	58
Tabla 4.1. Clasificación hidrológica de los suelos.....	59
Tabla 4.2. Tipos texturales.....	59
Tabla 4.3. Leyenda mapa de suelos Tarija.....	69
Tabla 4.4. GH del suelo en función de Textura y tipo de suelo.....	62
Tabla 4.5. Clasificación de la cobertura vegetal.....	64
Tabla 4.6. Vegetación SCS.....	66
Tabla 4.7. Datos para la obtención del número de curva ponderado.....	69
Tabla 4.8. Precipitación bruta y efectiva.....	70
Tabla 4.9. Cálculo de la evapotranspiración potencial.....	72
Tabla 4.10. Profundidad efectiva del suelo.....	74
Tabla 4.11. Profundidad efectiva en la cuenca de Calderas.....	76
Tabla 4.12. Mapeo de suelos en la zona.....	76
Tabla 4.13. Profundidad efectiva de la cuenca.....	79
Tabla 4.14. Estimación de capacidad de agua disponible.....	79
Tabla 4.15. Balance hídrico Thornthwaite – Mather (2016).....	80
Tabla 4.16. Escorrentía y Caudal medio mensual.....	81

Tabla 4.17. información de estaciones	83
Tabla 4.18. Precipitaciones en las estaciones utilizadas.....	85
Tabla 4.19. Datos de las isoyetas.....	87
Tabla 4.20. Caudales medios anuales de la Cuenca Santa Ana.....	87
Tabla 4.21. Coeficientes de distribución.....	88
Tabla 4.22. Caudales medios mensuales de la Cuenca Calderas.....	88
Tabla 4.23. Caudales medios mensuales obtenidos por los distintos métodos aplicados.....	89
Tabla 4.24. Volúmenes anuales obtenidos por los distintos métodos aplicados....	90
Tabla 4.25. Interpretación de los parámetros estadísticos para calibración y validación.....	92
Tabla 4.26. Estimación de parametros estadisticos.....	92
Tabla 4.27. Resultados de los distintos parámetros estadísticos.....	92

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A - DATOS DEL SENAMHI

ANEXO B - ZONIFICACIÓN

ANEXO C - DATOS ORDENADOS EN AÑO HIDROLÓGICO

ANEXO D - COMPLETACIÓN DE DATOS FALTANTES MÉTODO DE LA RECTA DE REGRESIÓN

ANEXO E - ANÁLISIS DE CONSISTENCIA

ANEXO F - PRUEBA DE HOMOGENEIDAD T ESTUDENT

ANEXO G - TABLA DE NUMERO DE CURVA (CN) Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELO

ANEXO H - SEPARACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN NETA DE LA PRECIPITACIÓN EFECTIVA

ANEXO I - TABLA DE RESULTADOS DEL BALANCE HIDROLOGICO THORTHWAITE – MATHER

ANEXO J - FOTOS Y OBSERVACIÓN VISUAL DE CAMPO DEL ÁREA DE ESTUDIO