

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



**“APLICACIÓN DE HYDROBID EN EL ANÁLISIS DE IMPACTOS DEL
CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA SEGURIDAD DE LOS RECURSOS
HÍDRICOS SUPERFICIALES EN LA CUENCA DEL RÍO TOLOMOSA”**

Por:

LUIS FERNANDO GARECA PRIETO

Proyecto de grado elaborado en la asignatura CIV-502, presentado a consideración de la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de licenciatura en Ingeniería Civil.

SEMESTRE II - 2025

TARIJA – BOLIVIA

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios por ser el inspirador para cada uno de mis pasos dados en mi convivir diario; a mis padres por ser los guías en el sendero de cada acto que realizo hoy, mañana y siempre; a mis hermanas y sobrinos, por ser el incentivo para seguir adelante con este objetivo.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. El problema	3
1.3.1. Planteamiento del problema	4
1.3.2. Formulación del problema.....	5
1.4. Justificación.....	6
1.5. Objetivos	7
1.5.1. Objetivo general	7
1.5.2. Objetivos específicos.....	7
1.6. Alcance.....	7
1.6.1. Límites espaciales.....	8
1.6.2. Límites temporales	8

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Cambio climático	9
2.1.1. Definición.....	9
2.1.2. Causas del cambio climático	9
2.1.3. Cambio climático y los recursos hídricos superficiales	10
2.2. Modelo de circulación global.....	12
2.3. Escenarios de cambio climático	12
2.3.1. Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP)	13
2.3.2. Trayectoria de Concentración Representativa (RCP)	17
2.3.3. Escenarios de cambio climático integrados.....	18
2.4. Reducción de escala (Downscaling).....	22

2.5. Modelación hidrológica de cuencas	23
2.5.1. El proceso de modelación.....	24
2.5.2. Complejidad de modelos vs. Disponibilidad de datos	25
2.5.3. Modelos Hidrológicos	26
2.5.4. Clasificación de modelos hidrológicos.....	26
2.6. HydroBID.....	27
2.6.1. Base de Datos de Hidrografía Analítica	28
2.6.2. Estructura de HydroBID.....	29
2.6.3. Parámetros del modelo lluvia-escorrentía GWLF (Factor Estándar de Carga de Causas Generalizados).....	30
2.6.4. Calibración y validación en HydroBID	32
2.6.5. Proyecciones de cambio climático en HydroBID	35
2.6.6. Módulo de gestión de embalses.....	37
2.7. Seguridad hídrica en cuencas	41
2.7.1. Disponibilidad de volúmenes de agua almacenados	42
2.7.2. Fiabilidad de cumplimiento del volumen mínimo operacional.....	42
2.7.3. Frecuencia de periodos de déficit hídrico en el embalse	42

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Marco Metodológico	43
3.1.1. Metodología.....	43
3.1.2. Tipo de investigación	44
3.1.3. Enfoque	44
3.1.4. Método.....	44
3.1.5. Técnica	44
3.2. La cuenca del río Tolomosa	45

3.2.1. Geomorfología.....	47
3.2.2. Geología, topografía y suelo	47
3.2.3. Clima	47
3.2.4. Antropología de la cuenca.....	48
3.3. Escalas y periodos de estudio.....	49
3.3.1. Escala temporal	49
3.3.2. Escala espacial.....	50
3.3.3. Periodo de estudio	50
3.4. Información hidrometeorológica.....	51
3.4.1. Información meteorológica	51
3.4.2. Información hidrométrica.....	55
3.5. Análisis exploratorio de datos.....	56
3.5.1. Series de tiempos.....	57
3.5.2. Hidrogramas	63
3.5.3. Homogenización de la información climática.....	71
3.5.4. Análisis gráfico de la información filtrada.....	76
3.5.5. Relleno de datos a las series incompletas.....	87
3.6. Modelación en HydroBID.....	91
3.6.1. Etapa previa QGIS e HydroBID.....	92
3.6.2. Interpolación de datos climáticos	95
3.6.3. Calibración y validación.....	97
3.6.4. Módulo de cambio climático	109
3.6.5. Módulo de Reservorio	116
3.6.6. Modelación de caudales futuros bajo escenarios de cambio climático	119
3.7. Análisis de oferta y demanda hídrica superficial en la cuenca.	120

3.7.1. Operacionalidad del embalse San Jacinto para el periodo 2000-2015	120
3.7.2. Operacionalidad estimada del embalse San Jacinto para el periodo 2023-2040	123

CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. De la base de información.....	128
4.1.1. Discriminación de anomalías	128
4.1.2. Relleno de series incompletas de precipitación.....	128
4.1.3. Del relleno de series incompletas de temperaturas máximas y mínimas	131
4.2. De HydroBID	133
4.2.1. De la calibración y validación	133
4.2.2. Del módulo de cambio climático.....	138
4.2.3. Del módulo de embalses.....	140
4.2.4. De la modelación bajo proyecciones futuras de cambio climático y la disponibilidad hídrica futura	143
4.3. De la seguridad hídrica.....	147
4.3.1. Comportamiento de la precipitación futura.....	147
4.3.2. Comportamiento de la temperatura futura.....	148
4.3.3. Disponibilidad hídrica futura en la cuenca.....	149
4.3.4. Tendencias generales y frecuencia de periodos de déficit hídrico en el embalse	154
4.4. De las medidas de acción ante los impactos del cambio climático.....	156
4.4.1. Sobre las medidas de adaptación o mitigación.....	158

CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.4. Conclusiones	163
5.5. Recomendaciones.....	166
BIBLIOGRAFÍA.....	168

ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo 1:** Caudales medios mensuales para la cuenca del embalse San Jacinto, por COBEE S.A.
- Anexo 2:** Reporte de ClimaTool 4.0. para el análisis de homogeneidad de la serie de datos de precipitación diaria, 1979-2022.
- Anexo 3:** Reporte de ClimaTool 4.0. para el análisis de homogeneidad de la serie de datos de temperatura máxima diaria 1979-2022.
- Anexo 4:** Reporte de ClimaTool 4.0. para el análisis de homogeneidad de la serie de datos de temperatura mínima diaria 1979-2022.
- Anexo 5:** Reporte completo de anomalías en serie de datos de temperatura máxima y mínima diaria de las estaciones en estudio.
- Anexo 6:** Reporte de HydroBID; volumen mínimo operaciones a escala mensual para el periodo 2000-2015, volumen mínimo operacional medido y porcentajes de reducción de volúmenes a escala mensual.
- Anexo 7:** Reporte de HydroBID; volúmenes mínimos de operación del embalse a nivel mensual del San Jacinto proyectados bajo escenarios de cambio climático, periodo 2023-2040.
- Anexo 8:** Porcentaje de variación mensual de volúmenes mínimos de operación del embalse San Jacinto proyectados bajo escenarios climáticos, periodo 2023-2040.
- Anexo 9:** Downscaling de variables climáticas de precipitación y temperatura media, por escenario de cambio climático.
- Anexo 10:** Script de RStudio para el análisis estadístico, validación y verificación de datos de las variables hidroclimáticas
- Anexo 11:** Manual de uso de biblioteca Homogeneización de series climáticas con ClimaTool para RStudio
- Anexo 12:** Manual de uso y modelación de HydroBID

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estimación global de las cantidades de agua dulce y salada en la tierra.....	11
Figura 2: Panorama de las SSP – Espacio de desafíos que identifican cinco escenarios con diferentes retos socioeconómicos	14
Figura 3: Estructura de energía primaria (Panel A + B) y demanda de energía final (Panel C) de los escenarios SSP y rangos correspondientes.	16
Figura 4: Emisiones antropogénicas futuras de las principales fuerzas impulsoras del cambio climático y contribuciones al calentamiento por grupos de fuerzas impulsoras en los cinco escenarios ilustrativos.	20
Figura 5: Esquema de un sistema hidrológico, mostrando entradas y salidas.....	25
Figura 6: Relación entre complejidad del modelo, disponibilidad de datos y capacidad predictiva	26
Figura 7: Diagrama de Flujo HydroBID.....	29
Figura 8: Representación esquemática de la estimación del número de curva. El ejemplo aquí dado es para una sola Cuenca de la AHD COMID=315678 que tiene dos tipos de usos de tierras (Bosque mixto y Urbano) y cada uso de tierra tiene un solo tipo de suelo dominan.	32
Figura 9: Parámetros hidrológicos.....	33
Figura 10: Zonas de almacenamiento del Embalse	39
Figura 11: Estructura de la metodología.....	43
Figura 12: Ubicación de la Cuenca del río Tolomosa	46
Figura 13: Estaciones de la Cuenca del río Tolomosa.....	52
Figura 14: Calendario de datos de precipitación	54
Figura 15: Calendario de datos de temperatura máxima	54
Figura 16: Calendario de datos de temperatura mínima.....	55
Figura 17: Hidrograma de Caudales diarios de la estación San Jacinto	55
Figura 18: Hidrograma de caudales medios mensuales para la cuenca del embalse San Jacinto, elaborado por COBEE S.A.	56
Figura 19: Porcentaje de datos faltantes de precipitación	58
Figura 20: Porcentaje de datos faltantes de Temperatura máxima	59
Figura 21: Porcentaje de datos faltantes de Temperatura mínima.....	60

Figura 22: Polígonos de Thiessen de las estaciones	62
Figura 23: Hidrogramas de precipitación para cada estación.....	66
Figura 24: Hidrogramas de temperatura máxima para cada estación.....	69
Figura 25: Hidrogramas de temperatura mínima para cada estación	71
Figura 26: Resultados de la prueba SNHT para las series de precipitaciones.....	73
Figura 27: Resultados de la prueba SNHT para las series de temperatura máxima y mínima.	74
Figura 28: Graficas reportadas del análisis de series de precipitación en homogen	75
Figura 29: Captura de la ejecución del paquete HydroTSM	77
Figura 30: Series temporales de la estación Aeropuerto, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.	78
Figura 31: Series temporales de la estación Cañas, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.	79
Figura 32: Series temporales de la estación Coimata, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.	80
Figura 33: Series temporales de la estación Pinos Sud, a) Precipitación.	81
Figura 34: Series temporales de la estación El Tejar, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.	82
Figura 35: Series temporales de la estación Juntas, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.	83
Figura 36: Series temporales de la estación San Andrés, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.	84
Figura 37: Series temporales de la estación San Jacinto, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.	85
Figura 38: Series temporales de la estación Juntas, a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.	86
Figura 39: Coeficientes de correlación diario, para datos sin relleno	88
Figura 40: Coeficiente de correlación mensual, para datos sin relleno.	88
Figura 41: Serie de precipitaciones diarias completas.....	89
Figura 42: Serie de temperaturas máximas diarias completas.....	90
Figura 43: Serie de temperaturas mínimas diarias completas	91

Figura 44: Base de datos AHD importada en QGIS – Delimitación de la cuenca del río Tolomosa.....	93
Figura 45: Centroides generados por catchment para la Cuenca del río Tolomosa	95
Figura 46: Herramienta de interpolación de datos Climáticos de HydroBID	96
Figura 47: Interpolación de datos climáticos de la cuenca del río Tolomosa.....	97
Figura 48: Ventana principal de interacción de HydroBID.....	99
Figura 49: Métricas de desempeño de la calibración para la cuenca del río Tolomosa	100
Figura 50: Curva de calibración de la cuenca el río Tolomosa	101
Figura 51: Hidrograma de caudales simulados y observados para la cuenca el río Tolomosa (Calibración)	102
Figura 52: Métricas de desempeño del periodo de validación.	102
Figura 53: Hidrograma de caudales simulados y observados para la cuenca el río Tolomosa (validación)	103
Figura 54: Curva de validación de la cuenca el río Tolomosa	103
Figura 55: Ventana de importación de data y periodos del proceso de refuerzo a la validación en el periodo 2000-2015.....	105
Figura 56: Métricas de desempeño del periodo de refuerzo de validación.	106
Figura 57: Hidrograma de caudales simulados y observados/generados para la cuenca el río Tolomosa (proceso refuerzo a la validación 2000-2015)	107
Figura 58: Curva de flujo del refuerzo de validación de la cuenca el río Tolomosa año 2000-2015	108
Figura 59: Concentraciones atmosféricas de CO2 para cada escenario SSP	110
Figura 60: Vista de la plataforma para descargar los Modelos de Circulación Global, escenario y variables del clima futuro.....	112
Figura 61: Proceso de downscaling en SAGA 9.2.0	113
Figura 62: Resultado del downscaling de temperatura mínima para la cuenca del río Tolomosa, escenario de cambio climático: SSP585	113
Figura 63: Temperatura media mensual de los escenarios climáticos y los datos observados.....	114
Figura 64: Precipitación media mensual de los escenarios climáticos y los datos observados.....	115

Figura 65: Métricas mensuales de funcionamiento del embalse	116
Figura 66: Parámetros del embalse San Jacinto para HydroBID	118
Figura 67: Caudales medios mensuales proyectados bajo escenarios climáticos.....	119
Figura 68: Precipitación diaria de datos completos.....	129
Figura 69: Curva doble masa para las estaciones pluviométricas.	130
Figura 70: Serie de temperaturas máximas diarias completas.....	132
Figura 71: Serie de temperaturas mínimas diarias completas	133
Figura 72: Métricas de desempeño de la Calibración.....	135
Figura 73: Hidrograma y curva de duración de flujo de calibración.....	136
Figura 74: Métricas de desempeño del proceso de validación	136
Figura 75: Hidrograma y curva de duración de flujo de la validación	137
Figura 76: Métricas de desempeño del proceso de refuerzo a la validación periodo 2000-2015.....	137
Figura 77: Caudales medios mensuales proyectados bajo escenarios climáticos.	146
Figura 78: Media multianual de la precipitación acumulada para cada mes, para registro observado y futuro.	148
Figura 79: Media mensual multianual de la temperatura, para registro observado y futuro.	149
Figura 80: Frecuencia de la satisfacción del sistema para cumplir los volúmenes de demanda, periodo simulado 2000-2015	154
Figura 81: Frecuencia de la satisfacción del sistema para cumplir los volúmenes de demanda, bajo los escenarios futuros SSP126, SSP245 y SSP585.....	156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cambios en la temperatura global en superficie, que se evalúan sobre la base de diversas líneas de evidencia, para períodos de 20 años seleccionados y los cinco escenarios ilustrativos de emisiones considerados	21
Tabla 2: Principales parámetros del GWLF que están relacionados con la generación de flujos	30
Tabla 3: Tabla de consulta del número de curva (Adaptada del U.S. Department of Agriculture [USDA],1986)	31
Tabla 4: Parámetros de embalses a escala de tiempo anual	40
Tabla 5: Parámetros mensuales de embalse.....	41
Tabla 6: Población en la zona de estudio.....	48
Tabla 7: Población por comunidades de la cuenca del río Tolomosa.....	48
Tabla 8: Estaciones meteorológicas preseleccionadas.....	51
Tabla 9 Ubicación y periodo de registro precipitación	53
Tabla 10: Ubicación y periodo de registro temperatura	53
Tabla 11: Disponibilidad de datos de precipitación por estación	57
Tabla 12: Disponibilidad de datos de temperatura máxima por estación	59
Tabla 13: Disponibilidad de datos de temperatura mínima por estación.....	60
Tabla 14: Influencia de las estaciones sobre el área de la cuenca	61
Tabla 15: Reporte parcial de registros anómalos de temperatura máxima y mínima.....	76
Tabla 16: Información de la base de dato AHD para la cuenca del río Tolomosa	93
Tabla 17: Latitud y longitud para cada centroides por catchment	94
Tabla 18: Coordenadas de las estaciones hidrometeorológicas	95
Tabla 19: Parámetros para la calibración del modelo HydroBID	98
Tabla 20: Valores óptimos de las métricas de calibración.....	99
Tabla 21: Parámetros de calibración para la cuenca del río Tolomosa	100
Tabla 22: Desviaciones mensuales de precipitación y temperatura por escenario de cambio climático	115
Tabla 23: Parámetros necesarios a aplicar en el módulo de embalses.....	117
Tabla 24: Valores de los parámetros del módulo de embalses para el embalse San Jacinto.....	117

Tabla 25: Variación media interanual del caudal por escenario climático proyectado	120
Tabla 26: Volúmenes de agua administradas por el PMSJ para el periodo 2000-2015	121
Tabla 27: Sección de volumen mínimo operacionales y porcentajes de reducción para el periodo 2000-2015	122
Tabla 28: Volúmenes de demandas de agua administradas por el PMSJ al año 2022 .	123
Tabla 29: Sección de la proyección de volúmenes mínimos operacionales bajo escenarios climáticos, diferencias y porcentajes de variación, para el año 2029	125
Tabla 30: Proyección de la reducción de los volúmenes mínimos operacionales medios anuales (hm ³).....	126
Tabla 31: Porcentaje de variación media de las proyecciones de volúmenes operacionales del embalse a mediano plazo 2023-2040	127
Tabla 32: Parámetros ajustados de calibración.....	135
Tabla 33: Desviaciones mensuales de precipitación y temperatura	139
Tabla 34: Media de volúmenes mínimos operacionales mensual multianual periodo 2000-2015.....	140
Tabla 35: Volúmenes mínimos operacionales promedio anual periodo 2000-2015	140
Tabla 36: Volúmenes mínimos de operación a escala mensual y multianual 2023-2040 del embalse San Jacinto (hm ³)	142
Tabla 37: Volúmenes medios operacionales bajo escenarios climáticos del embalse San Jacinto periodo 2023-2040 en Hm ³	142
Tabla 38: Caudales medios anuales proyectados bajo escenarios climáticos futuros periodo 2023-2040	144
Tabla 39: Porcentajes de variación de caudales anual bajo escenarios climáticos periodo 202-2040	145
Tabla 40: Reducción de volúmenes de caudales medios multianual bajo escenarios de cambio climático	145
Tabla 41: Muestra de cumplimiento de volúmenes mínimos operacionales a escala mensual en Hm ³ para el embalse San Jacinto bajo	149
Tabla 42: Porcentaje de variación de volúmenes del embalse bajo escenario climáticos	152

Tabla 43: Volúmenes mínimos operacionales el embalse San Jacinto para un año de muestra 152

Tabla 44: Volúmenes diferenciales para satisfacer la correcta regulación del embalse ante los efectos de cambio climático para el periodo 2023-2040 y sus porcentajes de variación.....153