

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL



TÍTULO DEL PROYECTO:

**“APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO DE
SIMULACIÓN WEAP A LA CUENCA ALTA DEL RÍO
GUADALQUIVIR”**

Realizado por:

DIEGO GUSTAVO PANIQUE CASSO

DICIEMBRE - 2013

TARIJA-BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA Y OBRAS SANITARIAS

TÍTULO DEL PROYECTO:

**“APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO DE
SIMULACIÓN WEAP A LA CUENCA ALTA DEL RÍO
GUADALQUIVIR”**

Realizado por:

DIEGO GUSTAVO PANIQUE CASSO

**PROYECTO ELABORADO EN LA ASIGNATURA PROYECTO ING. CIVIL II
CIV-502 (MENCIÓN HIDRÁULICA)**

GESTIÓN ACADÉMICA 2013 II SEMESTRE

TARIJA-BOLIVIA

V°B°

.....
Ing. Juan Carlos Loza

DOCENTE CIV-502

.....
Ing. Ernesto Alvarez

DECANO F. C. Y T.

.....
Lic. Silvana Paz

VICEDECANA F. C. Y T.

APROBADO POR:

TRIBUNAL:

.....
Ing. José Navia

.....
Ing. Henry Monzón

.....
Ing. Jaime Zenteno

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo éstas responsabilidad del autor.

DEDICATORIA

“La gran victoria que hoy parece fácil, fue el resultado de pequeñas victorias que pasaron desapercibidas”. Agradezco a todos los que me ayudaron a conseguir estas victorias, en especial a mis padres...

CONTENIDO

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.4. ALCANCE	5
2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO - CUENCA RÍO GUADALQUIVIR	6
2.1. RECURSOS HÍDRICOS	6
2.1.1. INTRODUCCIÓN	6
2.1.2. ZONIFICACIÓN HIDROLÓGICA	6
2.1.3. CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR	7
2.1.3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y EXTENSIÓN	7
2.1.3.2. DIVISIÓN POLÍTICA	7
2.1.4. ASPECTOS FÍSICOS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR	8
2.1.4.1. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA	8
2.1.4.2. SUELOS	9
2.1.4.3. FISIOGRAFIA	9
2.1.4.4. COBERTURA VEGETAL	9
2.1.4.5. HIDROGRAFIA	10
2.1.4.6. REDES CAMINERAS PRINCIPALES Y SECUNDARIAS	10
2.1.5. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	11
2.1.5.1. ASPECTOS FÍSICO – GEOGRÁFICOS	11
2.1.6. RED HIDROMÉTRICA E HIDROMETEREOLÓGICA DE LA CUENCA ALTA RÍO GUADALQUIVIR	14

2.1.6.1.	RED HIDROGRÁFICA Y METEOROLÓGICA.....	14
2.1.7.	PLUVIOMETRIA.....	14
2.1.8.	TERMOMETRIA.....	14
2.1.8.1.	TEMPERATURA MENSUAL.....	15
2.1.9.	FLUVIOMETRIA.....	15
2.1.9.1.	HIDROMETRÍA ANUAL.....	15
2.1.9.2.	HIDROMETRÍA MENSUAL.....	16
2.1.10.	CLIMATOLOGÍA.....	17
2.1.11.	RIESGOS EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR.....	17
2.1.11.1.	HELADAS Y GRANIZO.....	17
2.1.11.2.	INUNDACIÓN.....	18
2.1.11.3.	SEQUÍAS.....	18
2.1.12.	APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	18
2.1.12.1.	DEFINICIÓN DE ZONAS DE EXPLOTACIÓN.....	18
2.1.13.	ANÁLISIS DE LA OFERTA DEL RECURSO HÍDRICO PARA RIEGO.....	19
2.1.14.	ANÁLISIS DE LA DEMANDA DEL RECURSO HÍDRICO PARA RIEGO.....	20
2.1.15.	ANÁLISIS DE OTROS USOS.....	20
2.1.16.	BALANCE DE AGUAS PARA RIEGO.....	20
2.1.17.	SISTEMAS DE RIEGO EXISTENTES.....	20
2.1.18.	INFRAESTRUCTURA ASOCIADA AL RIEGO.....	21
2.2.	RECURSO SUELO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR.....	22
2.2.1.	USO ACTUAL DEL SUELO.....	22
2.2.1.1.	RIEGO.....	22
2.2.1.2.	AGRICULTURA.....	23
2.2.1.3.	PECUARIO.....	24
2.2.1.4.	HUMANO.....	24
2.2.1.5.	FORESTAL.....	25
2.2.2.	PENDIENTES DE LAS ÁREAS ACTUALES Y POTENCIALES BAJO RIEGO.....	26

2.2.3.	APTITUD DEL SUELO CON FINES DE RIEGO	27
2.2.4.	RIESGOS	27
2.2.4.1.	EROSIÓN.....	27
2.2.4.2.	DESERTIFICACIÓN.....	28
2.2.4.3.	GEOLÓGICOS.....	29
2.2.4.4.	SALINIZACIÓN.....	29
2.2.4.5.	CONTAMINACIÓN.....	29
2.2.5.	ÁREAS DE RESTRICCIÓN	30
2.3.	ASPECTOS TECNOLÓGICOS Y PRODUCTIVOS	30
2.3.1.	LABOREO DEL SUELO	31
2.3.2.	USO DE TECNOLOGÍA.....	31
2.3.3.	ÁREA REGADA POR GRUPOS DE CULTIVOS EN INVIERNO Y VERANO	31
2.3.4.	PRODUCCIÓN POR GRUPOS DE CULTIVOS EN INVIERNO Y VERANO	32
2.3.5.	ÁREAS POTENCIALES DE RIEGO	33
2.3.5.1.	INTRODUCCIÓN.....	33
2.3.5.2.	ÁREAS DE EXPANSIÓN DE RIEGO	33
2.3.5.3.	IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS.....	34
2.3.5.4.	ÁREAS TEMÁTICAS DE INTERVENCIÓN PARA RIEGO	34
3.	MODELACIÓN HIDROLÓGICA USANDO EL MODELO WEAP	35
3.1.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO	35
3.2.	APLICACIÓN DEL MODELO	37
3.3.	ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA.....	38
3.3.1.	ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE INGRESO AL MODELO WEAP.....	40
3.3.1.1.	PRECIPITACIÓN	40
3.3.1.1.1.	ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE LA PRECIPITACIÓN ...	43
3.3.1.1.2.	RELACIÓN ENTRE ELEVACIÓN Y PRECIPITACIÓN	43
3.3.1.1.3.	RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN	46

3.3.1.1.4. ZONIFICACIÓN PLUVIOMÉTRICA	48
3.3.1.1.5. DETERMINACIÓN DE LAS ZONAS HOMOGÉNEAS DE PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA	49
3.3.1.2. TEMPERATURA.....	52
3.3.1.2.1. ZONAS HOMOGÉNEAS DE TEMPERATURA.....	55
3.3.1.3. HUMEDAD RELATIVA.....	56
3.3.1.4. VELOCIDAD DEL VIENTO	57
3.3.1.5. CAUDALES.....	58
3.4. MÉTODOS DE SIMULACIÓN DE SUBCUENCAS	59
3.5. DEMANDA.....	63
4. CALIBRACIÓN, VERIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO	74
4.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO WEAP PARA LA APLICACIÓN EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR	74
4.1.1. LÍMITES DE ÁREA.....	75
4.1.1.1. SUBCUENCAS.....	75
4.1.1.2. DEFINICIÓN DE BANDAS DE ELEVACIÓN PARA EL MODELO WEAP	76
4.1.1.3. RÍOS	79
4.1.1.4. ESQUEMA DEL MODELO EN EL PROGRAMA WEAP.....	80
4.1.2. PARÁMETROS GENERALES DE ÁREA DE LA CUENCA	81
4.1.3. UNIDADES	82
4.1.4. TIPOS DE COBERTURA DE SUELO.....	82
4.1.5. SUPUESTOS CLAVES.....	86
4.1.5.1. LAI (ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR).....	86
4.1.5.2. KS (ZONA RADICULAR DE CONDUCTIVIDAD)	87
4.1.5.3. KC (COEFICIENTE DE CULTIVO)	88
4.1.5.4. SW (CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN LA ZONA DE RAÍCES)	88
4.1.5.5. ALTURA.....	89
4.1.5.6. KD (CONDUCTIVIDAD PROFUNDA).....	91

4.1.5.7. DW (CAPACIDAD DE AGUA PROFUNDA)	91
4.1.5.8. RRF (FACTOR DE RESISTENCIA A LA ESCORRENTÍA)	92
4.1.5.9. PFD (DIRECCIÓN PREFERENCIAL DE FLUJO).....	93
4.1.5.10. Z1 (Z1 INICIAL).....	93
4.1.5.11. Z2 (Z2 INICIAL).....	94
4.1.5.12. ALTURA DE ESTACIÓN (ALTURA DE LAS ESTACIONES BASE).....	95
4.1.5.13. FACTOR TEMP (FACTOR DE TEMPERATURA)	95
4.1.5.14. FORM TEMP (FÓRMULA DE LA TEMPERATURA).....	95
4.1.6. SITIOS DE DEMANDA Y CATCHMENTS	96
4.1.6.1. USO DE SUELO O COBERTURA VEGETAL	98
4.1.6.2. CLIMA	98
4.1.6.3. MEDIDORES DE CAUDAL.....	103
4.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO WEAP PARA LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR	103
4.2.1. CALIBRACIÓN DE LAS SUBCUENCAS APORTANTES	104
4.2.1.1. CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA APORTANTE CANASMORO.....	108
4.2.1.2. CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA APORTANTE SELLA... ..	112
4.3. VALIDACIÓN DEL MODELO WEAP PARA LAS SUBCUENCAS APORTANTES CANASMORO Y SELLA	118
4.3.1. VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA APORTANTE CANASMORO .	118
4.3.2. VALIDACIÓN DE LA SUBCUENCA APORTANTE SELLA	119
4.4. APLICACIÓN DEL MODELO WEAP SOBRE LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR (HASTA LA ESTACIÓN DE OBRAJES)	122
4.4.1. MODELACIÓN DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR, UTILIZANDO LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA CANASMORO.....	122
4.4.2. MODELACIÓN DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR, UTILIZANDO LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA SELLA.....	124

4.4.2.1. APLICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DE LA SUBCUENCA SELLA A LA SUBCUENCA CANASMORO	127
5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN	130
5.1. CALIBRACIÓN DE SUBCUENCAS APORTANTES	130
5.2. APLICACIÓN DEL MODELO WEAP	145
6. ESCENARIOS	149
6.1. ESCENARIO 1-CAMBIO DE COBERTURA VEGETAL EN LA CUENCA ..	150
6.2. ESCENARIO 2-VARIACIÓN DE LAS TEMPERATURAS Y DE LAS PRECIPITACIONES, COMO EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	159
6.2.1. CAMBIO CLIMÁTICO EN BOLIVIA.....	161
6.2.2. ESCENARIO PROPUESTO PARA EL PROYECTO.....	163
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	168
REFERENCIAS	173
BIBLIOGRAFÍA	176

ANEXOS

ANEXO 1 – CONSISTENCIA DE PRECIPITACIÓN

ANEXO 2 – ZONIFICACIÓN PLUVIOMÉTRICA

ANEXO 3 – INVENTARIO DE SISTEMAS DE RIEGO

ANEXO 4 – PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN

ANEXO 5 – GRÁFICAS DE PRUEBAS DE CALIBRACIÓN

ANEXO 6 – PRESAS PROGRAMADAS EN EL DPTO DE TARIJA

ANEXO 7 – CD PROGRAMA WEAP