

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problema de Investigación

Para predecir en el futuro el abastecimiento o la falta de agua para los diferentes usos, además de servir como previsión contra el riesgo de eventos extremos, resulta de suma importancia determinar la potencialidad hídrica de una cuenca con la mayor precisión posible, trabajando con la baja cobertura de estaciones meteorológicas.

Uno de los fenómenos hidrológicos que requiere un estudio adecuado es la estimación más exacta de caudales para poder determinar la potencialidad hídrica de la cuenca o para poder prever escenarios futuros, que en determinadas situaciones pueden poner en peligro vidas humanas y generar importantes daños a la infraestructura productiva, vial, social, deportiva, que ha requerido considerables esfuerzos económicos estatales y privados, para su construcción.

El valle central de Tarija, está representado por dos importantes cuencas: la cuenca del río Guadalquivir y la cuenca del río Camacho; ambas forman la cuenca alta del río Bermejo. Las cuencas carecen de una adecuada cobertura de estaciones meteorológicas para el registro climatológico; en consecuencia, la baja presencia de estaciones no permite registrar la variabilidad climatológica que se presenta en la cuenca, existiendo lugares más lluviosos o secos que otros, que son tomados por algunos modelos como áreas relativamente homogéneas.

La cuenca del río Guadalquivir, a pesar de contar con instrumentación y con el registro de varios años de variables hidrometeorológicas y limnigráficas, el grado de instrumentación con el que cuenta dicha cuenca no permite disponer de una información hidrometeorológica apropiada para realizar estudios hidrológicos que puedan predecir con precisión el comportamiento de la cuenca ante eventos extremos de precipitación o escorrentía en amplios periodos de recurrencia. Debido a que dicha información es limitada y muy puntualizada; es decir, se disponen de pocos registros en la cuenca, con estaciones que muchas veces se encuentran incompletas y debido a su ubicación, no alcanzan a ser representativas de la variabilidad climática de la cuenca. De manera general, se observa la

presencia de al menos tres unidades climáticas en la cuenca, con mayor precipitación en la parte alta, mediana precipitación en la parte media y baja precipitación en la cuenca baja.

Las pocas estaciones y consecuentemente, la baja disponibilidad de datos no alcanzan a ser representativos y por lo tanto generan mucha incertidumbre a la hora de realizar el análisis y el uso de la información, obteniendo resultados diferentes a la realidad climatológica de la cuenca y del año hidrológico o evento extremo. Por lo cual, la aplicación de modelos matemáticos conceptuales apropiados a la realidad de la cuenca, para la generación de series temporales es un primer paso para lograr establecer el conocimiento del comportamiento de la cuenca en la relación de un evento de precipitación y escorrentía superficial.

En consecuencia, para mejorar la predicción del volumen de escorrentía de la cuenca del río Guadalquivir, es importante y necesaria la incorporación del sistema de modelamiento hidrológico adecuado, como una herramienta muy útil en la solución de este problema. El modelar con mayor precisión el comportamiento hidrológico de una cuenca, predecirá acertadamente el comportamiento de los caudales en la cuenca, al presentarse eventos de precipitación y escorrentía extremos, de esta forma permitirá tomar medidas de control anticipadas o aprovechar de mejor manera los recursos hídricos.

Los modelos matemáticos conceptuales, que relacionan directamente los eventos de precipitación con una escorrentía superficial, son una herramienta aceptable y en muchos casos la única solución, para realizar las series de tiempo de caudales con las cuales no cuenta la cuenca y establecer de esta manera los registros que ayuden a completar la información que se debe tener en la cuenca hidrográfica para posteriores estudios, como también para validar los caudales de escurrimiento de la cuenca ante diferentes eventos de precipitación, general y localizada en la cuenca, que permitirá el accionar de los sistemas de alerta temprana.

La aplicación de un modelo hidrológico en la cuenca Alta del río Guadalquivir, aumentará la probabilidad con que se puedan estimar los volúmenes de escurrimiento en la cuenca, y de esta manera, mejorará el funcionamiento eficiente de sistemas de alerta temprana, de mucha importancia en la cuenca baja. También, el aumento en la certidumbre de los

caudales de escurrimiento de la cuenca, optimizará el diseño de obras hidráulicas, que muchas veces se sobredimensionan por seguridad, implicando considerables gastos económicos. De igual manera, acrecentar la certidumbre en la predicción de la producción de agua de la cuenca puede regular el sobredimensionamiento del uso del agua, evitando consecuencias ambientales severas, debido al sobreuso en agricultura, ganadería y consumo humano, que puede ocasionar escasez de agua para bosques y vida silvestre.

1.2. Objetivos de la Investigación

1.2.1. Objetivo General

Profundizar el conocimiento del comportamiento hidrológico de la cuenca alta del río Guadalquivir mediante el manejo del modelo de simulación hidrológica WEAP y así, contribuir a la planificación de recursos hídricos en dicha cuenca, además de la predicción del volumen de escurrimiento en el ciclo hidrológico de eventos extremos, para mejorar la calidad de vida de las personas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Identificar las características físicas, geográficas e hidrológicas de la cuenca del río Guadalquivir.
- Analizar la información hidrometeorológica disponible en la cuenca en estudio.
- Verificar la confiabilidad de la información disponible en la cuenca.
- Estudiar el modelo hidrológico WEAP, sus características y variables.
- Definir en qué grado, el modelo hidrológico WEAP se ajusta a la cuenca en estudio, en base a la disponibilidad de información y las características de la cuenca.
- Calibrar y verificar el modelo WEAP para los períodos de información recolectada.
- Analizar, interpretar y comparar los resultados del modelo hidrológico WEAP para determinar si es aplicable a la zona de estudio.
- Aplicar Escenarios futuros, para analizar la incidencia del cambio climático en los caudales de la cuenca en estudio.

- Efectuar conclusiones a través de los resultados obtenidos.

1.3. Justificación de la Investigación

La investigación propuesta busca, mediante la aplicación del modelo WEAP, establecer el conocimiento del comportamiento hidrológico de la cuenca en la relación de un evento de precipitación y escorrentía superficial, así evaluar y pronosticar a futuro el comportamiento físico e hidrológico de la cuenca en estudio, bajo condiciones hidrológicas diferentes a las actuales.

Los modelos hidrológicos, que relacionan directamente los eventos de precipitación con una escorrentía superficial, son una herramienta aceptable y en muchos casos la única solución para la estimación con alta probabilidad de la escorrentía de una cuenca que no cuenta con suficientes estaciones, ni con suficientes series de datos. Entonces, para aumentar la precisión en los resultados de escorrentía de la cuenca es necesaria la incorporación de un sistema de modelamiento hidrológico, que se adecue a la realidad de la cuenca en estudio. Modelar con precisión el comportamiento de los caudales de la cuenca, implicará aumentar la certeza de los resultados de análisis y generación de series temporales. Por lo tanto, aplicar un modelo hidrológico a la cuenca del río Guadalquivir es un primer paso para lograr establecer el conocimiento del comportamiento de la cuenca en la relación de un evento de precipitación y escorrentía superficial. Y que servirá también de base para comprobar estudios posteriores en dicha cuenca.

La aplicación del modelo hidrológico WEAP de acuerdo a las características de la cuenca en estudio, permitirá la representación precisa de la producción de escorrentía de una cuenca que se basa en la realización de un balance hídrico, asumiendo que el agua se distribuye en diferentes niveles de almacenamientos conceptuales y conectados entre sí, según las variables propias del modelo. Los componentes del balance hidrológico modelados usando el programa WEAP son: escorrentía superficial, infiltración, evapotranspiración, flujo base y escorrentía sub-superficial. Dicha representación se realiza en base a los datos de cobertura vegetal/uso de suelo y a los datos climatológicos de entrada al modelo: la precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, punto de

derretimiento, punto de congelamiento, latitud y cantidad inicial de nieve (en caso de que esta variable sea relevante).

La aplicación del modelo WEAP, permitirá predecir determinadas situaciones que pueden poner en peligro vidas humanas y generar importantes daños a la infraestructura productiva, vial, social, deportiva de una comunidad dentro de dicha cuenca, bienes que han requerido de considerables esfuerzos económicos estatales y privados, para su construcción.

1.4. Alcance

El modelo hidrológico WEAP será aplicado en la cuenca Alta del río Guadalquivir hasta el punto de aforo de la estación Obrajes, para lo cual se tomarán dos periodos de datos hidrometeorológicos para dejarlo operativo, con los procesos de calibración y verificación. Para la etapa de calibración, se cuenta con dos subcuencas Canasmoro y Sella, y sus periodos de calibración son 1980–1984 y 1979–1981, respectivamente. Y para la etapa de validación, los periodos son 1985–1988 y 1982–1984, respectivamente.

Como siguiente paso en el desarrollo del presente proyecto se generarán los escenarios futuros utilizando mapas de cobertura vegetal y de uso de suelo proporcionados por el Proyecto ZONISIG, en orden a evaluar los posibles efectos del cambio climático en la cuenca Alta del río Guadalquivir.

Es necesario indicar que el éxito de la aplicación del modelo dependerá mucho de la cantidad y calidad de información que se tenga del lugar de estudio, ya que en caso de no existir todos los parámetros requeridos se hará necesaria información similar de otras cuencas con características hidrometeorológicamente similares, lo que generará un cierto nivel de error el cual se tratará de que sea lo menor posible.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO - CUENCA RÍO GUADALQUIVIR

2.1. Recursos Hídricos

2.1.1. Introducción

La cuenca del río Guadalquivir se encuentra ubicada el Valle central de Tarija y al sur de la República de Bolivia. Nace en el extremo norte de la serranía de Sama (río Chamata) y desemboca en La Angostura. La cuenca es tributaria del río Bermejo, afluente del río Paraguay y perteneciente a la grande Cuenca Hidrográfica del río de La Plata. La cuenca, desde hace un tiempo está experimentando una progresiva y acelerada degradación de sus recursos naturales (suelo y agua) con evidentes efectos negativos sobre el nivel de vida de sus habitantes y el riesgo de comprometer el futuro desarrollo económico y social de toda el área.

El río Guadalquivir es un afluente muy importante del río Tarija el cual al unirse con el río Itau forman el río Grande de Tarija éste a la vez se une en la Juntas de San Antonio (triángulo de Bermejo) con el río Bermejo, estos son afluentes de la cuenca del río de La Plata.

Sus límites geográficos son:

- 21° 14' 10" y 22° 02' 50" de latitud Sur
- 64° 33' 13" y 65° 02' 45" de longitud Oeste.

Cuenta con un área de 3.321,8 Km². La altitud de la cuenca varía entre 1.700 a 4.600 m.s.n.m.

La cuenca del río Guadalquivir administrativamente forma parte de los Municipios de:

- San Lorenzo (Primera Sección de la provincia Méndez)
- Tarija (Cercado)
- Uriondo (Primera Sección de la provincia Avilés), y
- Padcaya (Primera Sección de la provincia Arce).

2.1.2. Zonificación Hidrológica

En la cuenca se tiene cuatro unidades de análisis como se indica en el cuadro siguiente. La cuenca del río Guadalquivir es una de las cuencas donde más se intervino en el diseño de

sistemas de riego, mejoramientos; es decir, es donde más proyectos de riego, capacitación, seguimiento se han realizado en comparación con las demás cuencas del Departamento. Para definir las unidades con intervención, se tuvo en cuenta los sectores donde se realiza el riego a mayor escala (zona con mayor potencial de riego), además de los siguientes aspectos: Disponibilidad del recurso hídrico, áreas potenciales para el riego, vías de comunicación, tradición del riego.

Tabla 2.1. Unidades con y sin intervención

CUENCA PRINCIPAL	UNIDADES CON INTERVENCIÓN (U. A.)	UNIDADES SIN INTERVENCIÓN
GUADALQUIVIR	<ul style="list-style-type: none"> - Alta cuenca río Guadalquivir - Río Santa Ana - Río Tolomosa - Río Camacho 	-----

Fuente: Plan Departamental de Riego, 2001. (U. A. = Unidad de Análisis)

2.1.3. Caracterización Geográfica de la cuenca Alta del río Guadalquivir

2.1.3.1. Ubicación geográfica y extensión

La Alta cuenca del río Guadalquivir es una subcuenca de la cuenca del Río Grande de Tarija, se encuentra ubicada al oeste del departamento de Tarija. Geográficamente se encuentra entre los:

- 21° 14' 10'' y 21° 33' 04'' de longitud sur, y
- 64° 47' 40'' y 64° 56' 40'' de longitud oeste.

La cuenca tiene una extensión de 971 km² (hasta la quebrada el punto de aforo de la estación de Obrajes). Su altitud media es de 2.231 m.s.n.m.

2.1.3.2. División Política

La Alta cuenca del río Guadalquivir forma parte de los Municipios de:

- San Lorenzo (Primera Sección de la provincia Méndez)

- Tarija (Cercado)

En la cuenca existen 41 comunidades correspondientes a 17 cantones; de los cuales:

- 11 cantones (San Lorenzo, Tomatas Grande, Canasmoro, Tucumillas, Calama, Sella Méndez, Tomatas, Victoria, Erquis, Carachimayo, Coimata) y 37 comunidades pertenecen al municipio de San Lorenzo, y
- 6 cantones (Tarija, Sella, San Mateo, Obrajes, Monte Cercado y El Portillo) y 10 comunidades al municipio de Tarija.

El espacio geográfico de la Alta cuenca del río Guadalquivir alberga a una población total de 90.055 habitantes, el promedio de miembros por familia es de cinco.

2.1.4. Aspectos físicos de la cuenca Alta del río Guadalquivir

2.1.4.1. Geología y Geomorfología

La geología en el área de la cuenca se presenta con rocas aflorantes principalmente sedimentarias, así el paleozoico se inicia con una secuencia de cuarcitas arenosas bien diaclasadas del cámbrico y de la formación Iscayachi, base del Ordovícico bien representada en la cordillera de Sama. Los depósitos cuaternarios que conforma el valle en la parte norte, centro y sud de la cuenca, son producto del arrastre de las cuarcitas arenosas, lutitas y pizarras alteradas y meteorizadas, depositadas por procesos aluviales, lacustres y coluviales. (1)

La cuenca se divide en dos áreas geomorfológicas: Montañas y Valles o depresiones.

a) Áreas Montañas: Dos cadenas de montañas paralelas, con alineamiento Norte-Sud conforman los límites occidental y oriental de la cuenca. La serranía de Sama en el lado occidental como cimas entre 4.000 m.s.n.m. al sur (la mayor altitud es el cerro Morro Negro 4.344 m) y 3.600 m.s.n.m, al norte tienen elevaciones máximas que varían entre 2.800 y 3.500 m.s.n.m. Las áreas montañosas son muy onduladas y fuertemente inclinadas, con pendientes entre 10 y 60 por ciento y ocupan grandes extensiones de las partes occidental y norte de la Cuenca y algo menores en la parte oriental.

b) Areas de Valles o Depresiones: Las principales formaciones o unidades fisiográficas originadas por los depósitos sedimentarios cuaternarios son las terrazas antiguas no disectadas y disectadas, las planicies bajas aluviales y los complejos coluvio-aluviales; estas formaciones se encuentran entre los 1.800 m.s.n.m y los 2.200 m.s.n.m.

2.1.4.2. Suelos

La agricultura se practica principalmente en la planicie fluvio-lacustre, donde son concentradas las mejores tierras agrícolas, pero las comunidades de las laderas del valle también cultivan pequeñas parcelas de tierras.

Los suelos se clasifican como: Montañas altas, cimas convexas fuertemente disectadas. El nivel de fertilidad de los suelos aluviales es variable y está en relación con el manejo que se les ha dado.

2.1.4.3. Fisiografía

Fisiográficamente, la cuenca Alta se encuentra formada por un valle fluvio-lacustre, alargado en dirección norte – sur y situado a cotas incluidas entre los 1.850 y 2.000 m.s.n.m., cerrando hacia el oeste, el norte y el este por altas serranías cuyos picos llegan hasta los 4.334 m. En el valle, que abarca el 20 % de la superficie total, escurre el río Guadalquivir (que pertenece a la cuenca del río Grande de Tarija y la cuenca del río La Plata) y sus numerosos afluentes.

Las unidades fisiográficas se caracterizan por un sistema complejo de pendientes, engendrado por la acción tectónica, por las glaciaciones cuaternarias y por los factores morfogenéticos actuales (erosión hidrometeorica). De manera general indicaremos las siguientes unidades fisiográficas predominantes: Paisaje montañoso, Llanura lacustre, y Planicie aluvial.

2.1.4.4. Cobertura Vegetal

La vegetación arbórea y arbustiva en la cuenca está comprendida por: Arbóreas, Pino del Cerro, Aliso, Sauce Criollo y Llorón, Eucaliptos, Churqui, Molle, Algarrobo, Jarca, Ceibo, Tipa, Sisico, y la arbustiva: Tola y Combretácea.

De igual manera existe una vegetación herbácea, que tienen un mayor carácter xerófilo con respecto a las arbóreas, entre las más comunes tenemos: stipa mesiana, poa anua, panicum spp., etc. En general el tipo de vegetación nativa es xerofítica, usada por los pobladores del lugar para la construcción de arados, umbrales y leña. La flora exótica está representada por las especies de Eucalipto y Sauces.

2.1.4.5. Hidrografía

El curso principal de la cuenca en estudio, es el río Guadalquivir, que nace a 3.400 m.s.n.m. con el nombre de Chamata en la serranía de Sama de la cordillera de Tajzara, perteneciendo a la cordillera Oriental de los Andes. El río sigue una dirección predominante N.W – S.E, con una longitud hasta la sección más baja de la cuenca (Angosto de Aranjuez) de 52 Km. y una pendiente media de 0,49 %.

Los afluentes del Guadalquivir en su margen izquierda son los ríos, Carachimayu, Corana y Sella, y por la Margen derecha afluyen, los ríos Pajchani, Chico de San Lorenzo, Calama, Erquis, Coimata y la Victoria. La Cuenca Alta del Guadalquivir está formada por varias subcuencas menores, algunas de las cuales, originan ríos importantes y otras que solo tienen torrentes esporádicos durante el periodo lluvioso.

El río Guadalquivir se caracteriza por tener un régimen de caudales variados, que en la época de lluvias presentan caudales considerable de 11.296 m³/s como caudal medio mensual en la época de lluvias y en la época de estiaje el caudal medio mensual llega 0,122 m³/s (estación de aforo Canasmoro período 1.976 a 1.996); con bastante arrastre de sedimentos que pueden llegar a un estimado de 1.000 ton/km²/año. En la Figura 2.2., se esquematiza la red hidrográfica de la cuenca del río Guadalquivir, con todos sus afluentes principales y secundarios, desde donde nace (río Chamata) hasta su confluencia con el río Tarija (La Angostura).

2.1.4.6. Redes camineras principales y secundarias

El acceso vial a la cuenca se realiza mediante un camino que pertenece a la Red Fundamental del tramo Tarija – Cruce Iscayachi - Potosí. De Tarija a San Lorenzo dista 15 km, el tramo Tarija - Cruce Iscayachi es asfaltado y el tramo Cruce Iscayachi – San Lorenzo que corresponde a la Red Vecinal es también asfaltado. De San Lorenzo continúa

un camino vecinal hasta Trancas que se encuentra a la cabecera de la cuenca, con un recorrido de 15 km de buenas condiciones de transitabilidad todo el año, el tramo se encuentra asfaltado, en el recorrido pasa por las comunidades de: Cruce camino Carachimayo (5 km), Canasmoro (7 km).

Por otra parte, para ingresar a la parte sur-este y nor-este se realiza mediante una carretera de tierra con carpeta de ripio, desde el cruce Tomatitas a Sella Méndez 12 km, donde se tiene acceso a las comunidades como: San Mateo, Sella Méndez, Sella Quebradas, Chaupicancha y Serminuelas.

2.1.5. Caracterización Hidrológica

2.1.5.1. Aspectos Físico - Geográficos

Las unidades de análisis presentan los siguientes índices morfológicos y perfiles longitudinales de los ríos principales.

Tabla 2.2. Índices Morfológicos

CUENCA	Area A (km ²)	Perímetro P (km)	Coefficiente de compacticidad Ic	Pendiente media río principal Sm (%)
GUADALQUIVIR	3.303,50	360,2	1,77	1,68
GUADALQUIVIR ALTO	1.020,00	147,2	1,30	0,49
SANTA ANA	575,90	136,1	1,60	2,18
TOLOMOSA	468,40	109,0	1,42	3,39
CAMACHO	957,50	186,8	1,70	3,80

Fuente: Plan Departamental de Riego Tarija, 2001.

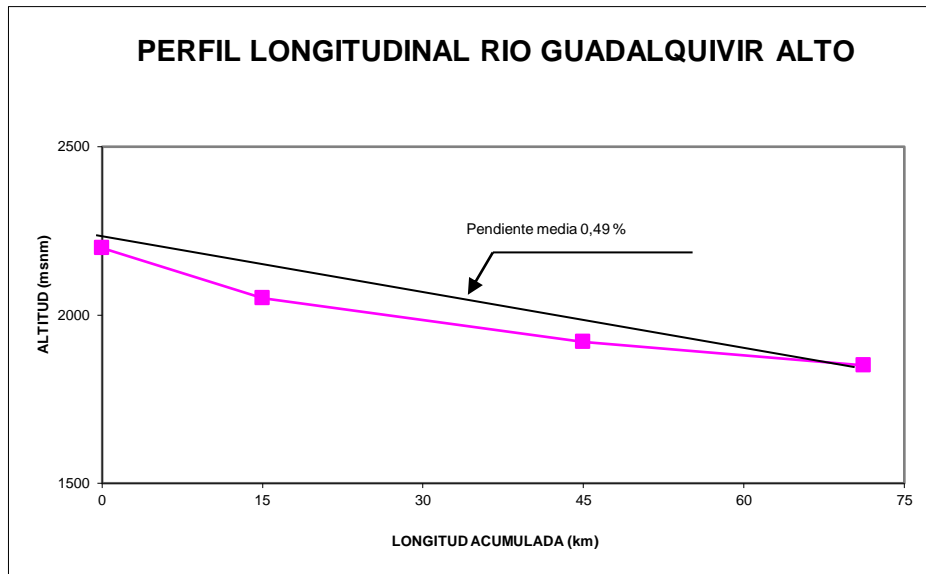


Figura 2.1. Perfil Longitudinal del río

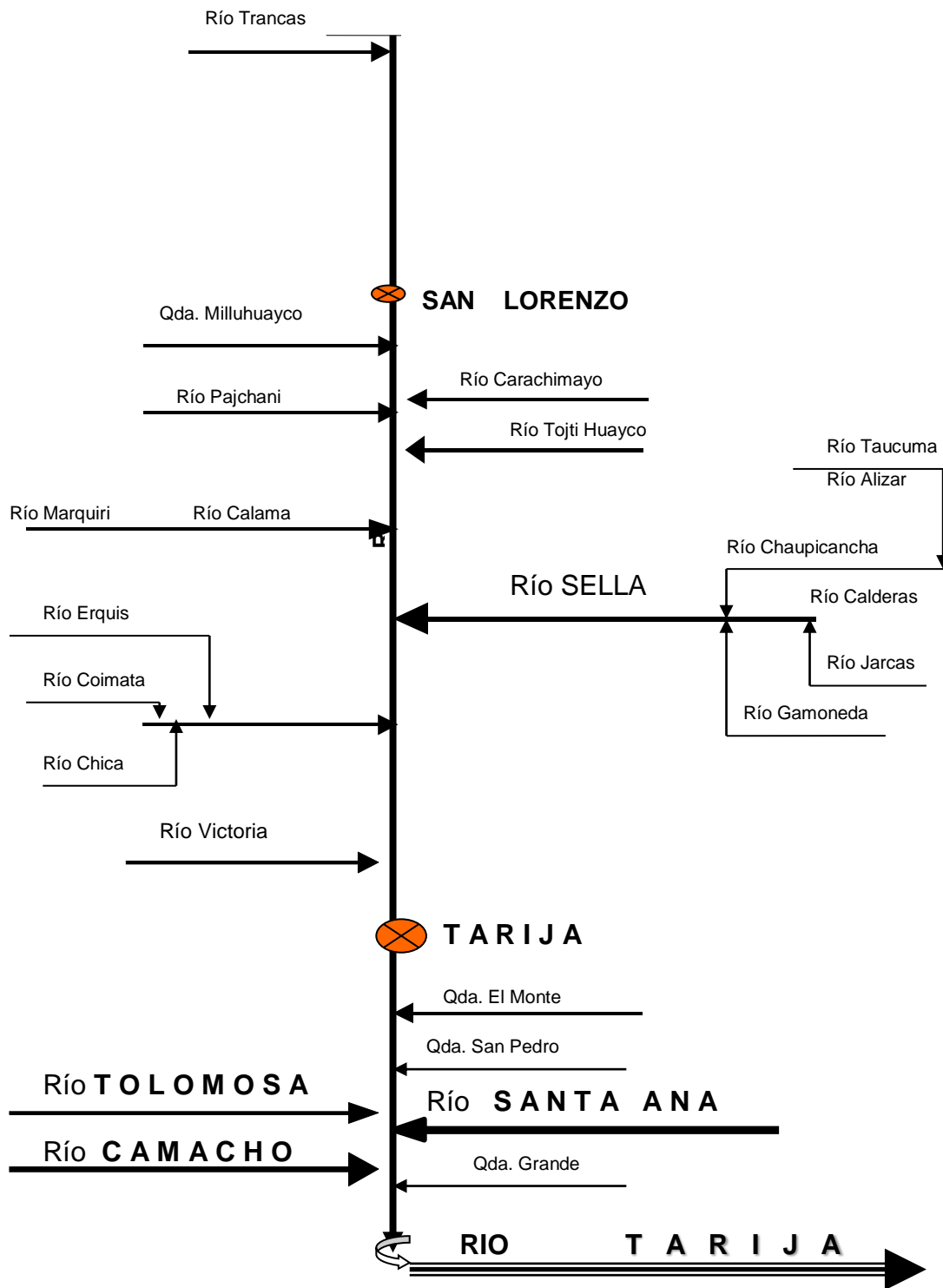


Figura 2.2. Esquema Hidrográfico del río GUADALQUIVIR

2.1.6. Red Hidrométrica e Hidrometeorológica de la cuenca Alta río Guadalquivir

2.1.6.1. Red Hidrográfica y Meteorológica

En el área de influencia de la cuenca existen tres estaciones hidrográficas: Canasmoro, Sella Quebradas y Obrajes. De igual manera se tienen aforos puntuales como es el caso del sector de Obrajes. En la Tabla 2.3, se indican su ubicación, tipo y período de datos con que se cuenta. La red hidrográfica del río Guadalquivir está compuesta en su margen izquierda por los ríos Carachimayu, Corana, Sella, y por la margen derecha los ríos Pajchani, Chico de San Lorenzo, Calama, Erquis, Coimata y la Victoria.

La red meteorológica e hidrometeorológica de la cuenca del río Guadalquivir, se muestra en el mapa de ubicación de las diferentes estaciones, según SENAMHI – Tarija son estaciones que están en actual funcionamiento.

Tabla 2.3. Disponibilidad de información en la cuenca

ESTACION	PREC.	TEMP.	VIENT.	HUM.	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION (msnm)	PERIODO DE REGISTRO
AEROPUERTO	X	X	X	X	21° 32' 48" S	64° 42' 39" W	1849	1962-2012
CANASMORO	X	X	X	X	21° 21' S	64° 45' W	2080	1973-2002
COIMATA	X	X	X	X	21° 29' 57" S	64° 47' 20" W	2027	1980-2012
EL TEJAR	X	X	X	X	21° 32' 35" S	64° 43' 16" W	1859	1970-2011
SAN LORENZO	X				21° 25' S	64° 45' W	1900	1976-1992
SELLA QDAS.	X	X	X	X	21° 23' 11" S	64° 40' 52" W	2145	1991-2012
TOMATAS GRANDE	X				21° 18' S	64° 48' W	2150	1977-1985
TRANCAS	X	X			21° 18' 29" S	64° 48' 57" W	2198	1984-2012
TUCUMILAS	X	X	X		21° 27' 40" S	64° 49' 52" W	2557	1978-2012

Fuente: SENAMHI, 2013.

2.1.7. Pluviometría

La red pluviométrica de la cuenca Alta del río Guadalquivir cuenta con nueve estaciones confiables dentro su área, las características de las mismas se indican en la Tabla 2.3.

2.1.8. Termometría

La red termométrica de la cuenca Alta del río Guadalquivir cuenta con siete estaciones confiables dentro su área, las características de las mismas se indican en la Tabla 2.3.

2.1.8.1. Temperatura mensual

En las temperaturas mensuales, se ha considerado la estación AASANA – Tarija, por el número de años de registro y la confiabilidad de dichos datos. Las temperaturas son estimadas tomando en cuenta la altitud de la cuenca.

Tabla 2.4. Temperatura Media Mensual

CUENCA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Guadalquivir													
Alto	19,0	18,6	18,1	16,4	13,8	11,6	11,5	13,2	15,1	17,6	18,6	19,0	16,0
Santa Ana	19,6	19,2	18,7	17,0	14,4	12,2	12,1	13,8	15,7	18,2	19,2	19,6	16,6
Tolomosa	19,4	19,0	18,6	16,8	14,2	12,1	11,9	13,6	15,5	18,1	19,1	19,5	16,5
Camacho	19,3	19,0	18,5	16,8	14,1	12,0	11,8	13,5	15,4	18,0	19,0	19,4	16,4

Fuente: Plan Departamental de Riego Tarija, 2001

2.1.9. Fluviometría

La red fluviométrica de la cuenca Alta del río Guadalquivir cuenta con tres estaciones que registran los caudales de los ríos y afluentes principales, de igual manera se miden puntualmente el caudal mediante molinete. Los lugares de aforo son Canasmoro, Obrajes y Sella Quebradas.

2.1.9.1. Hidrometría Anual

Los caudales medios anuales para los ríos y afluentes principales Guadalquivir se presentan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Caudales Medios Anuales (Qa)

RIO	ESTACIÓN	Qa (m ³ /s)
Guadalquivir	Canasmoro	2,440
Erquis	Erquis	0,800
Guadalquivir	Obrajes	6,099
Sella	Sella Quebradas	1,710

Guadalquivir	Trancas	0,852
Santa Ana	Puente vehicular	0,638
Tolomosa	San Jacinto	8,550
Camacho	San Nicolás	8,870

Fuente: Plan Departamental de riego Tarija, 2001.

2.1.9.2. Hidrometría mensual

A continuación se presentan los caudales medios mensuales, calculados por el PRONAR, en el que se han considerado los valores de la precipitación, temperatura, escurrimiento superficial y el factor de conversión tiempo que está relacionado con la temperatura. En la Tabla 2.6 y Figura 2.3, se muestran los caudales medios mensuales.

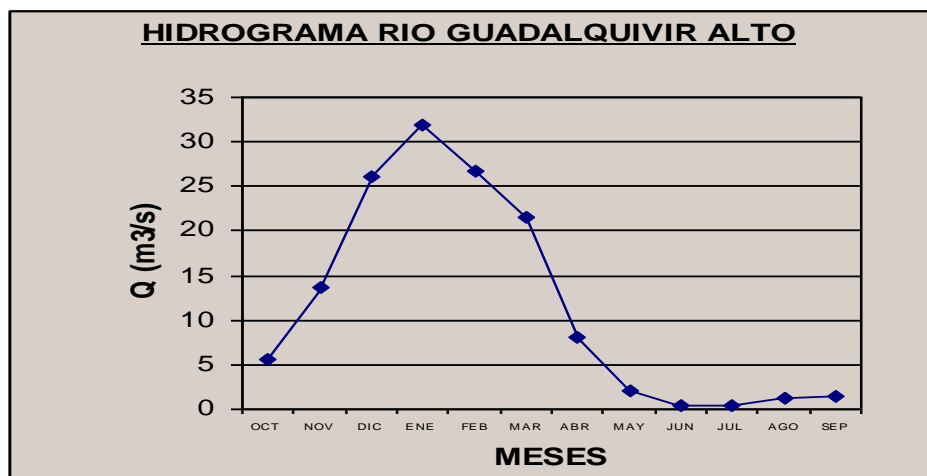
Tabla 2.6. Caudales Medios Mensuales (Qm)

MES	Qm (m ³ /s) (1)	Qm (m ³ /s) (2)	Qm (m ³ /s) (3)	Qm (m ³ /s) (4)
Octubre	5,51	2,80	4,52	6,32
Noviembre	13,58	7,00	8,76	16,13
Diciembre	26,17	11,00	13,64	23,94
Enero	31,88	14,70	17,62	28,59
Febrero	26,76	11,80	14,46	24,77
Marzo	21,64	10,60	12,02	21,61
Abril	8,07	5,30	3,43	5,49
Mayo	1,97	1,50	0,72	1,00
Junio	0,39	0,70	0,27	0,33
Julio	0,39	0,30	0,36	0,33
Agosto	1,18	0,50	0,63	1,00
Septiembre	1,38	0,80	1,08	1,83

Fuente: Plan Departamental de Riego Tarija, 2001.

(1) Guadalquivir Alto; (2) Santa Ana; (3) Tolomosa; (4) Camacho

Figura 2.3. Curvas de Caudales Medios Mensuales



Fuente: Plan Departamental de Riego, 2001.

2.1.10. Climatología

La Alta cuenca del río Guadalquivir corresponde a un clima Mesotermal Subhúmedo (Parte alta Frío semiárido y la parte baja Templado semiárido).

Las características de pluviosidad en la cuenca varían entre 600 a 700 mm de lluvia media anual. La temperatura media anual muestra una variación desde los 17,5 °C en la parte baja hasta los 14 °C en la parte alta de la cuenca, con variaciones extremas entre los 39,3 °C (octubre) y los – 8 °C (agosto).

2.1.11. Riesgos en la cuenca Alta del río Guadalquivir

2.1.11.1. Heladas y granizo

La época de mayor probabilidad de HELADAS se inicia a fines del mes de mayo y se extiende hasta fines del mes de agosto. El período medio de heladas es de 92 días comprendidos entre los meses de junio y agosto. La frecuencia de heladas, se registran alrededor de 25 heladas por año, la frecuencia media mensual ocurre en el mes de julio con 9,5 heladas, seguido por junio con 9,1 y agosto con 4,3. El 99% de las heladas no son inferiores de los –3,9 °C. Las heladas se presentan en la cuenca de 30 a 50 días entre los meses de junio, julio y agosto.

El GRANIZO es un fenómeno que se presenta generalmente a fines de primavera y en verano. Los meses con más probabilidad de granizada son octubre y noviembre. De todas maneras la granizada representa un evento ocasional en toda el área y su incidencia es mucho menor en la zona de la meseta de Sella. Se estima que el granizo se presenta con una frecuencia relativa de 1 a 5 días al año.

2.1.11.2. Inundación

Las inundaciones se localizan a ambos márgenes de los ríos, es decir las tierras de las riberas de los ríos son las más afectadas por que no tienen ninguna protección natural ni artificial, como es el caso de las tierras que se encuentran en las terrazas de los ríos Guadalquivir y Sella. Los agricultores han talado todas las plantaciones de árboles que se encontraban en las riberas de los ríos para aprovechar mejor sus terrenos, esto no solamente trae el riesgo de inundación a los terrenos agrícolas sino a barrios o poblaciones asentadas cerca de los ríos.

2.1.11.3. Sequías

A causa de la muy marcada estacionalidad de las lluvias, de la prevalente morfología montañosa y del tamaño reducido de las varias subcuencas, la escorrentía de las aguas de superficie es generalmente muy rápida y concentrada en los meses de lluvia. Por consiguiente los afluentes mayores del río Guadalquivir, que se presentan bastante caudalosos entre los meses noviembre a abril, se vuelven pequeños riachuelos durante los restantes meses del año y varios de ellos (ríos Pajchani, Tojti Huayko, Sella) se secan totalmente en superficie y solo tiene agua en el subálveo. En el año 1983 se tuvo precipitaciones bajas, que no alcanzaron los 300 mm por año. Se estima que la frecuencia es una vez cada doce años.

2.1.12. Aprovechamiento de aguas subterráneas

2.1.12.1. Definición de zonas de explotación

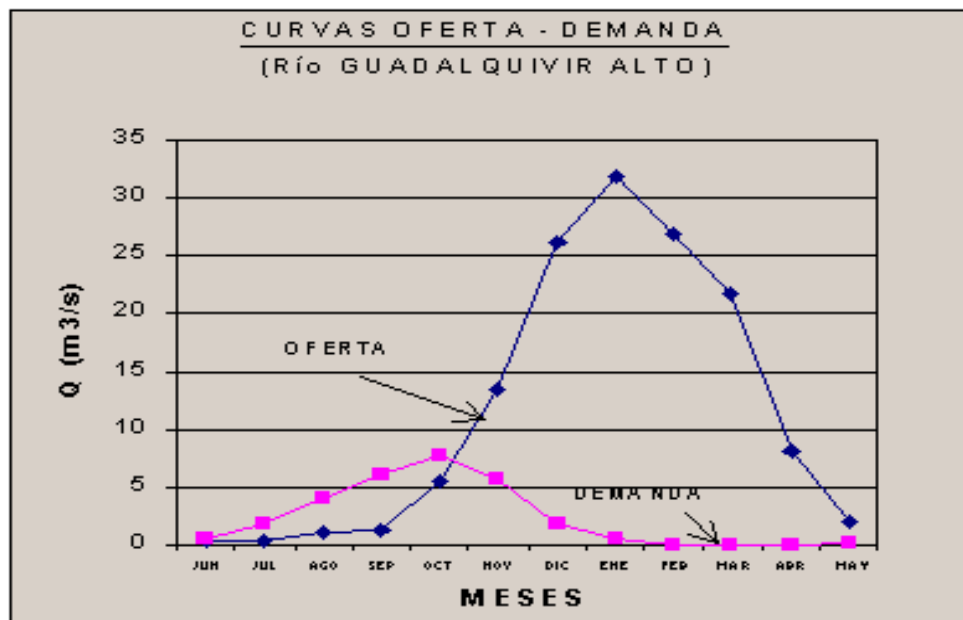
En la cuenca Alta del río Guadalquivir, las zonas de explotación y de condiciones hidrogeológicas favorables, se encuentran en las zonas de: San Lorenzo hasta Rancho Sur y

Monte Cercado – Tarija - San Pedro - La Tablada; estas son zonas recomendables para explotación de las aguas subterráneas. Las áreas probables para la captación de las aguas subterráneas esta en las comunidades de Erquis, Victoria y Calama, las condiciones hidrogeológicas son favorables. La zona de San Mateo y Tomatitas son áreas con limitaciones para la explotación de aguas subterráneas. La mayoría de los pozos existentes están ubicados en el Valle Central de Tarija y contribuyen al abastecimiento de agua potable, con caudales que varían entre 5 – 40 l/s. (2)

2.1.13 Análisis de la oferta del recurso hídrico para riego

En el inciso 2.1.9 se ha analizado el caudal medio mensual que se tiene en la cuenca con su respectivo hidrograma de caudales (curva de caudales), éste es la oferta del recurso hídrico de la cuenca y son datos que se utilizan para el cálculo del balance hídrico. En el Figura 2.4 se muestra las curvas de Oferta y Demanda del recurso hídrico.

Figura 2.4. Curvas Oferta - Demanda de agua para riego



Fuente: Plan Departamental de Riego Tarija, 2001

2.1.14. Análisis de la demanda del recurso hídrico para riego

Para la demanda se ha considerado (requerimientos netos de riego) los cultivos más representativos de la cuenca, estos se adecuan a los suelos existentes, condiciones climáticas, posible ampliación de la frontera agrícola y el diagnóstico agropecuario que se tiene de la zona.

2.1.15. Análisis de otros usos

Las poblaciones como San Lorenzo, Rancho, Erquis-Oropeza, Coimata, Victoria y otras cuentan con sistemas de agua potable con una dotación promedio de 120 l/hab/d, algunas de ellas cuentan con alcantarillado sanitario como San Lorenzo y otras. La población de Tarija cuenta con un sistema de agua potable y alcantarillado con una dotación de 180 l/hab/d, captan las aguas de los ríos Victoria, Guadalquivir y de pozos perforados en diferentes barrios de la ciudad. Las industrias existentes en la ciudad utilizan un 20 % del agua que distribuye COSAALT (Cooperativa de Agua y Alcantarillado Tarija).

2.1.16. Balance de aguas para riego

El balance de aguas entre la oferta y la demanda, se puede apreciar en las Curvas Oferta – Demanda, que en toda la cuenca del río Guadalquivir los meses de déficit de agua para riego es desde junio hasta octubre.

Es necesario hacer notar que aunque exista déficit de recurso hídrico superficial, en todas la Unidades existen aguas subsuperficiales (subálveo) y aguas subterráneas que pueden ser aprovechadas con la construcción de infraestructura de riego adecuada para el aprovechamiento de este tipo de recurso hídrico.

2.1.17. Sistemas de riego existentes

Según el Plan Departamental de Riego, en la cuenca se identifican 276 sistemas de riego, de los cuales gran parte son del tipo rudimentario, con obras de toma construidas por los propios usuarios con materiales de la zona como piedra, tepes, chapas, ramas y otros, por lo que son tomas muy inestables que son destruidas en la época de lluvias. Los canales (acequias) son de tierras que no tienen ningún revestimiento y en algunos lugares existen algunas obras de arte construidas también rústicamente con palos o chapa planas.

En las Tablas 2.7 y 2.8 se realiza un resumen de los sistemas de riego según la fuente hídrica de aprovechamiento y de la infraestructura de riego existente (obras de toma) y que ha sido mejorada, es decir considerando solo proyectos mejorados.

Tabla 2.7. Número de sistemas de Riego por Fuente Hídrica

UNIDADES	Río	Vertiente	Embalse
Guadalquivir Alto	101	2	0
Santa Ana	28	0	0
Tolomosa	43	0	1
Camacho	101	0	0
Total	273	2	1

Fuente: Plan Departamental de Riego Tarija, 2001.

Tabla 2.8. Infraestructura de Riego – Obras de Toma

UNIDADES	Toma Directa	Tajamar/presa derivadora	Galería filtrante	Presa
Guadalquivir Alto	11	9	12	0
Santa Ana	3	3	3	0
Tolomosa	10	1	1	1
Camacho	13	4	1	0
Total Obras	37	17	17	1

Fuente: Plan Departamental de Riego Tarija, 2001.

2.1.18. Infraestructura asociada al riego

El acceso vial a las cuencas se realiza mediante caminos que pertenecen a la Red Fundamental y a la red vecinal y son con carpeta de ripio que son transitable todo el año.

La infraestructura de apoyo que existe en la cuenca son los mercados campesinos que se encuentra en la ciudad de Tarija y Calamuchita, donde todos los agricultores de la cuenca

llegan a vender sus productos en especial los fines de semana que son días ya tradicionales de feria agrícola. También existe un Silo Comunal en Chocloca Norte, que utiliza el Centro de madres para semilla y comercialización, de igual manera existen agricultores que tienen silos individuales.

2.2. Recurso suelo en la cuenca Alta del río Guadalquivir

2.2.1. Uso Actual del Suelo

La agricultura y la ganadería, las únicas actividades económicas de la población del área rural, son practicadas con métodos tradicionales y sus productos apenas son suficientes o aseguran la subsistencia.

La agricultura se practica principalmente en la planicie fluvio – lacustre donde se concentran las mejores tierras agrícolas pero las comunidades de las laderas del valle también cultivan pequeñas parcelas.

En las tierras con riego se cultiva alfalfa, hortalizas y desde hace algunos años, frutales sobre todo manzanas, durazneros y frutillas que se destinan al mercado de la ciudad de Tarija.

La ganadería se basa casi exclusivamente sobre el pastoreo, que se practica principalmente en los rastrojos y en los pastizales, pero también en los suelos de prevalente vocación silvo - pastoril.

2.2.1.1. Riego

A causa de la muy marcada estacionalidad de las lluvias, de la prevalente morfología montañosa y del tamaño reducido de las varias sub cuencas, la escorrentía de las aguas de superficie es generalmente muy rápida y concentrada en los meses de lluvia.

Por consiguiente también los afluentes mayores del río Guadalquivir que se presentan bastante caudalosos entre diciembre y abril, se vuelven pequeños riachuelos durante los restantes meses del año y varios de ellos como el Pajchani, Tojtiwaykho, Sella, El Monte y San Pedro se secan totalmente en superficie y solo tienen agua en el subálveo (agua que

se encuentra en forma subsuperficial y que constituye una reserva), por lo cual también el caudal del río Guadalquivir disminuye.

Por lo tanto son menores las posibilidades de utilizar agua de los ríos con fines de riego, sin la construcción de embalses artificiales. Por otro lado cabe recordar que una parte de los caudales de estiaje tienen que ser reservados para el abastecimiento de agua potable a los centros poblados.

Los recursos hídricos subterráneos son profundos y muy poco explotados con fines de riego, excluyendo el agua de subálveo. Sin embargo son aptos para ser utilizados en algunas de las subcuencas del margen derecho del río Guadalquivir.

La infraestructura de riego existente cuenta en la actualidad con un buen número de sistemas de riego mejorados, sumado a estos existen los sistemas tradicionales, constituyéndose en conjunto en la base del sistema de distribución del agua para los cultivos. Estos sistemas desde el punto de vista cuantitativo como cualitativo, son abastecidos por el río Guadalquivir en ambos márgenes del lecho. (3)

Sin el riego en realidad, sería muy difícil lograr un desarrollo del sector agropecuario en las tierras del fondo del valle y producir el forraje suplementario necesario como para provocar la transformación de la ganadería preconizada.

2.2.1.2. Agricultura

La agricultura es una de las actividades más importantes desarrolladas en la Alta Cuenca, además de las actividades ganaderas como la lechería, avícola y porcina, que son importantes por ser la base de la economía de la zona.

En la actualidad existen algunos agricultores que hacen uso de tecnologías modernas, como así también el uso de semillas de alta capacidad productiva.

Todas las actividades agrícolas son desarrolladas en suelos fluvio lacustres donde están concentradas las mejores tierras tanto por su textura, permeabilidad, profundidad y sobre todo sus suelos son regados por aguas que no contienen sales y compuestos tóxicos.

También en los suelos de ladera se desarrollan actividades agrícolas, pecuarias y pastoriles, las tierras actualmente cultivadas se estima que se encuentran alrededor de 15.400 has; de estas 13.000 has o sea el 85% son tierras a secano y las 2.400 has restantes son servidas por sistemas de riego rudimentarios en su mayor parte y sistemas mejorados que son alimentados por el río Guadalquivir y sus principales afluentes.

De las tierras regadas, sin embargo solamente algunas disponen de riego durante todo el año, mientras que los demás solo cuentan con riego durante la temporada de lluvias (medio riego).

En las tierras a secano se cultiva principalmente maíz, trigo, papa, arveja, maní, girasol, poroto, frutales en general y cultivos forrajeros que es la base de las actividades en la zona.

2.2.1.3. Pecuario

La ganadería es otra de las actividades importantes desarrolladas en la zona de estudio, se basa casi exclusivamente en el pastoreo, que se practica principalmente en los rastrojos y en los pastizales, pero también en los suelos de prevalente vocación silvo-pastoril y silvo-forestal.

En la cuenca se crían, según estimaciones aproximadas alrededor de 20.500 cabezas de ganado, de las cuales 7.400 son vacunos, 6.700 ovinos y 6.400 equinos. (4)

También la industria avícola es un sector en continuo crecimiento y la carne de pollo se constituye en un alimento básico de la población.

2.2.1.4. Humano

En la zona de estudio de acuerdo al Censo del 2001, los componentes por núcleo familiar son de 5 miembros.

Las principales causas de morbilidad determinadas se refieren a la mala calidad del agua, deficiente alimentación y los malos hábitos higiénicos.

Entre las causas de enfermedades respiratorias en la zona, fuentes primarias han mencionado el excesivo contenido de polvo en la atmósfera debido a la combinación de

varios factores como la falta de cobertura vegetal, escasez de lluvia en periodos del año y los vientos.

Según los datos del Censo 2001, la migración al departamento de Tarija ha aumentado en el último periodo censal para cumplir diferentes actividades económicas temporales y permanentes.

El hombre se dedica al trabajo y sustento del hogar para dotar de bienestar, salud, vivienda, educación, a los miembros de su familia, la mujer también participa en forma activa en el desempeño de sus funciones ayudando al marido en todas las actividades del trabajo, en el cuidado y crianza de los hijos y la venta de productos, los niños se incorporan tempranamente a la fuerza del trabajo familiar, al principio cuando están aún muy pequeños cuidando y pastoreando el ganado y después en las demás labores familiares productivas.

2.2.1.5. Forestal

El papel que desempeña la cubierta vegetal es de gran importancia en la utilización continua de los terrenos del Valle de Tarija, la vegetación ayuda a controlar la escorrentía superficial de las aguas durante la época de lluvia.

La vegetación arbórea y arbustiva en formación cerrada solo se encuentra en algunos bosques, como ser: Pinos, Algarrobo, Eucaliptos, Molles, en los valles de la Victoria y Erquis. (5)

Las restantes especies arbóreas de la Cuenca Alta son de tipo xerofítico que se presentan en forma de bosque abierto, con una incidencia protectora relativamente baja.

El límite superior de la vegetación arbórea (Acacia y Prosopis) se sitúa alrededor de los 2.200-2.300 m, más arriba donde hay arbustos y pastos, los árboles se encuentran solo en los medios más favorables donde también prosperan el aliso y el molle.

En cuanto a la vegetación arbustiva, se destaca la vegetación de thola y especies colonizadoras de los suelos degradados, que proporcionan una eficiente cobertura.

2.2.2. Pendientes de las áreas actuales y potenciales bajo riego

Existe en las zonas áreas de prevalente uso silvopastorial y forestal e Inforestales, que tienen procesos erosivos en cárcavas y medias laderas, donde se observa un apreciable potencial de desarrollo para las actividades agrícolas, que en su conjunto constituyen gran parte de las tierras descritas en el uso de la tierra, donde la pendiente juega un papel preponderante permitiendo dar el paso a procesos erosivos fluviales y eólicos, sumados a la escasa cobertura vegetal, al excesivo pastoreo y/o ramoneo, permiten completar el ciclo de destrucción de los suelos.

Se pretende reducir significativamente la esorrentía superficial y controlar los fenómenos erosivos que están progresivamente degradando y convirtiendo en eriales gran parte de las laderas, este fenómeno natural que se presenta en las laderas producto de su pendiente afecta a la zona y se debería mejorar la vegetación nativa y foránea acompañada de obras para el control de la esorrentía.

Se debe hacer notar que el cauce del drenaje del río Guadalquivir, así como de sus afluentes, presenta una inestabilidad manifiesta con divagaciones y anastomosis continuas, donde zonas de depósito impiden el flujo adecuado e uniforme de las descargas.

Los suelos de los depósitos coluvio-fluviales que se encuentran en las laderas de pie de monte, presentan una pendiente fuertemente inclinada a casi plana y están constituidos por una mezcla heterogénea de arcilla y clastos líticos.

Los suelos de terrazas aluviales actuales que ocupan las terrazas más bajas están expuestos a procesos erosivos por las aguas de los ríos, los suelos recientes presentan un relieve plano a casi plano y están constituidos por sedimentos aluviales finos con cierto grado de selección.

Cabe destacar que el potencial productivo de gran parte de los suelos de la cuenca y de las mesetas es bueno, como demuestran los resultados que se obtienen con el cultivo de hortalizas y frutales en las áreas regadas en los afluentes del margen derecho del río Guadalquivir y en la zona de San Mateo (margen izquierdo del río Guadalquivir).

Los pastizales, por otro lado abarcan gran parte de la cuenca, caracterizadas por vegetación ya sea arbórea, arbustiva y herbácea muy escasa y además de pastizales de altura.

2.2.3. Aptitud del suelo con fines de riego

La aptitud de un suelo para la explotación agrícola se mide por su suelo, relieve, drenaje y la calidad de las aguas usadas para este fin.

Los suelos de las terrazas lacustres son profundos, aprovechan fácilmente las raíces cuando estas penetran, no presentan contenidos de piedras que podrían dificultar el desarrollo de las plantas.

Tiene una elevada capacidad de retención de humedad aprovechable y moderada velocidad de infiltración, por lo tanto cuanto mayor es la cantidad de agua almacenada por el suelo, mayor es también la cantidad disponible para las plantas.

No presentan ningún nivel de salinización como tampoco elementos tóxicos.

En lo que se refiere a su relieve son suelos de pendientes moderadas por lo que se limita las pérdidas de tierras por erosión y otros agentes naturales, presentan un buen drenaje, no son zonas inundables.

En cuanto a las aguas para riego tanto en su margen izquierdo como derecho, el río Guadalquivir y sus afluentes no contienen sales disueltas por lo que permite en estas zonas desarrollar toda actividad agrícola, forestal y pastoril.

El suelo se constituye en el recurso más importante en la economía de la zona donde se desarrollan los principales cultivos como: papa, tomate, hortalizas, arveja, maní, cebolla, poroto, girasol, maíz, frutales de pepita y carozo, frutilla y cultivos forrajeros que son característicos de la zona.

2.2.4. Riesgos

2.2.4.1. Erosión

En el borde occidental de la meseta de Sella existe un proceso erosivo a la altura de Rancho Norte, donde el río Guadalquivir corre al pie de la misma y contribuye a acelerar y agravar el desmoronamiento de la parte que da hacia el río.

En la época seca, la cubierta vegetal de los pastos y de las tierras forestales es mínima, los árboles y los matorrales casi no tienen hojas y las especies arbóreas apenas son visibles, por

lo que no prestan ayuda alguna a los suelos para protegerlos del impacto de las gotas de lluvia y de la capacidad de arrastre del agua de escorrentía superficial.

En estas condiciones el efecto de las primeras lluvias es desbastador sobre todo en las áreas de pendientes acentuadas.

Toda la cuenca es afectada por procesos de erosión hídrica que por la extensión de sus áreas y el grado de intensidad, amenazan reducir progresivamente la potencialidad productiva de las tierras y constituir un gran obstáculo para el futuro desarrollo, las causas pueden estar en una inestabilidad de las rocas paleozoicas y de los sedimentos fluviolacustres, el régimen de las precipitaciones, la escasa cobertura vegetal y su progresiva disminución provocan una merma en la capacidad productiva de sus suelos.

Las áreas de montañas y de laderas, caracterizadas por una morfología irregular y fuerte pendiente, constituyen la parte de la cuenca más afectada por los fenómenos erosivos.

En las partes bajas de la cuenca y en el fondo del Valle, la erosión ha actuado y sigue actuando de manera profunda y definitiva, llegando a causar la formación de cárcavas típicas de la subcuenca del río El Monte, donde pone en peligro la estabilidad de varios caminos que lo cruzan y la progresiva destrucción de suelos en las cabeceras de las mismas cárcavas y a lo largo de los ríos principales y en particular al borde occidental de la meseta de Sella a la altura de Rancho Sur, donde un tramo de la carretera Tarija - Sella Cercado esta seriamente amenazado.

2.2.4.2 Desertificación

En esta Unidad de Análisis se tiene una precipitación de 600 mm, distribuida en pocos meses y con gran intensidad, esta contribuye a provocar cambios en el transporte hídrico y la acción eólica que lleva a la desertificación, si esta precipitación fuese distribuida en 8 meses, por ejemplo se lograría una mayor conservación de los suelos.

La falta de cobertura vegetal y los suelos que en parte son arcillosos por efectos de la precipitación se deslizan fácilmente por falta de este recurso, la concentración de las precipitaciones en pocos meses es debido a las altas temperaturas de verano y bajas en invierno, además de la sequía estacional que se manifiesta en algunos años, aumenta

notablemente la deficiencia de cobertura del suelo desapareciendo y produciendo una desertificación del medio.

Actualmente el estado de deterioro de la cubierta vegetal es alto, por efecto de la sobreexplotación sea esta para leña y sobre pastoreo, esta situación no permite una protección adecuada de los suelos, lo que provoca una disminución de la infiltración y el consiguiente escurrimiento que se hace notorio.

2.2.4.3. Geológicos

La zona por donde se encuentran los canales de riego, están constituidos por sedimentos pertenecientes al cuaternario (arcillas, gravas, arenas), definidos por cordones orográficos, conformados por rocas principalmente de edad paleozoica, que al mismo tiempo configuran los límites o bordes de la cuenca cuaternaria.

Los sedimentos cuaternarios adoptan una forma estrecha por el norte e interdigitados con las rocas antiguas, mientras que hacia el sur y este, dichos sedimentos se abren, cubriendo mayores espacios. Por otro lado esta cubierta sedimentaria en el pasado fue escenario de eventos muy interesantes por contener restos fósiles de gran valía en el campo de la Paleontología de vertebrados.

Los riesgos que se presentan están relacionados a la sobresaturación del material arcilloso, el cual se derrumba sobre los canales ocasionando taponamientos periódicos.

2.2.4.4. Salinización

Los suelos destinados para uso agroforestal o silvo pastoril no presentan ningún nivel de salinización, y esto es porque sus capas freáticas no presentan sales disueltas (ascensión capilar), en la irrigación de los terrenos destinados para las actividades agrícolas-forestales y pastizales, por lo general sus aguas no contienen sales.

2.2.4.5. Contaminación

Debido a la instalación de granjas avícolas, las que cuentan con mataderos propios vierten sus aguas ocasionando contaminación hacia los ríos.

En estas zonas la actividad lechera también presenta contaminación, debido al lavado de las instalaciones como así también por la oxidación de los residuos fecales que vierten sus aguas hacia las corrientes más próximas y sus gases hacia la atmósfera.

También se debe hacer notar que a partir de junio hacia delante, todos los años ocurren grandes incendios, producto de la quema de los rastrojos, provocando daños considerables, con la consiguiente pérdida de cobertura vegetal, especies animales como también pérdidas humanas.

Otra contaminación es la de las aguas de los ríos, se ha señalado la presencia de bacterias que son responsables de disturbios frecuentes del aparato digestivo sobre todo en los niños, presente en las aguas de varios ríos, en especial en el periodo de estiaje, sobre el río Guadalquivir a la altura de San Lorenzo y en la confluencia con el río La Victoria, cuyas aguas son en parte aprovechadas para el abastecimiento de agua potable en la ciudad de Tarija.

Con el desarrollo de las actividades agrícolas el uso de productos fitosanitarios en forma excesiva están causando daños por la emanación de sus gases hacia la atmósfera como también parte de estos residuos son vertidos hacia las corrientes de agua por escorrentía.

2.2.5. Áreas de Restricción

El sector occidental de esta cuenca pertenece a la Reserva Biológica de la Cordillera de Sama que tiene una formación rectangular con un eje central predominante de Norte a Sur que integra parte de dos zonas fisiográficas: la zona alta y la zona baja de valles intermedios que comparte territorios de tres importantes Unidades de Análisis, como ser: la Alta Cuenca del Guadalquivir, Tolomosa y Camacho. (6)

2.3. Aspectos tecnológicos y productivos

En la actualidad las actividades agrícolas desarrolladas, en su mayoría siguen siendo de carácter rudimentario, también hay agricultores que por contar con mejores posibilidades económicas hacen uso de tecnologías modernas, como así también el uso de semillas de alta capacidad productiva que elevan el nivel productivo.

En esta Unidad de Análisis se practica una agricultura basada en cultivos tradicionales como papa, haba, cebada, trigo, maíz, forrajes, hortalizas y frutales en su conjunto.

2.3.1. Laboreo del Suelo

En la preparación de los terrenos para las siembras, la gran mayoría de los agricultores hacen uso del arado de palo a tracción animal, por la economía que representa, la disponibilidad y por el excesivo minifundio.

En otras áreas y de acuerdo a la economía de los agricultores hacen uso de maquinaria agrícola.

2.3.2. Uso de Tecnología

En esta cuenca los agricultores están haciendo uso de tecnologías nuevas, ya que existen instituciones que vienen realizando trabajos de investigación, para luego ser usados por los agricultores.

2.3.3. Área Regada por Grupos de Cultivos en Invierno y Verano

Para realizar la agrupación de cultivos, se tomaron en cuenta los más representativos de la cuenca.

Tabla 2.9. Área regada por Grupos de Cultivo

ESTACIÓN INVIERNO			ESTACIÓN VERANO		
TIPO DE CULTIVOS	AREAS (has)		TIPO DE CULTIVOS	AREAS (has)	
Maíz	1.990		Maíz	5.431	
Papa	2.690		Papa	3.925	
Arveja	617		Arveja	1.914	

Frutales	541	Frutales	1.162
Vid	946	Vid	1.345
Cebolla	559	Cebolla	975
Otros	1.855	Otros	2.985
TOTAL	9.198	TOTAL	17.737

Fuente: Plan Departamental de Riego, 2001

2.3.4. Producción por Grupos de Cultivos en Invierno y Verano

Para determinar la producción se tomaron en cuenta los cultivos seleccionados para ambas estaciones del año.

Tabla 2.10. Producción por Grupos de Cultivos

ESTACION INVIERNO			ESTACION VERANO		
TIPO	DE	TM	TIPO	DE	TM
CULTIVO			CULTIVO		
Maíz		3761.10	Maíz		10264.50
Papa		21.251	Papa		31.007
Arveja		5.121	Arveja		15.886,2
Frutales		4.869	Frutales		10.458
Vid		8.694	Vid		12.360
Cebolla		4,639.70	Cebolla		8,092.50
Otros		26.343	Otros		42.655.5
TOTAL		74,678.8	TOTAL		130,723.7

Fuente: Plan Departamental de riego, 2001

(TM = Tonelada Métrica)

2.3.5. Áreas potenciales de riego

Según el Plan Departamental de Riego, 2001 y el Plan Departamental del Agua, 2013, esta unidad, cuenta con áreas donde se puede expandir el riego como ser las Pampas de Sella, Monte Cercado, Monte Méndez y parte de San Mateo.

Las categorías consideradas como tierras con potencial agropecuario, son: agrícola intensivo, agropecuario intensivo, agropecuario extensivo, y las tierras agrosilvopastoriles, tomando en cuenta que son áreas donde se puede expandir el riego mediante la construcción o mejoramiento de los sistemas de riego existentes y lograr riego permanente con el objeto de aumentar la producción. (7)

2.3.5.1. Introducción

Estas áreas potenciales presentan características similares a las áreas que actualmente se encuentran dentro de la explotación agrícola. Cuentan con pendientes planas o casi planas, estas áreas no son regadas porque existe un déficit de agua pero cuentan con cota y pendiente que permite integrar estas áreas a la actividad productiva.

La aptitud del suelo de estas nuevas áreas puede permitir desarrollar cualquier tipo de actividad agropecuaria, de existir alguna limitante se podrá corregir para que estas nuevas áreas se integren a la explotación. (8)

Las nuevas áreas y al igual que las que se encuentran en producción tienen procesos erosivos en constante avance, la desertificación no es visible, la geología no cambia con relación a las otras áreas y la presencia de sales no es limitante para el desarrollo de los cultivos, no existe contaminación visible.

Estas nuevas áreas potenciales no cuentan con restricciones.

2.3.5.2. Áreas de Expansión en Riego

La cuenca del río Guadalquivir cuenta con importantes recursos hídricos que se encuentran en las diferentes Unidades de Análisis, tal es el caso en la cuenca del Guadalquivir Alto que cuenta con Presas en diseño final que por sus abundantes recursos hídricos permitirán expandir áreas para la actividad agrícola; también el sistemas que permitirán integrar nuevas áreas con este fin.

En la cuenca del río Guadalquivir, se podrían anexar aproximadamente 5000 has, incluyendo los sistemas rústicos y proyectos grandes, con una mejor utilización de los recursos agua y suelo y mejorando la operación y mantenimiento de los sistemas. (9)

2.3.5.3. Identificación de Problemas

El principal problema existente es el régimen de lluvias que es concentrado en determinada época del año, lo cual ocasiona déficit de recursos hídricos en la época de estiaje, disminuyendo las áreas a regar.

La solución de la falta de agua está relacionada con la construcción de embalses, para acumular agua superficial, para ser utilizada en la época de mayor necesidad.

2.3.5.4. Áreas Temáticas de Intervención para Riego

Las áreas temáticas de la cuenca cuentan con recursos hídricos de afluentes de ríos y quebradas que permiten usar esta agua con fines de riego.

Las iniciativas siempre fueron por parte de los comunarios de cada sector que viendo la necesidad de dotar de agua a sus tierras construyeron tomas rústicas y precarias y otros sistemas donde la eficiencia de uso es mínima, el resto que por su propia construcción se pierde por infiltración y por otros factores.

Las diferentes comunidades a través de sus organizaciones solicitan ayuda a entidades relacionadas con el riego, para que se les brinde el apoyo técnico para un mejor uso de estos recursos. (10)

En el Inventario de Riego realizado por el PRONAR, la mayoría de los sistemas inventariados tanto rústicos como mejorados, riegan las parcelas de terreno por gravedad principalmente y por tablares.

Los Sistemas Presurizados en esta cuenca están siendo implementados en forma muy aislada, tal es el caso de la Asociación de Productores de Frutilla que instalaron con el sistema de riego a presión, una superficie de 15 has aproximadamente, en las comunidades de Coimata, Turumayu y Erquis.

3. MODELACIÓN HIDROLÓGICA USANDO EL MODELO WEAP

3.1. Descripción del modelo

WEAP es un instrumento computacional para la planificación integrada de recursos hídricos, cuyo objetivo es la asistencia para el planificador experimentado, proporcionando un marco comprensivo, flexible y fácil de usar para el análisis de políticas.

La localización de recursos limitados de agua, la calidad ambiental y la política para el empleo sostenible de agua son características de preocupación creciente. Modelos de simulación convencionales orientados son no siempre adecuados. Durante la década pasada, ha surgido un acercamiento integrado de desarrollo del agua que coloca proyectos de abastecimiento de agua en el contexto de características de lado de la demanda, así como características de calidad de agua y preservación del ecosistema.

WEAP apunta para incorporar estos valores en un instrumento práctico para la planificación de recursos de agua. Es distinguido por su acercamiento integrado al simular redes fluviales y por su orientación de política. WEAP es un laboratorio para examinar el desarrollo alternativo de agua y estrategias de dirección.

Como una base de datos, WEAP proporciona un sistema para mantener la demanda de agua y la información de suministro. Como un instrumento de pronóstico, WEAP simula la demanda de agua, el suministro, la precipitación, los flujos de corriente, almacenaje, la generación de contaminación, el tratamiento y la descarga, y la calidad del agua. Como un instrumento de análisis de política, WEAP evalúa una gama completa de desarrollo de agua y opciones de dirección, y toma en cuenta los múltiples y competentes usos redes fluviales.

Las capacidades de WEAP son las siguientes:

- Base de datos de balance de agua: proporciona un sistema para mantener información de oferta y demanda de agua.
- Herramienta de generación de escenarios: simula la demanda, oferta, esorrentía, caudal, almacenaje, generación, tratamiento y descarga de contaminantes y calidad del agua en los ríos.

- Herramienta de análisis de políticas: evalúa en gama completa de las opciones del desarrollo y manejo del agua, y toma en cuenta los múltiples y opuestos usos de los recursos hídricos.

El principio básico de WEAP es el balance de masa enfocándose en sistemas municipales y agrícolas, una sola cuenca o complejos sistemas de cuencas trans-fronterizas, pudiendo simular una amplia gama de componentes naturales e intervenidos de estos sistemas, que incluye, escurrimiento por precipitación, flujos base y recarga de aguas subterráneas por precipitación, análisis de las demandas sectoriales; conservación del agua; derechos de agua y prioridades de asignación, operaciones de los embalses; generación de hidroelectricidad; seguimiento de la contaminación y calidad de las aguas; evaluaciones de vulnerabilidad; y requisitos de los ecosistemas. Un módulo de análisis financiero también permite que el usuario investigue comparaciones de costo-beneficio para los proyectos. (11)

El analista representa el sistema en términos de sus varias fuentes de agua (ejemplo: ríos, arroyos, agua subterránea, embalses, y plantas de desalinización); instalaciones de descarga, transmisión y tratamiento de agua; demandas del agua; generación de contaminantes; y requisitos de los ecosistemas. La estructura de datos y el nivel de detalle se pueden modificar fácilmente para satisfacer los requisitos y la disponibilidad de datos para un sistema y un análisis particulares.

Los usos de WEAP incluyen generalmente varios pasos.

- Definición del Estudio: Se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema, y la configuración del problema.
- Cuentas Actuales: Se desarrolla una caracterización de la demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema. Esto se puede ver como la etapa de calibración en el desarrollo de una aplicación.
- Escenarios: Se pueden explorar los impactos que tendría, un sistema de supuestos alternativos sobre las políticas futuras, costos, y del clima, por ejemplo, en la demanda del agua, oferta de agua, hidrología, y contaminación. (Las oportunidades para la generación de escenarios se presentan en la siguiente sección.)

- Evaluación: Los escenarios se evalúan con respecto a la disponibilidad de agua, los costos y los beneficios, compatibilidad con los objetivos ambientales, y la sensibilidad a la incertidumbre en las variables dominantes.

3.2. Aplicación del modelo

WEAP a través de su interfaz gráfico con SIG construye, ve y modifica la configuración. Los elementos pueden ser sobrepuestos en un mapa construido en Arcview y otros archivos estándares de SIG y gráficos.

Los datos para cualquier componente pueden ser corregidos directamente en el diagrama esquemático. El usuario puede consultar la característica de ayuda sensible al contexto en cualquier lugar dentro de WEAP. Con el sistema altamente flexible y comprensivo de información de resultados de WEAP, el usuario puede preparar informes tanto de salida gráfica o tabular y seleccionar de un número de posibles opciones de formato (ej., unidades métricas o inglesas, años, niveles absolutos, partes porcentuales, o tasas de crecimiento), también puede ver resultados sobre un mapa del esquema y usar barras de deslizamiento de animación para ver los cambios en los resultados a través del tiempo.

Las principales características de WEAP:

- Sistema de planificación integrado de los recursos hídricos
- Modelos incorporados para modelación de: escorrentía e infiltración por precipitación, evapotranspiración, requisitos y producciones de cosechas, interacciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas, y calidad del agua en ríos.
- Interfaz gráfica “drag and drop” basada en SIG.
- Capacidad para construir modelos con un número de funciones predefinidas.
- Ecuaciones y variables definidas por el usuario.
- Conexión dinámica con planillas de cálculo y otros modelos.
- Algoritmo de programación linear inserto que resuelve las ecuaciones de distribución de agua.

- Estructuras de datos flexible y expandible.
- Poderoso sistema de información de resultados incluyendo gráficos, tablas y mapas.
- Integra sin quiebres los procesos hidrológicos en la cuenca con el sistema de manejo de recursos hídricos.
- Puede recibir directamente información climática.
- Basado en una visión holística e integrada del manejo de los recursos de agua (integrated water resources management -IWRM) – oferta y demanda de agua.

Durante los 15 últimos años, WEAP ha sido aplicado en muchos proyectos en el mundo entero para la planificación integrada de recurso hídricos, incluyendo:

- África: las publicaciones de dirección del agua y desarrollo (con IWMI).
- Oriente Medio: el establecimiento de la alternativa de desarrollo y argumentos de asignación en un proceso que implica tanto participantes israelíes como palestinos.
- India y Nepal: la exploración del abastecimiento de agua y opciones de conservación en la región.
- California: los efectos de evaluación de clima cambian sobre los servicios de ecosistema.
- Mar de Aral: conducción de análisis comprensivo de cuentas de agua, y desarrollo de argumentos para explorar una gama completa de opciones y resultados.

3.3. Análisis y procesamiento de la información meteorológica

Para la aplicación del modelo de simulación hidrológica WEAP a la cuenca alta del río Guadalquivir, fue necesaria la recopilación de la información hidrometeorológica, proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

Si bien en la zona en estudio existe un gran número de estaciones, no se tomó en cuenta la información de todas ellas, ya que en existen estaciones con baja cantidad de período de registros. A continuación se muestran las estaciones utilizadas y su ubicación.

TABLA 3.1. Estaciones utilizadas en el proyecto

ESTACION	PREC.	TEMP.	VIENT.	HUM.	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION (msnm)	PERIODO DE REGISTRO
AEROPUERTO	X	X	X	X	21° 32' 48" S	64° 42' 39" W	1849	1962-2012
CANASMORO	X	X	X	X	21° 21' S	64° 45' W	2080	1973-2002
COIMATA	X	X	X	X	21° 29' 57" S	64° 47' 20" W	2027	1980-2012
EL MOLINO	X				21° 22' S	64° 57' W	3200	1982-2002
EL TEJAR	X	X	X	X	21° 32' 35" S	64° 43' 16" W	1859	1970-2011
LEON CANCHA	X				21° 10' 42" S	64° 42' 55" W	2729	1977-2010
RINCÓN DE LA VICTORIA	X				21° 32' S	64° 48' W	2200	1978-1987
SAN LORENZO	X				21° 25' S	64° 45' W	1900	1976-1992
SELLA QDAS.	X	X	X	X	21° 23' 11" S	64° 40' 52" W	2145	1991-2012
TOMATAS GRANDE	X				21° 18' S	64° 48' W	2150	1977-1985
TRANCAS	X	X			21° 18' 29" S	64° 48' 57" W	2198	1984-2012
TUCUMILLAS	X	X	X		21° 27' 40" S	64° 49' 52" W	2557	1978-2012

Fuente: SENAMHI, 2013.

TABLA 3.2. Coordenadas UTM de las estaciones utilizadas en el proyecto

COORDENADAS UTM DE LAS ESTACIONES

ESTACION	X	Y
AEROPUERTO	322823.918	7616347.092
CANASMORO	318523.583	7638076.724
COIMATA	314678.233	7621515.628
EL MOLINO	297800.682	7635987.323
EL TEJAR	321754.891	7616735.195
LEON CANCHA	321918.693	7657122.431
RINCÓN DE LA VICTORIA	313570.491	7617719.422
SAN LORENZO	318605.808	7630695.54
SELLA QDAS.	325712.048	7634125.856
TOMATAS GRANDE	313274.031	7643554.175
TRANCAS	311641.401	7642643.428
TUCUMILLAS	310253.767	7625678.565

Fuente: SENAMHI, 2013.

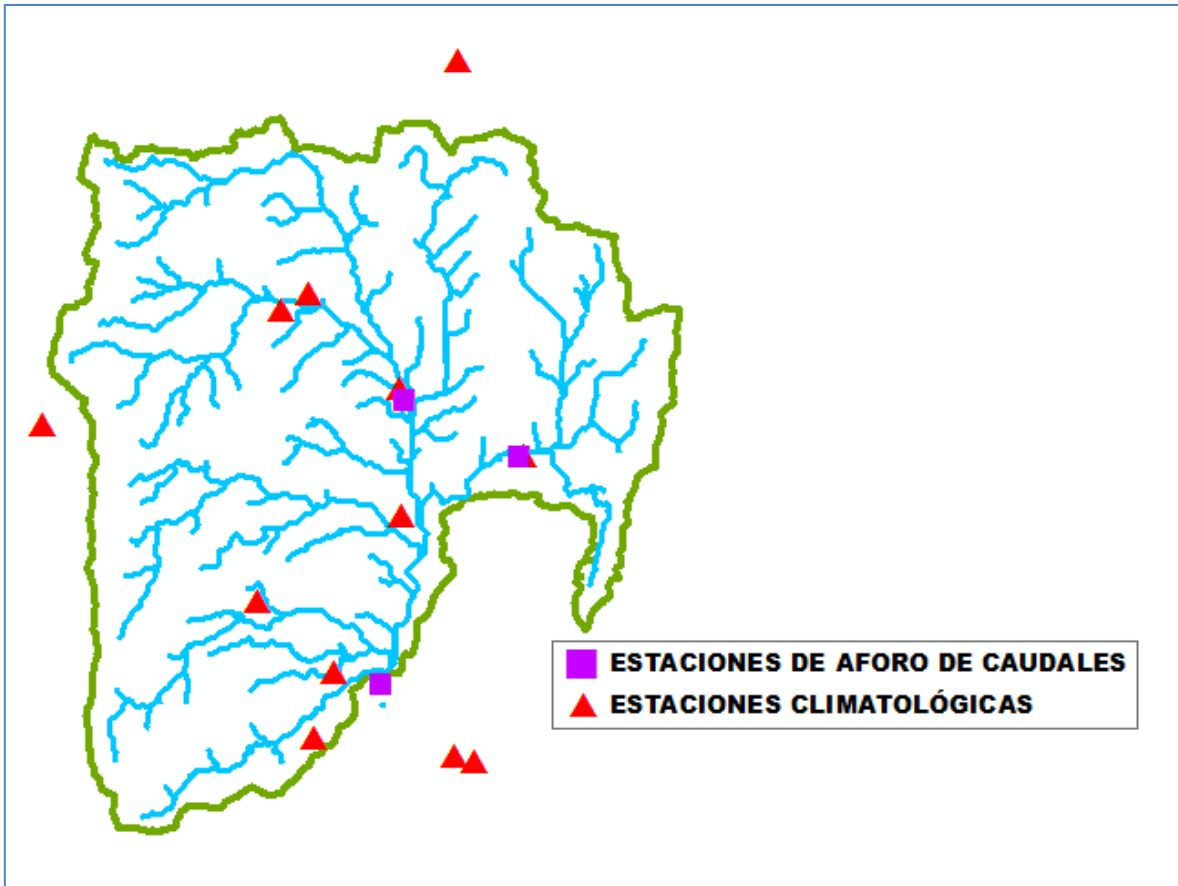


FIGURA 3.1. Ubicación de las estaciones utilizadas para la modelación WEAP

3.3.1. Análisis de Parámetros de Ingreso al modelo WEAP

3.3.1.1. Precipitación

Los datos obtenidos para la realización del presente proyecto se encuentran a nivel mensual y se consideran a partir de 1970, año a partir del cual se presentan registros en las distintas estaciones. Siendo las doce estaciones que me muestran en la Tabla 3.1, las que tienen un período de datos más completo y con mayor extensión de período de datos.

En la Figura 3.1 se puede observar que cuatro de las estaciones de precipitación se encuentra fuera de los límites de la cuenca, dichas estaciones son: León Cancha, El Molino, Aeropuerto y El Tejar. Se consideró para el presente proyecto algunas de estas estaciones debido a la baja disponibilidad de información en la partes altas de la cuenca (3000 – 4000

msnm), entonces con las estaciones León Cancha y El Molino, se logra tener una mejor representación de las características de la precipitación en las partes altas de las subcuencas Canasmoro y Sella, que luego se utilizarán como subcuencas de calibración para la aplicación del modelo WEAP a la cuenca Alta del río Guadalquivir. Mientras que se incorporó la estación Aeropuerto porque es una estación que cuenta con gran cantidad de registro de datos y con información de confiabilidad. Por otra parte se tomó en cuenta la estación de El Tejar, debido a la baja disponibilidad de datos de temperatura en la cuenca.

En la Tabla 3.3 se observa la distribución de estaciones que miden la precipitación de acuerdo al rango de alturas en el que se encuentra cada estación. Se verifica la baja disponibilidad de estaciones en la parte alta de la cuenca (3000 – 4500 msnm), pero resulta suficiente al constatar que la parte alta solo significa el 18% del total de la cuenca. Mientras que en la parte media de la cuenca (2000 – 3000 msnm) que representa el 77 % del área total de la cuenca se tienen 8 estaciones con suficientes áreas de influencia por estación. Entonces, se puede afirmar que existe una distribución uniforme de la estaciones en la cuenca.

TABLA 3.3. Área de influencia por estación en la cuenca según la altura

RANGO DE ALTURA	ÁREA			N° DE ESTACIONES DE PRECIPITACIÓN	ÁREA DE INFLUENCIA POR ESTACIÓN
	ABSOLUTA	PORCENTAJE DE LA CUENCA	PORCENTAJE ACUMMULADO		
msnm	Km2	%	%		km2
1900-2000	28.051	2.89	2.89	3	9.350
2000-2500	372.359	38.31	41.20	6	62.060
2500-3000	384.836	39.60	80.80	2	192.418
3000-3500	136.533	14.05	94.84	1	136.533
3500-4000	42.031	4.32	99.17	0	0
4000-4500	8.082	0.83	100.00	0	0
TOTAL	971.892				

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla 3.4 representa la disponibilidad de información de precipitación en las diferentes estaciones escogidas para la modelación WEAP de la cuenca Alta del río Guadalquivir. Se puede observar que el periodo continuo con mayor cantidad de datos de precipitación va desde 1987 hasta el año 2012.

TABLA 3.4. Representación de la disponibilidad de información existente

ESTACION	AÑO															
	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
AEROPUERTO																
CANASMORO																
COIMATA																
EL MOLINO																
EL TEJAR																
LEON CANCHA																
RINCÓN DE LA VICTORIA																
SAN LORENZO																
SELLA QDAS.																
TOMATAS GRANDE																
TRANCAS																
TUCUMILLAS																

TABLA 3.4. Continuación

ESTACION	AÑO															
	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
AEROPUERTO																
CANASMORO																
COIMATA																
EL MOLINO																
EL TEJAR																
LEON CANCHA																
RINCÓN DE LA VICTORIA																
SAN LORENZO																
SELLA QDAS.																
TOMATAS GRANDE																
TRANCAS																
TUCUMILLAS																

Fuente: SENAMHI

TABLA 3.4. Continuación

ESTACION	AÑO										
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
AEROPUERTO											
CANASMORO											
COIMATA											
EL MOLINO											
EL TEJAR											
LEON CANCHA											
RINCÓN DE LA VICTORIA											
SAN LORENZO											
SELLA QDAS.											
TOMATAS GRANDE											
TRANCAS											
TUCUMILLAS											



Mas del 75% de información a nivel mensual
Menos del 75% de información a nivel mensual

Fuente: SENAMHI, 2013.

3.3.1.1.1. Análisis de consistencia de la Precipitación

El hidrólogo o especialista que desea desarrollar un estudio hidrológico, debe buscar la información de la cuenca en estudio, en las instituciones encargadas de su recopilación, pero una vez que esta ha sido obtenida, una de las interrogantes que se debe hacer es: ¿Es confiable la información disponible?

La respuesta a esa pregunta, se obtiene realizando un análisis de consistencia de la información disponible, mediante criterios físicos y métodos estadísticos que permitan identificar, evaluar y eliminar los posibles errores sistemáticos que han podido ocurrir, sea por causas naturales u ocasionados por la intervención de la mano del hombre.

La no homogeneidad e inconsistencia, son los causales del cambio a que están expuestas las informaciones hidrológicas, por lo cual su estudio, es de mucha importancia para determinar los errores sistemáticos que puedan afectarlas.

El análisis de consistencia de la información, es el proceso que consiste en la identificación o detección, descripción y remoción de la no homogeneidad e inconsistencia de una serie de tiempo hidrológica.

Antes de utilizar la serie histórica para la modelación, es necesario efectuar el de consistencia respectivo, a fin de obtener una serie confiable, es decir, homogénea y consistente.

Para determinar la consistencia de la información para el presente proyecto, se realizó un análisis doble masa donde se escogió a la estación de AASANA (Aeropuerto) como estación Patrón, debido a que es la que tiene mayor registro de datos.

Luego de realizar el análisis mediante curvas de doble masa con cada estación escogida para la modelación (ANEXO), se concluye que las estaciones contienen datos consistentes, como se aprecia en los coeficientes de determinación de la Tabla 3.5.

TABLA 3.5. Valores del coeficiente de determinación obtenidas para el análisis de consistencia de la precipitación

ESTACIÓN	R²
CANASMORO	0,9994
COIMATA	0,9999
EL TEJAR	0,9994
SAN LORENZO	0,9992
SELLA QDAS	0,9995
TOMATAS GRANDE	0,9988
TRANCAS	0,9989
TUCUMILLAS	0,9951
EL MOLINO	0,9975
LEON CANCHA	0,9888
LA VICTORIA	0,9973

Fuente: Elaboración Propia

3.3.1.1.2. Relación entre elevación y precipitación

Con el propósito de aplicar correctamente el método de las bandas de elevación necesario para este modelo, es necesario realizar un análisis de la variación espacial de la precipitación en la cuenca (Tabla 3.6 y Figura 3.2).

TABLA 3.6. Precipitación media anual y altura de las estaciones

ESTACION	ALTURA (msnm)	PRECIPITACION MEDIA ANUAL
AEROPUERTO	1849	604.6
CANASMORO	2080	582.4
COIMATA	2027	737
EL MOLINO	3200	468.1
EL TEJAR	1859	628.8
LEON CANCHA	2729	541.9
RINCÓN DE LA VICTORIA	2200	1114.5
SAN LORENZO	1900	521.3
SELLA QDAS.	2145	621.5
TOMATAS GRANDE	2150	743.1
TRANCAS	2198	803.7
TUCUMILLAS	2557	816.1

Fuente: Elaboración Propia

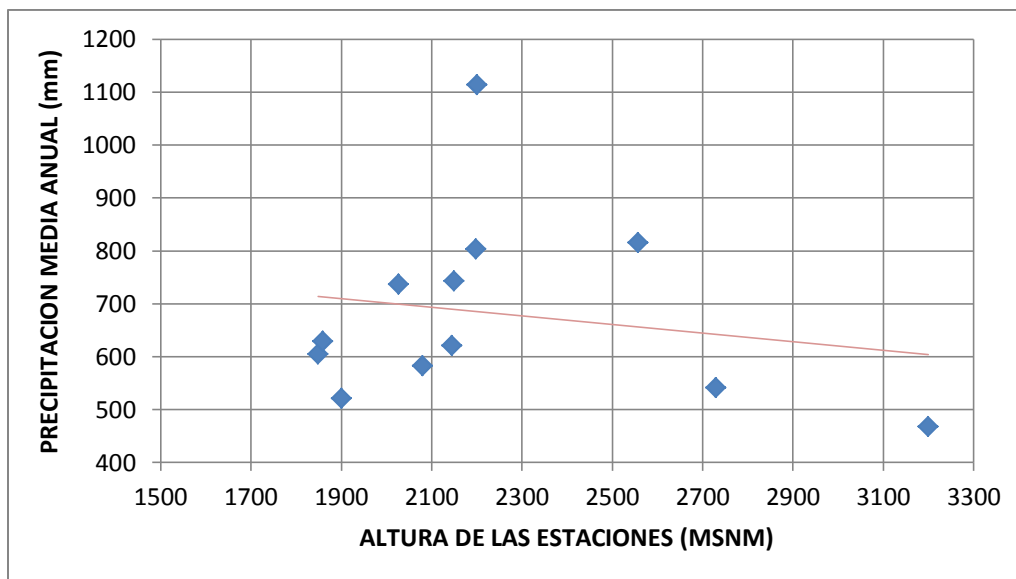


FIGURA 3.2. Variación espacial de precipitación en la cuenca Alta del río Guadalquivir

En la gráfica anterior se representa la variación espacial de la precipitación en la cuenca alta del río Guadalquivir, se puede observar que la precipitación en las estaciones ubicadas entre los 1800 y 2200 msnm varía entre los 500 mm anuales y los 800 mm anuales, a excepción de la estación ubicada en el Rincón de la Victoria que se ubica en los 2200 msnm y tiene una precipitación anual del orden de los 1114.5 mm. Mientras que en las estaciones localizadas sobre los 2500 msnm se tienen registros de precipitación media anual entre los valores de 460 y 800 mm.

Como no existe una distribución homogénea de las lluvias en la zona no fue posible definir una sola ecuación para toda la cuenca por lo que se ha especificado una ecuación diferente para cada banda de elevación.

3.3.1.1.3. Régimen de Precipitación

Se realizó el estudio de modalidad en la cuenca utilizando el promedio mensual de la precipitación en las diferentes estaciones, con el fin de diferenciar los regímenes de precipitación en la cuenca, necesarios para la modelación por WEAP.

A continuación se analizan las distribuciones de las precipitaciones registrados en las distintas estaciones:

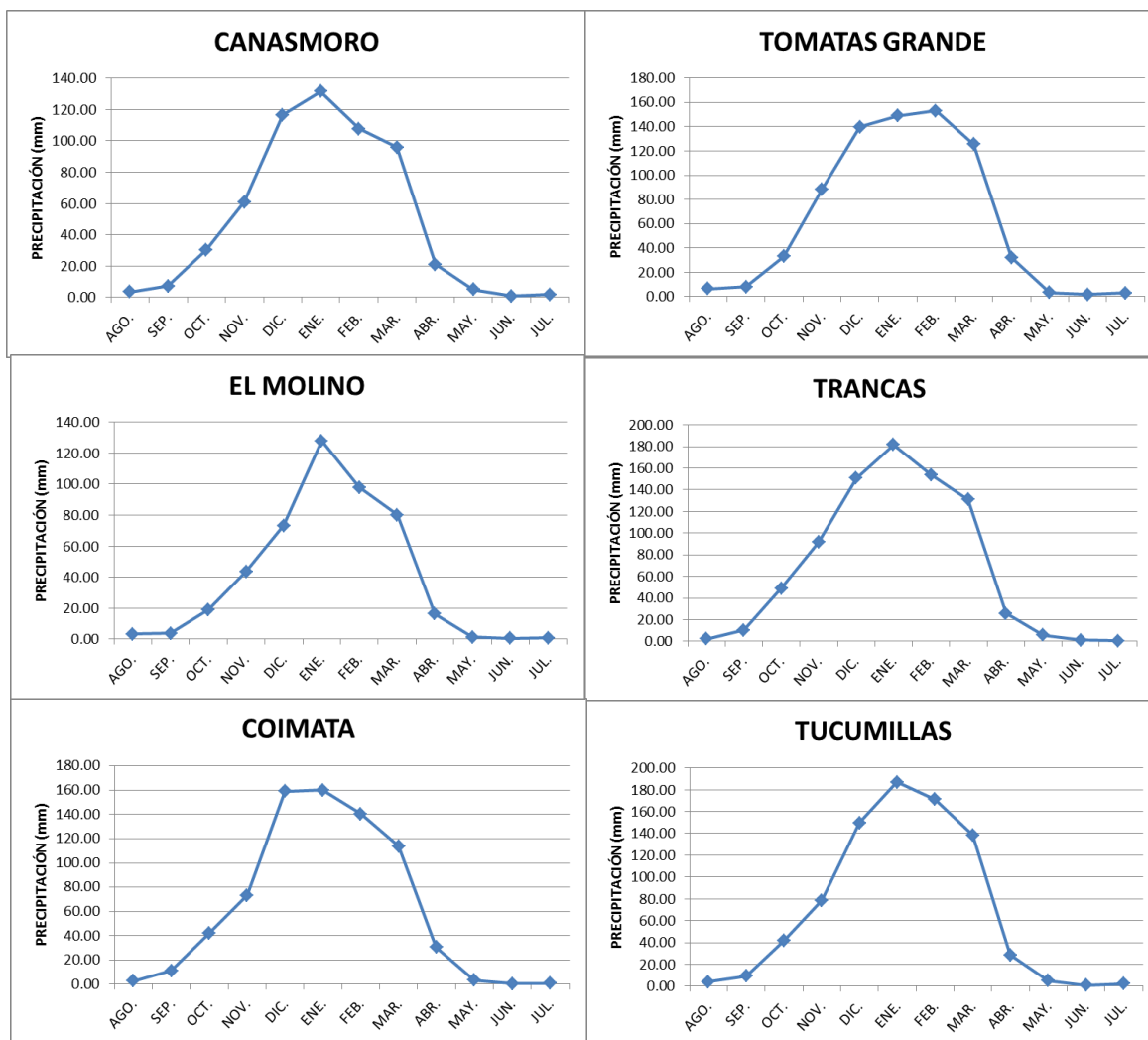


FIGURA 3.3. Regímenes de precipitación en la cuenca

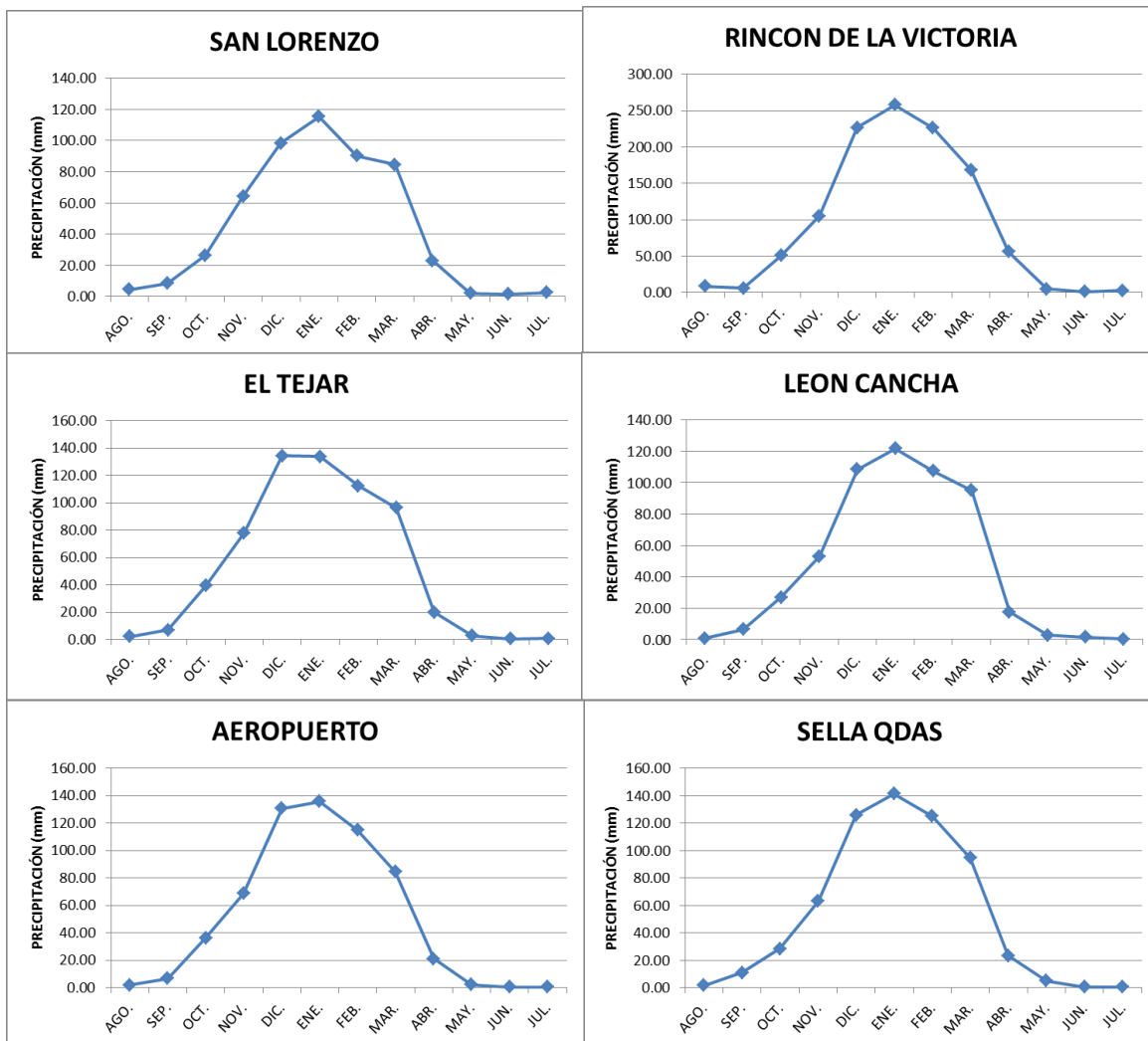


FIGURA 3.3. Continuación

Los resultados demostraron que la cuenca está gobernada por un régimen uni-modal.

3.3.1.1.4. Zonificación Pluviométrica

Se realizó un estudio para determinar si las estaciones pertenecían a una sola zona pluviométrica o no. Lo primero que se hace es analizar si los valores de la media son aproximados o no para hacer una clasificación somera para luego demostrarlo numéricamente. Para este caso la variación de las medias son considerables por lo que se

puede decir que no todas las estaciones pluviométricas pertenecen a una misma zona pluviométrica.

En la cuenca se identificaron tres zonas pluviométricas “A, B y C” (ver ANEXO), las zonas pluviométricas están constituidas por diferentes estaciones como se muestra en la Tabla 3.7.

TABLA 3.7. Distribución de las estaciones en Zonas pluviométricas

ESTACIÓN	ZONA PLUVIOMÉTRICA
TOMATAS GRANDE	A
EL MOLINO	
LEON CANCHA	
CANASMORO	
SAN LORENZO	
TRANCAS	
COIMATA	
RINCON DE LA VICTORIA	C
TUCUMILLAS	
SELLA QDAS	B
EL TEJAR	
AEROPUERTO	

3.3.1.1.5. Determinación de las zonas Homogéneas de Precipitación en la cuenca

El modelo WEAP requiere información meteorológica como precipitación, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa, pero calculada de una manera diferente, homogenizando zonas para determinar precipitación y temperatura en toda la subcuenca.

La cuenca en estudio, cuenca Alta del Río Guadalquivir hasta el punto de aforo en Obrajes, se ha subdividido en tres zonas homogéneas de precipitación, justificadas con los estudios realizados en secciones anteriores.

A continuación se muestra la configuración de las subcuencas y las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de cada una de ellas.



FIGURA 3.4. Subdivisión de la cuenca en estudio en zonas homogéneas de precipitación

Para la determinación de las zonas homogéneas de precipitación se realizó bandas de elevación en cada subcuenca con sus respectivas estaciones meteorológicas, cada una de ellas con series de tiempos mensuales, obteniendo ecuaciones lineales de elevación precipitación donde $P1Z$ = precipitación media anual y Z = elevación de la estación.

Si la subcuenca no contiene ninguna estación es posible obtener la ecuación de estaciones cercanas localizadas dentro de la cuenca o fuera de ella.

Con las ecuaciones de cada subcuenca se determina una precipitación media anual homogénea a una altura ubicada en el punto medio de la misma.

TABLA 3.8. Precipitación promedio anual para cada subcuenca

SUBCUENCA	ESTACIÓN	ELEVACIÓN	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL	ECUACIÓN	ELEVACIÓN DEL PUNTO MEDIO DE LA SUBCUENCA	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL DE LA SUBCUENCA
		msnm	mm		msnm	mm
SUBCUENCA 1	EL MOLINO	3200	468,1	$P_{IZ} = 900.67 - 0.1201 * Z$	2460	605,22
	CANASMORO	2080	582,4			
	TOMATAS GRANDE	2150	743,1			
	SAN LORENZO	1900	521,3			
	TRANCAS	2198	803,7			
SUBCUENCA 2	SELLA QDAS.	2145	621,5	$P_{IZ} = 689.54 - 0.0505 * Z$	2500	563,29
	LEON CANCHA	2729	541,9			
	EL TEJAR	1859	628,8			
	AEROPUERTO	1849	604,6			
	SAN LORENZO	1900	521,3			
SUBCUENCA 3	COIMATA	2027	737	$P_{IZ} = 0.0016 * Z + 885.58$	3135	890,60
	RINCON DE LA VICTORIA	2200	1114,5			
	TUCUMILLAS	2557	816,1			

En base a la cantidad de información y la proximidad al centroide de la subcuenca, se escogen las estaciones: Trancas, Sella Qdas y Tucumillas, como estaciones base para sus respectivas subcuencas.

Conociendo la precipitación media anual de la estación base y del catchment con las bandas de elevación se desarrolla una proporción para ajustar los datos de precipitación mensual de la estación base a los datos del catchment.

$$P_c = P_e * \frac{P_{IZc}}{P_{IZe}}$$

P_c : Precipitación mensual del catchment

P_e : Precipitación mensual de la estación

P_{IZc} : Precipitación promedio anual del catchment estimada con las ecuaciones

P_{IZe} : precipitación promedio anual de la estación estimada con datos de la estación

Para WEAP un catchment no es sino la representación de la subcuenca que se desea calibrar o modelar mediante un punto, es por eso que se ubica en el punto medio o

centroide y los datos son referentes a toda la subcuenca. Es decir que se estima la precipitación o temperatura media anual para cada catchment.

3.3.1.2. Temperatura

Los datos de temperatura disponibles se encuentran a nivel mensual, en la cuenca existen 7 estaciones con datos de este parámetro, los cuales se detallan a continuación. Se observa que el período con mayor cantidad de datos de este parámetro es el 2000-2012.

TABLA 3.9. Disponibilidad de información de temperatura

ESTACION	AÑO															
	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
AEROPUERTO																
CANASMORO																
COIMATA																
EL TEJAR																
SELLA QDAS.																
TRANCAS																
TUCUMILLAS																

TABLA 3.9. Continuación

ESTACION	AÑO															
	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
AEROPUERTO																
CANASMORO																
COIMATA																
EL TEJAR																
SELLA QDAS.																
TRANCAS																
TUCUMILLAS																

TABLA 3.9. Continuación

ESTACION	AÑO										
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
AEROPUERTO											
CANASMORO											
COIMATA											
EL TEJAR											
SELLA QDAS.											
TRANCAS											
TUCUMILLAS											

Fuente: SENAMHI, 2013.



Mas del 75% de información a nivel mensual
Menos del 75% de información a nivel mensual

Es necesario realizar un análisis de espacial de la variación de la temperatura para aplicar en el método de las bandas de elevación.

TABLA 3.10. Valores de temperatura media anual y altura de las estaciones

ESTACION	ALTURA (msnm)	TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)
AEROPUERTO	1849	17.8
CANASMORO	2080	16.9
COIMATA	2027	16.9
EL TEJAR	1859	18
SELLA QDAS.	2145	17.4
TRANCAS	2198	17.9
TUCUMILLAS	2557	14.2

Fuente: Elaboración propia

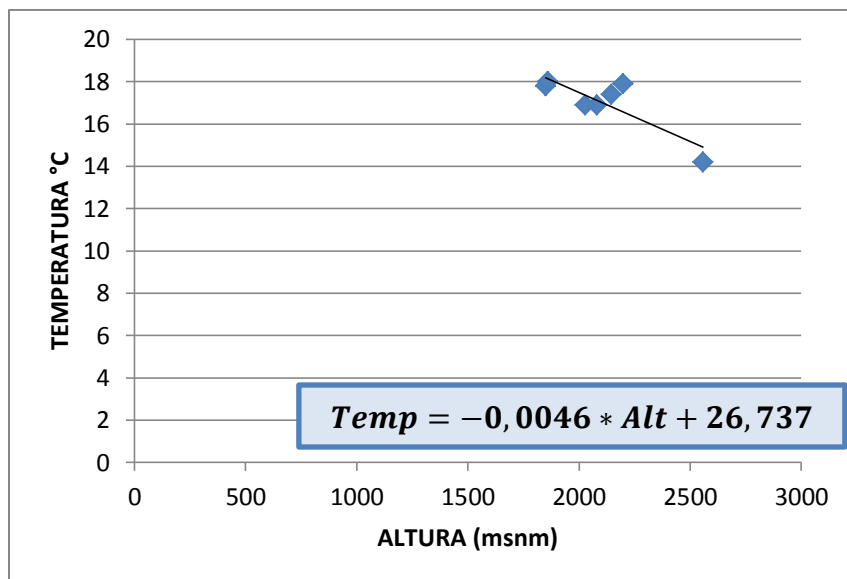


FIGURA 3.5. Variación espacial de la temperatura en la cuenca Alta del río Guadalquivir

En la gráfica se aprecia como la temperatura va decreciendo conforme va aumentando la altura a la cual está ubicada la estación. A fin de comprobar la aplicabilidad de la ecuación obtenida, a continuación se compara dicha ecuación con estudios anteriores realizados en la cuenca.

Según el Plan Departamental de Riego Tarija, 2001, que se basa en el estudio realizado por ORSTOM/UNESCO/SENAMHI, la temperatura en la cuenca Alta del río Guadalquivir disminuye en 0,46 °C / 100 m de altura. Se verifica que en el presente trabajo se obtiene el mismo gradiente de temperatura que el expuesto en dicho documento. (12)

También se comparó la ecuación obtenida con la ecuación propuesta por la consultora “CITER” en su estudio “Programa de Aprovechamiento de los Recursos Hídricos del Departamento de Tarija”, en la que se observa que la ecuación propuesta por dicha consultora se asemeja a la ecuación propuesta en este documento. (13)

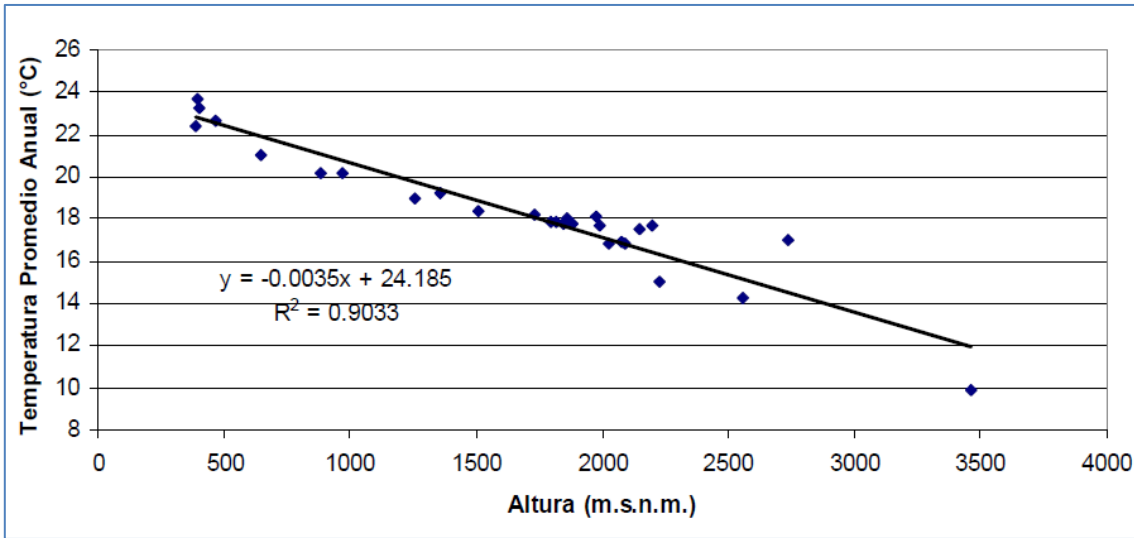


FIGURA 3.6. Tendencia General de la Temperatura con la altura para el Departamento de Tarija

Al comparar la ecuación obtenida en el presente documento con las propuestas en diferentes estudios, se verifica su validez, por lo tanto se decidió aplicar la fórmula de la variación espacial de la temperatura con seguridad de su aplicabilidad.

3.3.1.2.1. Zonas Homogéneas de Temperatura

Ante la baja disponibilidad de datos de temperatura a diferentes alturas, no se logró subdividir la cuenca en diferentes zonas homogéneas de temperatura, por lo que consideramos una sola ecuación que prevalecerá sobre el total de la cuenca.

TABLA 3.11. Temperatura promedio anual de la cuenca

ECUACIÓN	ELEVACIÓN DEL PUNTO MEDIO	TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE LA CUENCA
$T1Z = -0.0046 * Z + 26.737$	2299	16,16

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.3. Humedad Relativa

La información de humedad relativa disponible en la cuenca está brindada por cinco estaciones, siendo el período de mayor disponibilidad de datos el 1999-2012.

TABLA 3.12. Disponibilidad de información de humedad relativa



ESTACION	AÑO															
	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
AEROPUERTO																
CANASMORO																
COIMATA																
EL TEJAR																
SELLA QDAS.																

TABLA 3.12. Continuación

ESTACION	AÑO															
	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
AEROPUERTO																
CANASMORO																
COIMATA																
EL TEJAR																
SELLA QDAS.																

TABLA 3.12. Continuación

ESTACION	AÑO										
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
AEROPUERTO											
CANASMORO											
COIMATA											
EL TEJAR											
SELLA QDAS.											

 Mas del 75% de información a nivel mensual
 Menos del 75% de información a nivel mensual

Fuente: SENAMHI, 2013.

3.3.1.4. Velocidad del viento

La información de este parámetro es brindada por seis estaciones de las cuales el período con mayor cantidad de registros es el 1999-2012.

TABLA 3.13. Disponibilidad de información de velocidad del viento



ESTACION	AÑO															
	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
AEROPUERTO																
CANASMORO																
COIMATA																
EL TEJAR																
SELLA QDAS.																
TUCUMILLAS																

TABLA 3.13. Continuación

ESTACION	AÑO															
	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
AEROPUERTO																
CANASMORO																
COIMATA																
EL TEJAR																
SELLA QDAS.																
TUCUMILLAS																

TABLA 3.13. Continuación

ESTACION	AÑO											
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
AEROPUERTO												
CANASMORO												
COIMATA												
EL TEJAR												
SELLA QDAS.												
TUCUMILLAS												

 Mas del 75% de información a nivel mensual
 Menos del 75% de información a nivel mensual

Fuente: SENAMHI, 2013.

3.3.1.5. Caudales

La información de caudales para el presente proyecto esta proporcionada por tres estaciones, dos se encuentran ubicadas en la parte alta de la cuenca (Canasmoro y Sella Qdas), mientras que la estación de Obrajes se encuentra en la desembocadura de la cuenca en estudio. También se cuenta con la estación de Trancas en la parte alta de la cuenca, pero al no tener una buena serie histórica de caudales, no se la tomó en cuenta para el proyecto.

TABLA 3.14. Disponibilidad de información de caudales

ESTACION	AÑO															
	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
CANASMORO																
OBRAJES																
SELLA QDAS.																
TRANCAS																

Fuente: SENAMHI

	Mas del 75% de información a nivel mensual
	Menos del 75% de información a nivel mensual

TABLA 3.14. Continuación

ESTACION	AÑO															
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
CANASMORO																
OBRAJES																
SELLA QDAS.																
TRANCAS																

Fuente: SENAMHI, 2013.

Como se puede observar la disponibilidad de información de caudales es muy pobre, razón por la cual se deberá limitar los periodos de tiempo para la modelación de la cuenca Alta del río Guadalquivir tanto en la etapa de calibración como de verificación para los periodos más continuos y con mayor cantidad de información.

3.4. Métodos de simulación de subcuencas

Al momento de determinar los catchments o sitios de captación, explicados anteriormente, hay tres opciones de métodos para la simulación de los procesos de cada catchment, como son la evapotranspiración, escurrimiento, infiltración y demandas de riego.

Los tres métodos para WEAP son:

1. Precipitación – Escurrimiento
2. Solo demandas de riego, versiones de la Propuesta de Requerimientos de cultivo de la FAO
3. Modelo de la humedad del suelo

La elección del método depende del grado de complejidad deseado para representar los procesos del catchment y la disponibilidad de información. (14)

Método de solo demandas de riego (FAO)

Es el método más simple, usa los coeficientes de cultivo para calcular la evapotranspiración potencial en el catchment, luego determina alguna demanda de riego que puede ser requerida para rellenar la porción de evapotranspiración necesaria, ya que la precipitación no se conoce. No simula procesos de escurrimiento o infiltración.

Método de precipitación – escurrimiento (FAO)

También determina evapotranspiración para cultivos irrigados y precipitados usando los coeficientes de cultivo. El resto de la precipitación no consumida por la evapotranspiración es simulada como escurrimiento hacia el río, o puede ser repartida en escurrimiento hacia el río y caudal hacia agua superficial usando vínculos de catchments.

Método precipitación – escurrimiento (Modelo de Humedad del Suelo)

Es el más complejo de los tres métodos, representando cada catchment con dos capas de suelo, como puede ser la acumulación de nieve. En la primera capa de suelo, se simula la evapotranspiración, considerando precipitación y riego en tierras cultivadas y no cultivadas, escurrimiento caudales poco profundos (shallow interflow), y cambios en la humedad del

suelo. El caudal base hacia el río y los cambios de humedad del suelo son simulados en la capa de suelo más profunda. Correspondientemente, el método de humedad del suelo requiere parámetros más extensos de suelo y clima para simular los procesos.

Se debe notar que la percolación más profunda dentro del catchment puede ser transmitida directamente al nudo de agua superficial creando un vínculo de escurrimiento/infiltración caudal desde el catchment al nudo de agua superficial. El método se vuelve esencialmente una combinación de una capa de humedad del suelo si se realiza este vínculo.

Para la modelación de la Cuenca Alta del río Guadalquivir se escogió el tercer método, modelo de humedad del suelo, a continuación se presentan de los parámetros requeridos:

TABLA 3.15. Parámetros de uso de suelo del método de humedad de suelo

USO DE SUELO	
ÁREA	Área de tierra para el tipo de cobertura vegetal dentro del catchment.
Kc	Coefficiente de cultivo, relativo al cultivo referencial, para un tipo de tierra.
Capacidad de agua en la zona de raíces (Sw)	Agua efectiva manteniendo la capacidad de la capa profunda del suelo. Es un valor singular para el catchment y no varía según el tipo de uso. Es ignorado si el sitio de demanda tiene un vínculo de caudal de retorno hacia un nudo de agua subterránea. (mm)
Capacidad de agua profunda (Dw)	Agua efectiva manteniendo la capacidad de la capa profunda del suelo. Es un valor singular para el catchment y no varía según el tipo de uso. Es ignorado si el sitio de demanda tiene un vínculo de caudal de retorno hacia un nudo de agua subterránea. (mm)
Conductividad profunda (Kd)	La tasa de conductividad (longitud/tiempo) de la capa profunda saturada (cuando hay un almacenaje relativo, $z2=1$) que controla la transmisión del caudal base. Es un valor singular para el catchment y no varía según el tipo de uso. El caudal base se incrementará si este parámetro incrementa.
Índice de área foliar (LAI)	Usado para controlar la respuesta del escurrimiento superficial. El escurrimiento tenderá a decrecer con altos valores de este índice. Este parámetro puede variar según el tipo de uso. (rango de 0.1 a 10)
Conductividad en la zona de la raíz (Ks)	Tasa de conductividad en la zona de la raíz a la saturación (cuando hay un almacenaje relativo $z1=1$), que será repartida, acordando con la dirección de flujo preferente, entre caudal poco profundo y caudal hacia la capa profunda de suelo. Esta tasa puede variar entre los tipos de uso.
Dirección preferente de flujo (Pfd)	Usado para repartir el caudal fuera de la capa de la zona de la raíz entre caudal poco profundo y caudal hacia la capa profunda de suelo o agua subterránea. Este valor puede variar entre los tipos de uso. 1 = horizontal, y 0 = vertical
Z1 inicial	El valor de Z1 inicial al comienzo de la simulación. Es el almacenaje relativo dado como porcentaje del almacenaje total efectivo de la capacidad de agua en la zona de la raíz.
Z2 inicial	El valor de Z2 inicial al comienzo de la simulación. Es el almacenaje relativo dado como porcentaje del almacenaje total efectivo de la capacidad de agua profunda. Este parámetro es ignorado si el sitio de la demanda tiene un vínculo de escurrimiento/infiltración al nudo de agua subterránea. Esta tasa no puede variar entre los tipos de uso.

Fuente: Guía de usuario para WEAP, 2005.

Para un mejor entendimiento se muestra el modelo de los dos cubos usado por WEAP.

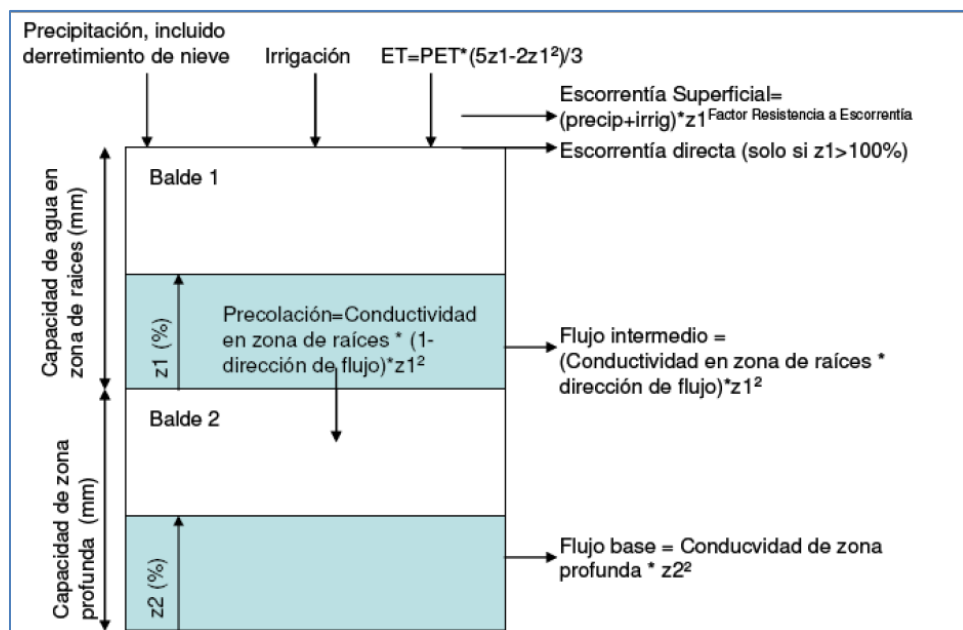


FIGURA 3.7. Diagrama conceptual y ecuaciones incorporadas al modelo de los dos baldes

TABLA 3.16. Parámetros climáticos y de irrigación del método de humedad de suelo

CLIMA	
Precipitación	Series de precipitación mensual, que pueden ser leídas de un archivo o ingresadas manualmente.
Temperatura	La temperatura media de los valores máximos y mínimos a nivel mensual.
Humedad relativa	Promedio mensual de la humedad relativa.
Viento	Promedio mensual de la velocidad del viento.
Punto de fusión	Agua líquida al comienzo de la acumulación de nieve.
Punto de congelación	Agua sólida al comienzo de la acumulación de nieve.
Latitud	Latitud en grados.
Nieve inicial	Valor inicial para acumulación de nieve en el comienzo del primer mes de simulación.
IRRIGACIÓN	
Si se indica que la irrigación ocurre en el catchment al momento de crearlo esquemáticamente, la etiqueta de irrigación aparecerá debajo del catchment en la vista de datos. Las demás variables relacionadas con irrigación se requerirán si el método de humedad del suelo es escogido.	
Área irrigada	El porcentaje de área irrigada
Límite inferior	Regar cuando la humedad del suelo desciende por debajo del nivel necesario
Límite superior	Dejar de regar cuando la humedad del suelo alcanza este nivel por ciento

Fuente: Guía de usuario para WEAP, 2005.

3.5. Demanda

Para WEAP el análisis de la demanda es un enfoque basado en el uso final desagregado para modelar los requerimientos del consumo de agua en un área. Usando WEAP se puede aplicar información económica, demográfica y uso de agua para construir escenarios alternativos que examinen como el consumo de agua total o desagregado se desarrolla en los sectores de la economía. Además el análisis de la demanda es también el punto de inicio para conducir análisis integrados de planes de agua, desde que todos los cálculos de suministro y recurso son manejados por los niveles de demanda final calculada en el análisis de demanda.

WEAP provee flexibilidad para estructurar los datos, típicamente una estructura consistirá de sectores incluyendo casas, industria y agricultura, cada de las cuales podría ser subsectores, usos finales y dispositivos de suministro de agua.

Se puede adaptar la estructura de los datos a los propósitos requeridos, basado en la disponibilidad de información, el tipo de análisis que se desea realizar, y las preferencias del usuario.

En cada caso, los cálculos de demanda están basados en una contabilidad desagregada para varias medidas de actividad social y económica (el número de casas, hectáreas de agricultura irrigada, el valor añadido industrial y comercial, etc.). En los casos más simples, estos niveles de actividad son multiplicados por las tarifas de empleo de agua de cada actividad (el empleo de agua por unidad de actividad). Cada nivel de actividad y la tarifa de empleo de agua individualmente pueden ser proyectados en el futuro usando una variedad de técnicas, en los límites de la aplicación de índices de crecimiento simples exponenciales y funciones de interpolación, a la utilización de las técnicas de modelación sofisticadas que aprovechan las capacidades diseñadas en WEAP.

Mayores enfoques avanzados pueden incorporar procesos hidrológicos para determinar la demanda (p.ej. cálculos de evapotranspiración de cultivos para determinar requerimientos de irrigación).

Existen tres métodos para el cálculo de la demanda:

1. Método estándar de uso de agua
2. Propuesta de requerimientos de cosecha de la FAO
3. Método directo

Método Estándar de Uso de Agua

En el caso más simple, el usuario determina un nivel apropiado para cada nivel desagregado y lo multiplica por una tasa de crecimiento anual apropiada de cada actividad. Para el crecimiento se aplica una variación mensual.

Propuesta de Requerimientos de Cosecha de la FAO

Es típicamente usado para representar los nudos de demanda de agricultura, la propuesta asume para cada sitio de demanda un set de procesos agro-hidrológicos e hidrológicos simplificados como precipitación, evapotranspiración y crecimiento del cultivo, enfatizando la irrigación y la agricultura precipitada. Obviamente cultivos no agrícolas no pueden ser tan bien incluidos. Estos procesos son usados para determinar los requerimientos de irrigación para cada sitio de demanda, algunas de las suposiciones básicas son:

- El balance hídrico es calculado en una base mensual.
- La escasez de agua es dividida igualmente sobre las clases de tierra irrigadas.
- Factores de cosecha especificados por mes.
- Factor de respuesta de producción constante para el período de cultivo entero.

Este método se puede usar para determinar directamente las contribuciones de escurrimiento hacia ríos y provisiones de agua subterránea.

Método Directo

Las demandas pueden ser leídas directamente en WEAP de un archivo o ingresadas las tasas mensuales de uso de agua.

El esquema de la información de WEAP es el siguiente:

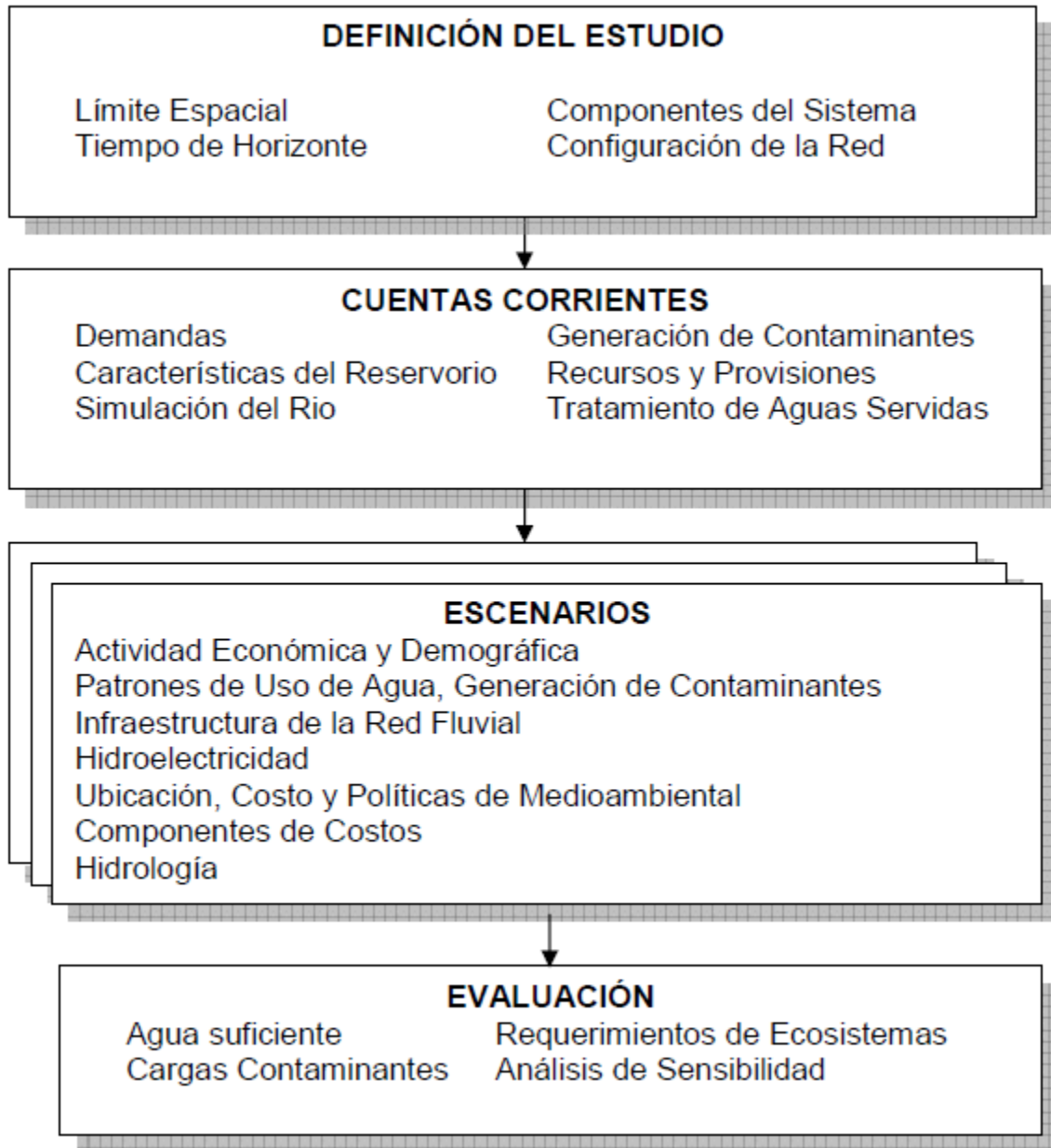


FIGURA 3.8. Esquema de funcionamiento del programa WEAP

Para el presente proyecto se utilizó el método directo para la demanda y se ingresaron los usos de agua en la cuenca en estudio, divididos en dos grupos: los sistemas de riego y las demandas poblaciones.

Se obtuvo la información de los sistemas de riego del Inventario de Sistemas de Riego del departamento de Tarija (ver ANEXO), de donde se seleccionaron los sistemas ubicados en el área de interés, quedando resumidos en la Tabla 3.17.

TABLA 3.17. Sistemas de riego en la cuenca Alta del río Guadalquivir

Nombre del Sistema	Municipio	Provincia	Sub Cuenca	Coordenadas UTM		N° de Usuarios
				X	Y	
Chamata	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	309253	7641975	10
Angosto (Tomatas Grande -centro Sud)	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	314241	7642650	50
Comunario	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	315366	7641757	60
Carachimayu	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	321119	7639184	80
Carachimayu	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	321179	7638749	100
Canasmoro/vertiente Galeria	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	318381	7639372	27
Calama (canales norte,central , sur)	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	310246	7632542	133
Bordo El Mollar-río Calama	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	318647	7630022	50
Bordo El Mollar	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	318062	7630277	50
Coimata	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	312842	7622371	40
Corana Norte (4)	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	315906	7643475	7
Corana Sud	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	317301	7641510	37
Corana Sud (angosto Escuela)	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	316828	7641817	26
El Rancho -galeria 1	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	319680	7629846	40
Erquis Norte	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	311222	7624861	80
Erquis Oropeza	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	312662	7625521	38
Erquis Sud	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	312692	7624741	80
Jurina	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	311700	7630063	25
La Peña (San Lorenzo)	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	319398	7632092	35
La Hechicera (San Lorenzo)	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	319218	7631387	35
La Victoria (Rincon)	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	309631	7616670	40
La Victoria (Río Chico)	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	311612	7618230	200
Lajas - Molino	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	319173	7633637	17
Rancho Norte	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	319893	7628507	38
Rancho Sud	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	319713	7627502	64
Rancho-galeria 2	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	319878	7629092	36
San Lorenzo (Barrio San Pedro)	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	319371	7631751	300
San Lorenzo (Río Chico)	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	318377	7631342	65
San Mateo - 2 Guadalquivir	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	319383	7625941	20
San Mateo -1 Guadalquivir	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	319068	7625506	80
Santa Barbara (Tucumilla)	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	314159	7629138	23
Sella Mendez - Rumi Orko	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	325717	7634646	18
Sella Mendez (Borde Centro)	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	324629	7634541	15
Sella Mendez (El Manzano)	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	324937	7634586	30
Sella Mendez (El Molino)	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	324382	7634444	5
Sella Mendez (El Nucleo)	SAN LORENZO	MéndeZ	Guadalquivir	325237	7634601	60

Tajo 1	SAN LORENZO	Méndez	Guadalquivir	312962	7631567	88
Tarija Cancha Norte	SAN LORENZO	Méndez	Guadalquivir	316172	7631867	60
Tarija Cancha Sud	SAN LORENZO	Méndez	Guadalquivir	317342	7630967	50
Tomatitas - Erquis	SAN LORENZO	Méndez	Guadalquivir	316292	7624201	60
Tomatitas (Bosquecillo)	SAN LORENZO	Méndez	Guadalquivir	316532	7622431	32
Tomatitas -Guadalquivir	SAN LORENZO	Méndez	Guadalquivir	318002	7623091	20
Trancas (Anachuri)	SAN LORENZO	Méndez	Guadalquivir	310543	7643310	6
Chaupicancha	TARIJA	Cercado	Guadalquivir	329239	7639533	15
Guerrahuayco Bajo	TARIJA	Cercado	Guadalquivir	313134	7630634	100
Obrajes Izquierdo	TARIJA	Cercado	Guadalquivir	317687	7621516	30
San Mateo 3 - Guadalquivir	TARIJA	Cercado	Guadalquivir	318692	7625026	16
San Mateo 4 - Guadalquivir	TARIJA	Cercado	Guadalquivir	318467	7624576	15
San Mateo-galeria	TARIJA	Cercado	Guadalquivir	321348	7627937	44
San Mateo-Sella	TARIJA	Cercado	Guadalquivir	320298	7626601	38
Sella	TARIJA	Cercado	Guadalquivir	327682	7634714	3
Sella - Calderas	TARIJA	Cercado	Guadalquivir	330099	7638847	7
Sella Cirminuelas A	TARIJA	Cercado	Guadalquivir	330229	7644754	10
Sella Quebrada I	TARIJA	Cercado	Guadalquivir	328537	7635134	2
Sella-Candelaria B	TARIJA	Cercado	Guadalquivir	329003	7635846	20
Sella Mendez (La Torre)	SAN LORENZO	Méndez	Guadalquivir	323913	7634147	65
Tucumilla	SAN LORENZO	Méndez	Guadalquivir	309841	7626391	15
Sella Cercado	TARIJA	Cercado	Guadalquivir	325920	7634309	25
Sella Chaupicancha	TARIJA	Cercado	Guadalquivir	328144	7638123	10
Grande (Murillo) Margen Izquierdo	SAN LORENZO	Méndez	Guadalquivir	312373	7643160	42
Lajas - Picacho	SAN LORENZO	Méndez	Guadalquivir	318921	7634016	6
Molino (Tomatas Grande Norte)	SAN LORENZO	Méndez	Guadalquivir	313070	7642665	15
Trancas	SAN LORENZO	Méndez	Guadalquivir	309643	7643257	20
Trancas Arriba	SAN LORENZO	Méndez	Guadalquivir	309328	7643948	5

Fuente: Plan Departamental De Riego, 2001.

TABLA 3.18. Sistemas de riego en la cuenca Alta del rio Guadalquivir para WEAP

Nº	ESTACION	SISTEMA	AREA REGADA (Ha)	CAUDAL EN TOMA (l/s)	CAUDAL (m3/mes)	m3/Ha
1	INVIERNO	CHAMATA	35	35	90720	15552
	VERANO	CHAMATA_2	60	120	311040	31104
2	INVIERNO	ANGOSTO	21	18	46656	13330
	VERANO	ANGOSTO_2	40	30	77760	11664
3	INVIERNO	COMUNARIO	38	30	77760	12278
	VERANO	COMUNARIO_2	86	80	207360	14467
4	INVIERNO	CARACHIMAYU_1	30	35	90720	18144
	VERANO	CARACHIMAYU_1_2	90	90	233280	15552
5	INVIERNO	CARACHIMAYU_2_1	5	5	12960	15552
	VERANO	CARACHIMAYU_2_2	220	80	207360	5655
6	INVIERNO	CANASMORO_VERT	24	18	46656	11664
	VERANO	CANASMORO_VERT_2	50	50	129600	15552
7	INVIERNO	CALAMA_CANALES	77	51	132192	10301
	VERANO	CALAMA_CANALES_2	260	190	492480	11365
8	INVIERNO	BORDO EL MOLLAR_RIO CALAMA	42	21	54432	7776
	VERANO	BORDO EL MOLLAR_RIO CALAMA_2	70	60	155520	13330
9	INVIERNO	BORDO EL MOLLAR	40	32	82944	12442
	VERANO	BORDO EL MOLLAR_2	70	70	181440	15552
10	INVIERNO	COIMATA	60	19	49248	4925
	VERANO	COIMATA_2	220	120	311040	8483
11	INVIERNO	CORANA NORTE	3,85	6	15552	24237
	VERANO	CORANA NORTE_2	3,85	16	41472	64632
12	INVIERNO	CORANA SUD	28,5	27	69984	14733
	VERANO	CORANA SUD_2	47	47	121824	15552
13	INVIERNO	CORANA SUD_ANGOSTO	25	25	64800	15552
	VERANO	CORANA SUD_ANGOSTO_2	45	50	129600	17280
14	INVIERNO	EL RANCHO_GAL1	62	27	69984	6773
	VERANO	EL RANCHO_GAL1_2	120	90	233280	11664
15	INVIERNO	ERQUIS NORTE	40	70	181440	27216
	VERANO	ERQUIS NORTE_2	320	100	259200	4860
16	INVIERNO	ERQUIS OROPEZA	25	70	181440	43546

	VERANO	ERQUIS OROPEZA_2	160	100	259200	9720
17	INVIERNO	ERQUIS SUD	48	35	90720	11340
	VERANO	ERQUIS SUD_2	240	200	518400	12960
18	INVIERNO	JURINA	18	27	69984	23328
	VERANO	JURINA_2	40	50	129600	19440
19	INVIERNO	LA PEÑA	20	25	64800	19440
	VERANO	LA PEÑA_2	40	55	142560	21384
20	INVIERNO	LA HECHICERA	20	25	64800	19440
	VERANO	LA HECHICERA_2	50	55	142560	17107
21	INVIERNO	LA VICTORIA RINCON	20	19	49248	14774
	VERANO	LA VICTORIA RINCON_2	185	90	233280	7566
22	INVIERNO	LA VICTORIA RIO CHICO	97	27	69984	4329
	VERANO	LA VICTORIA RIO CHICO_2	200	150	388800	11664
23	INVIERNO	LAJAS MOLINO	24,5	25	64800	15869
	VERANO	LAJAS MOLINO_2	30	35	90720	18144
24	INVIERNO	RANCHO NORTE	34	28	72576	12808
	VERANO	RANCHO NORTE_2	65	50	129600	11963
25	INVIERNO	RANCHO SUD	30	23	59616	11923
	VERANO	RANCHO SUD_2	90	70	181440	12096
26	INVIERNO	RANCHO GAL2	22	17	44064	12017
	VERANO	RANCHO GAL2_2	45	40	103680	13824
27	INVIERNO	SAN LORENZO BARRIO SAN PEDRO	325	73	189216	3493
	VERANO	SAN LORENZO BARRIO SAN PEDRO_2	440	200	518400	7069
28	INVIERNO	SAN LORENZO RIO CHICO	20	17	44064	13219
	VERANO	SAN LORENZO RIO CHICO_2	45	40	103680	13824
29	INVIERNO	SAN MATEO 2	25	20	51840	12442
	VERANO	SAN MATEO 2_2	76,25	70	181440	14277
30	INVIERNO	SAN MATEO 1	75	90	233280	18662
	VERANO	SAN MATEO 1_2	192,5	180	466560	14542
31	INVIERNO	STA BARBARA	0	1	2592	0
	VERANO	STA BARBARA_2	46	30	77760	10143
32	INVIERNO	SELLA MENDEZ RUMI ORKO	5	3	7776	9331
	VERANO	SELLA MENDEZ RUMI ORKO_2	33,5	25	64800	11606
33	INVIERNO	SELLA MENDEZ BORDE CENTRO	2	3	7776	23328
	VERANO	SELLA MENDEZ BORDE CENTRO_2	30	15	38880	7776
34	INVIERNO	SELLA MENDEZ EL MANZANO	5	2	5184	6221

	VERANO	SELLA MENDEZ EL MANZANO_2	120	70	181440	9072
35	INVIERNO	SELLA MENDEZ EL MOLINO	5	2,5	6480	7776
	VERANO	SELLA MENDEZ EL MOLINO_2	80	40	103680	7776
36	INVIERNO	SELLA MENDEZ EL NUCLEO	0	12	31104	0
	VERANO	SELLA MENDEZ EL NUCLEO_2	120	100	259200	12960
37	INVIERNO	TAJO 1	45	50	129600	17280
	VERANO	TAJO 1_2	380	250	648000	10232
38	INVIERNO	TARIJA CANCHA NORTE	50	60	155520	18662
	VERANO	TARIJA CANCHA NORTE_2	70	70	181440	15552
39	INVIERNO	TARIJA CANCHA SUD	50	55	142560	17107
	VERANO	TARIJA CANCHA SUD_2	76	62	160704	12687
40	INVIERNO	TOMATITAS ERQUIS	100	80	207360	12442
	VERANO	TOMATITAS ERQUIS_2	100	90	233280	13997
41	INVIERNO	TOMATITAS BOSQUECILLO	38	25	64800	10232
	VERANO	TOMATITAS BOSQUECILLO_2	70	70	181440	15552
42	INVIERNO	TOMATITAS GUADALQUIVIR	70	35	90720	7776
	VERANO	TOMATITAS GUADALQUIVIR_2	70	65	168480	14441
43	INVIERNO	TRANCAS ANACHURI	10	21	54432	32659
	VERANO	TRANCAS ANACHURI_2	10	40	103680	62208
44	INVIERNO	CHAUPICANCHA	10	8	20736	12442
	VERANO	CHAUPICANCHA_2	30	30	77760	15552
45	INVIERNO	GUERRAHUAYCO BAJO	30	30	77760	15552
	VERANO	GUERRAHUAYCO BAJO_2	48	50	129600	16200
46	INVIERNO	OBRAJES IZQ	60	60	155520	15552
	VERANO	OBRAJES IZQ_2	70	70	181440	15552
47	INVIERNO	SAN MATEO 3	18,5	20	51840	16813
	VERANO	SAN MATEO 3_2	33,75	30	77760	13824
48	INVIERNO	SAN MATEO 4	13	10	25920	11963
	VERANO	SAN MATEO 4_2	28,75	25	64800	13523
49	INVIERNO	SAN MATEO GALERIA	19,5	27	69984	21534
	VERANO	SAN MATEO GALERIA_2	76,25	70	181440	14277
50	INVIERNO	SAN MATEO SELLA	24,75	17	44064	10682
	VERANO	SAN MATEO SELLA_2	96	90	233280	14580
51	INVIERNO	SELLA	12	6	15552	7776
	VERANO	SELLA_2	28	40	103680	22217
52	INVIERNO	SELLA CALDERAS	19	25	64800	20463

	VERANO	SELLA CALDERAS_2	50	38	98496	11820
53	INVIERNO	SELLA CIRMINUELAS	19,1	20	51840	16285
	VERANO	SELLA CIRMINUELAS_2	21,6	20	51840	14400
54	INVIERNO	SELLA QDA1	6,2	8	20736	20067
	VERANO	SELLA QDA1_2	20	30	77760	23328
55	INVIERNO	SELLA CANDELARIA B	19,1	10	25920	8142
	VERANO	SELLA CANDELARIA B_2	35,5	20	51840	8762
56	INVIERNO	SELLA MENDEZ LA TORRE	5	4	10368	12442
	VERANO	SELLA MENDEZ LA TORRE	65	80	207360	19141
57	INVIERNO	TUCUMILLA	5	5	12960	15552
	VERANO	TUCUMILLA_2	22	25	64800	17673
58	INVIERNO	SELLA CERCADO	16	13	33696	12636
	VERANO	SELLA CERCADO_2	205	50	129600	3793
59	INVIERNO	SELLA CHAUPICANCHA	10,5	10	25920	14811
	VERANO	SELLA CHAUPICANCHA_2	11,45	30	77760	40748
60	INVIERNO	GRANDE MURILLO	27	35	90720	20160
	VERANO	GRANDE MURILO_2	39	58	150336	23129
61	INVIERNO	LAJAS PICACHO	11	16	41472	22621
	VERANO	LAJAS PICACHO_2	24	40	103680	25920
62	INVIERNO	MOLINO TOMATAS GRANDE	11,5	20	51840	27047
	VERANO	MOLINO TOMATAS GRANDE_2	12	30	77760	38880
63	INVIERNO	TRANCAS	9	20	51840	34560
	VERANO	TRANCAS_2	9	20	51840	34560
64	INVIERNO	TRANCAS ARRIBA	6	17	44064	44064
	VERANO	TRANCAS ARRIBA_2	6	20	51840	51840

Fuente: Plan Departamental De Riego, 2001.

En la tabla 3.18 se observa que para cada sistema de riego, se utilizó dos puntos de demanda para el ingreso de datos al modelo WEAP, así se puede diferenciar entre las demandas de Invierno y las de Verano.

El modelo WEAP necesita, como datos de entrada: el número de Hectáreas que se van a regar y el Ritmo de uso de agua por año (m^3/Ha). Es por eso, que se convirtió el caudal de la toma, primero en metros cúbicos por mes y luego en metros cúbicos por hectárea. Suponiendo un consumo del 95% del flujo de entrada en cada sitio de demanda.

En cuanto a las demandas poblacionales, se debe ingresar al modelo el número de habitantes del sitio de demanda, y el consumo anual por habitante en metros cúbicos. Para lo cual, se utilizó la proyección de población por unidad de análisis del Plan Departamental de Riego (Tabla 3.19), documento en el cual proyectan la población en base a los datos del censo del 2001. (15)

La dotación media diaria se refiere al consumo anual total previsto en un centro poblado dividido por la población abastecida y el número de días del año. Es el volumen equivalente de agua utilizado por una persona en un día. Para determinar esta dotación media diaria, se utilizó la tabla 3.20 sobre la base de la población y la zona geográfica. En base a dicha tabla, se estima una dotación de 180 lt/hab/día para la ciudad de Tarija, y una dotación de 120 lt/hab/día para los demás centros poblacionales.

Se estimó un consumo del 15% del flujo de entrada en cada sitio de demanda.

TABLA 3.19. Proyección de la Población por Unidad de Análisis y Dotación de Agua

Centro Poblacional	Unidad de Análisis Provincia	Municipio	Dotación		
			2010	lts/hab/día	m3/año/hab
Calama	Ménde	San Lorenzo	2.064	120	43,8
Canasmoro	Ménde	San Lorenzo	1.830	120	43,8
Carachimayo	Ménde	San Lorenzo	2.131	120	43,8
Coimata	Ménde	San Lorenzo	536	120	43,8
Erquis	Ménde	San Lorenzo	1.659	120	43,8
La Victoria	Ménde	San Lorenzo	2.253	120	43,8
San Lorenzo	Ménde	San Lorenzo	5.448	120	43,8
Sella Mendez	Ménde	San Lorenzo	2.909	120	43,8
Tomatas Grande	Ménde	San Lorenzo	1.858	120	43,8
Tomatitas	Ménde	San Lorenzo	302	120	43,8
Tucumilla	Ménde	San Lorenzo	3.737	120	43,8
Ciudad de Tarija	Cercado	Tarija	65.327	180	65,7
Guadalquivir Alto			90.055		

Fuente: Plan departamental de Riego, 2001.

TABLA 3.20. Dotación media diaria

Zona	Población (habitantes)					
	Hasta 500	De 501 a 2 000	De 2 001 a 5 000	De 5 001 a 20 000	De 20 001 a 100 000	Más de 100 000
Del Altiplano	30 - 50	30 - 70	50 - 80	80 - 100	100 - 150	150 - 200
De los Valles	50 - 70	50 - 90	70 - 100	100 - 140	150 - 200	200 - 250
De los Llanos	70 -90	70 - 110	90 - 120	120 - 180	200 - 250	250 - 350
Notas:	(1)			(2)		

Fuente: Norma Boliviana de Instalaciones de Agua, 2004.

4. CALIBRACIÓN, VERIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO

Se entiende por calibración al ajuste de los parámetros de un modelo matemático, ya sea en base a consideraciones de orden físicas o mediante optimización matemática, de forma que la concordancia entre los datos observados y los resultados del modelo sea la mejor posible.

4.1. Calibración del modelo hidrológico WEAP para la aplicación en la cuenca alta del río Guadalquivir

El modelo WEAP requiere de información tanto meteorológica así como de parámetros definidos para cada cuenca que se desee modelar. Entre la información que se requiere se incluye: los parámetros generales del tiempo de horizonte (periodo de modelación) y el área de la cuenca, precipitación y temperatura espacial de la cuenca, latitud, humedad, velocidad del viento y los parámetros de uso de suelo para el método de humedad de suelo.

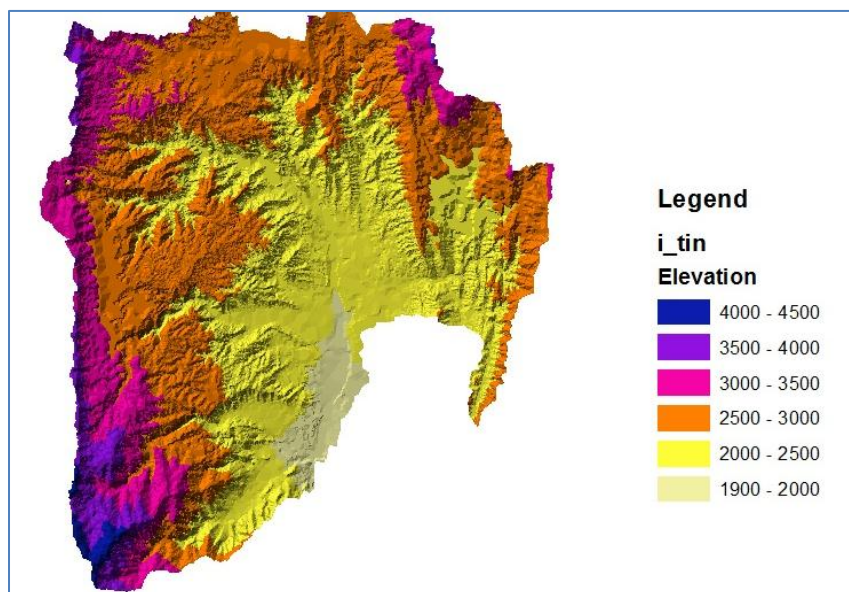


FIGURA 4.1 Mapa TIN de elevaciones de la cuenca alta del río Guadalquivir

A continuación se describirán los parámetros de ingreso al modelo WEAP, y si se requiere en algunos casos se detallarán los procesos utilizados para la determinación de dichos

valores, con los cuales posteriormente, se definirán los valores usados en la calibración, verificación y aplicación del modelo.

El modelo utiliza supuestos claves, si así lo desea el usuario, para optimizar el ingreso de datos y sobre todo el proceso de calibración. Un supuesto clave no es más que una ayuda que brinda el modelo y pueden ser usados con diferentes propósitos en la creación del mismo, como se explica en la sección 4.1.5. Por ejemplo, en los supuestos clave se pueden incorporar los parámetros de uso de suelo usados en la calibración del modelo, también pueden ser usadas para la creación de funciones para obtener series de tiempo de precipitación y temperatura en todos los catchments (Sitio de captación) del modelo a partir de la estación base.

Un catchment o sitio de captación, es la unidad utilizada por el modelo WEAP, representada por un punto, pero abarca el área dentro de cada banda de elevación de una subcuenca, y es en cada catchment donde se presentan todos los parámetros de uso de suelo y procesos climatológicos. Los catchment constituyen las unidades hidrológicas sobre las cuales WEAP aplica las rutinas para estimar evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, flujo horizontal entre capas y flujo base. Se pueden subdividir dependiendo de su cobertura vegetal para lograr una mayor representación de los procesos hidrológicos en diferentes tipos de cultivos y suelos.

4.1.1. Límites de Área

Los límites de área no son más que los límites naturales de la cuenca en su totalidad, en este caso, la cuenca Alta del río Guadalquivir hasta la estación de Obrajes.

4.1.1.1. Subcuencas

Para la calibración de la cuenca alta del río Guadalquivir, se definen subcuencas en la parte alta. Al final de cada subcuenca se tiene una estación hidrológica que sirve para comparar

los resultados de la calibración y validación, y encontrar un coeficiente de correlación que asegure si el trabajo está bien realizado.

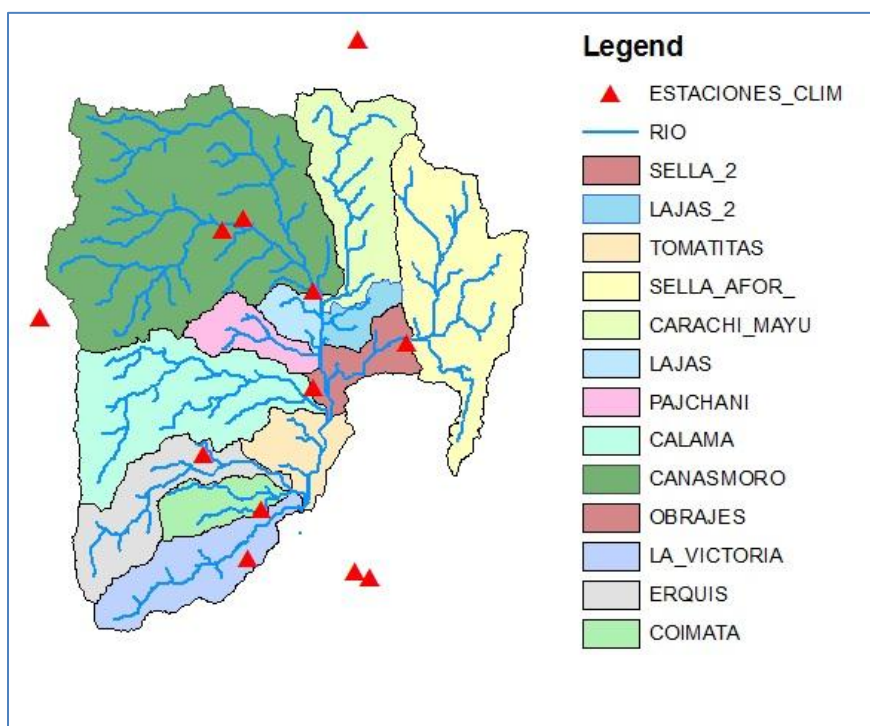


FIGURA 4.2. División de la cuenca alta del río Guadalquivir en subcuencas para la aplicación del modelo WEAP

De la cuenca se escogen las subcuencas: Canasmoro y Sella Aforo, ubicadas en la parte alta de la cuenca y con disponibilidad de información de aforos para la calibración y validación del modelo.

4.1.1.2. Definición de bandas de elevación para el modelo WEAP

Definir las bandas de nivel es dividir la cuenca en intervalos de distancia entre las curvas de nivel. (Figura 4.3.)

Para la modelación de la cuenca alta del río Guadalquivir el intervalo fue de 500 metros, por lo que se tienen seis bandas de elevación en toda la cuenca y al intersectarse con cada una de las subcuencas, se tiene el número de catchments (unidad del modelo WEAP) de cada una de estas.

TABLA 4.1 Rango de intervalo de las bandas de elevación

BANDAS DE ELEVACIÓN	INTERVALO (msnm)
Banda 1	1900-2000
Banda 2	2000-2500
Banda 3	2500-3000
Banda 4	3000-3500
Banda 5	3500-4000
Banda 6	4000-4500

Fuente: Elaboración propia

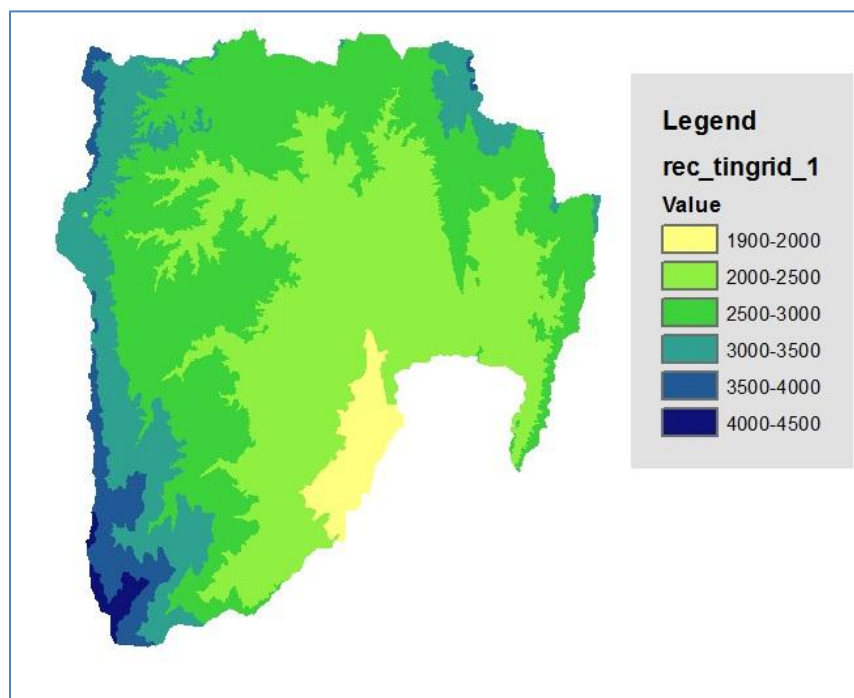


FIGURA 4.3. División de la cuenca Alta del río Guadalquivir en bandas de elevación

Las subcuencas definidas para el modelo se subdividen de acuerdo a las bandas de elevación y se obtienen los catchments de ingreso al modelo WEAP:

TABLA 4.2. Catchments de ingreso al modelo en el programa WEAP

SUBCUENCA	BANDA DE ELEVACION	NOMBRE DEL CATCHMENT	ETIQUETA	REPRESENTA CAUDAL DE CABECERA?
CANASMORO	BANDA 2	CANASMORO1	CAN_1	SI
	BANDA 3	CANASMORO2	CAN_2	NO
	BANDA 4	CANASMORO3	CAN_3	NO
	BANDA 5	CANASMORO4	CAN_4	NO
CARACHI MAYU	BANDA 2	MAYU_1	MAY_1	NO
	BANDA 3	MAYU_2	MAY_2	NO
	BANDA 4	MAYU_3	MAY_3	NO
	BANDA 5	MAYU_4	MAY_4	NO
SELLA 2_ALTO	BANDA 2	SELLA_ALTO_1	ALTO_1	SI
	BANDA 3	SELLA_ALTO_2	ALTO_2	NO
	BANDA 4	SELLA_ALTO_3	ALTO_3	NO
	BANDA 5	SELLA_ALTO_4	ALTO_4	NO
LAJAS_1	BANDA 2	LAJAS_1	LAJ_1	NO
	BANDA 3	LAJAS_2	LAJ_2	NO
LAJAS_2	BANDA 2	LAJAS_2_1	JAS_1	NO
	BANDA 3	LAJAS_2_2	JAS_2	NO
SELLA_BAJO	BANDA 1	SELLA_BAJO_1	SEL_1	NO
	BANDA 2	SELLA_BAJO_2	SEL_2	NO
	BANDA 3	SELLA_BAJO_3	SEL_3	NO
PAJCHANI	BANDA 1	PAJCHANI_1	PAJ_1	NO
	BANDA 2	PAJCHANI_2	PAJ_2	NO
	BANDA 3	PAJCHANI_3	PAJ_3	NO
CALAMA	BANDA 1	CALAMA_1	CAL_1	NO
	BANDA 2	CALAMA_2	CAL_2	NO
	BANDA 3	CALAMA_3	CAL_3	NO
	BANDA 4	CALAMA_4	CAL_4	NO
	BANDA 5	CALAMA_5	CAL_5	NO

TOMATITAS	BANDA 1	TOMATITAS_1	TOM_1	NO
	BANDA 2	TOMATITAS_2	TOM_2	NO
ERQUIS	BANDA 1	ERQUIS_1	ERQ_1	NO
	BANDA 2	ERQUIS_2	ERQ_2	NO
	BANDA 3	ERQUIS_3	ERQ_3	NO
	BANDA 4	ERQUIS_4	ERQ_4	NO
	BANDA 5	ERQUIS_5	ERQ_5	NO
	BANDA 6	ERQUIS_6	ERQ_6	NO
COIMATA	BANDA 1	COIMATA_1	COI_1	NO
	BANDA 2	COIMATA_2	COI_2	NO
	BANDA 3	COIMATA_3	COI_3	NO
	BANDA 4	COIMATA_4	COI_4	NO
LA VICTORIA	BANDA 1	VICTORIA_1	VIC_1	NO
	BANDA 2	VICTORIA_2	VIC_2	NO
	BANDA 3	VICTORIA_3	VIC_3	NO
	BANDA 4	VICTORIA_4	VIC_4	NO
	BANDA 5	VICTORIA_5	VIC_5	NO
	BANDA 6	VICTORIA_6	VIC_6	NO

Fuente: Elaboración propia

4.1.1.3. Ríos

El alcance o longitud de los ríos no puede ser ingresado directamente a WEAP desde una base de datos georeferencial (ARCGIS) porque en el programa los mapas sirven únicamente como un esquema conceptual. Los ríos más importantes son añadidos a la vista esquemática de WEAP, exportando y proyectando los ríos desde ArcView GIS o cualquier paquete de georeferenciación GIS como una capa vectorial. Después son dibujados los ríos en WEAP de forma manual por encima de la capa vectorial (Figura 4.4).

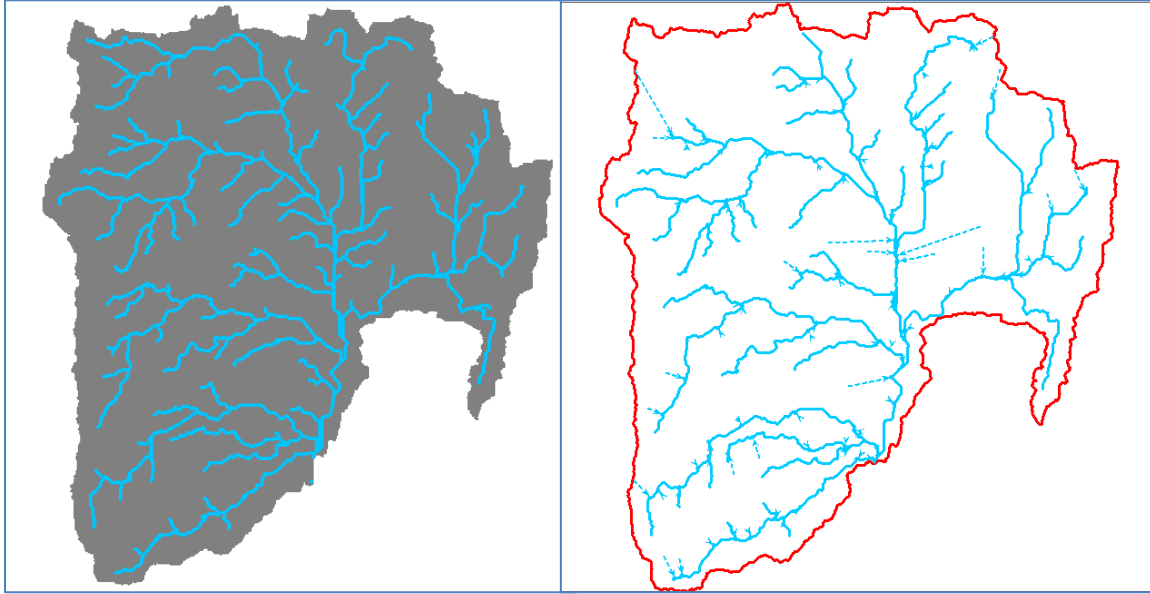


FIGURA 4.4. Ríos más importantes vista GIS (izquierda) y Ríos más importantes vista WEAP (derecha)

4.1.1.4. Esquema del modelo en el programa WEAP

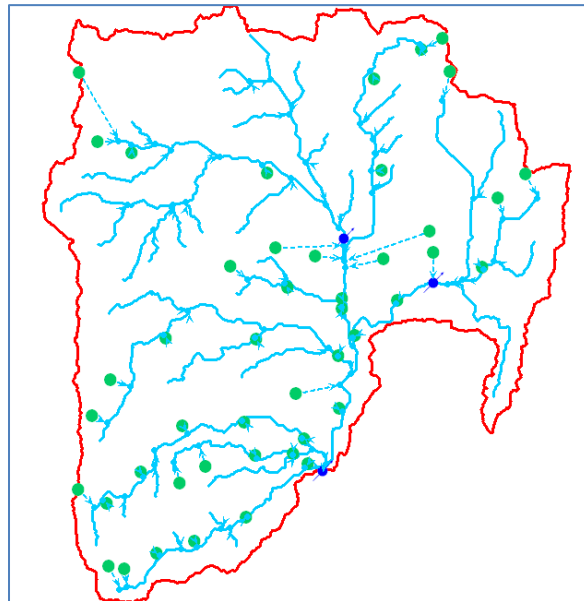


FIGURA 4.5. Esquema del modelo de la cuenca Alta del río Guadalquivir para el programa WEAP

4.1.2. Parámetros generales de área de la cuenca

Los parámetros generales de área son definidos para toda la cuenca en estudio, su elección se basa en el período a modelar, que a su vez depende de la disponibilidad de información hidrológica, sobre todo de la información de aforo de caudales en la cuenca.

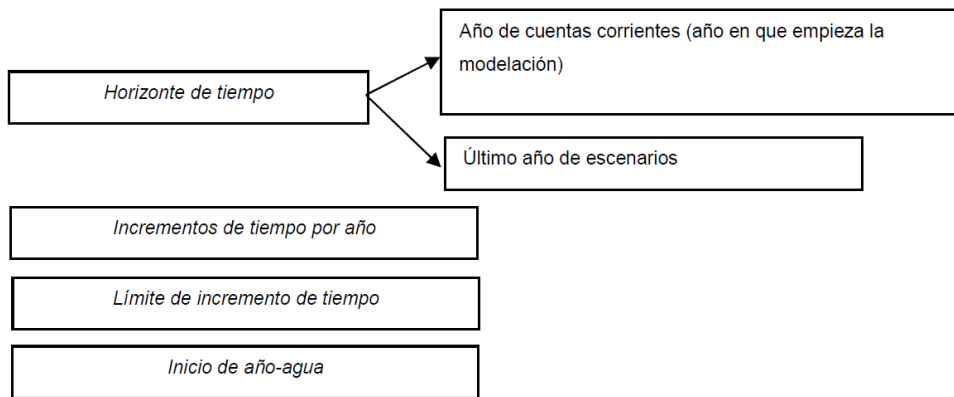


FIGURA 4.6. Parámetros generales de área para el modelo WEAP

Incrementos de años y tiempos

Horizonte de tiempo
 Año de Cuentas corrientes: 1979
 Último año de escenarios: 2007

Incrementos de tiempo por año
 12
 Agrega 29 Febrero?

Límite del incremento de tiempo
 Basado en un calendario mensual
 Todos los incrementos de tiempo so
 Establezca la longitud del increment

Inicio de Año-agua
 Enero

#	Título	Abrev.	Longitud	Inicio	Final
1	Enero	Ene	31	Ene 1	Ene 31
2	Febrero	Feb	28	Feb 1	Feb 28
3	Marzo	Mar	31	Mar 1	Mar 31
4	Abril	Abr	30	Abr 1	Abr 30
5	Mayo	Mayo	31	Mayo 1	Mayo 31
6	Junio	Jun	30	Jun 1	Jun 30
7	Julio	Jul	31	Jul 1	Jul 31
8	Agosto	Ago	31	Ago 1	Ago 31
9	Septiembre	Sep	30	Sep 1	Sep 30
10	Octubre	Oct	31	Oct 1	Oct 31
11	Noviembre	Nov	30	Nov 1	Nov 30

El periodo de estudio será de Enero, 1979 a Diciembre, 2007.

FIGURA 4.7 Valores de los parámetros generales de área para el modelo WEAP

4.1.3. Unidades

Las unidades pueden ser escogidas dentro de una lista que posee el mismo programa para los siguientes componentes: ríos, embalses, agua subterránea, otros suministros, uso de suelo, plantas de tratamiento de aguas servidas y costos de operación. La única excepción es la tasa de uso del agua, predeterminada en la demanda solo por la unidad de entrada (m^3). Independientemente de la unidad utilizada para la entrada de datos, se puede ver los resultados en cualquier unidad.

4.1.4. Tipos de Cobertura de Suelo

Según datos obtenidos del proyecto ZONISIG, el departamento de Tarija, posee distintos tipos de uso de suelo, como se observa en la Tabla 4.3. Se seleccionó los pertenecientes a la cuenca en estudio y se clasificó los mismos en cinco tipos significativos para WEAP (Tabla 4.4), para así disminuir el esfuerzo en el desarrollo y la calibración del modelo.

TABLA 4.3. Tipos de cobertura en el departamento de Tarija.

LEYENDA MAPA DE VEGETACION TARIJA							
código mapa	código UNESCO	clase de formacion	subclase	grupo	piso	subformacion	
3	1A2b	BOSQUE DENSO	SIEMPRE VERDE	estacional	submontano	-	
4	1A2e	BOSQUE DENSO	SIEMPRE VERDE	estacional	nublado	-	
5	1A3b	BOSQUE DENSO	SIEMPRE VERDE	semideciduo	submontano	-	
7	1A11a	BOSQUE DENSO	SIEMPRE VERDE	sinusia de palmeras	baja altitud	-	
8	1B2b	BOSQUE DENSO	CADUCIFOLIO	estacional	submontano	-	
9	1B3b	BOSQUE DENSO	CADUCIFOLIO	semideciduo	submontano	-	
10	1B3c	BOSQUE DENSO	CADUCIFOLIO	semideciduo	montano	-	
11	1B4b	BOSQUE DENSO	CADUCIFOLIO	deciduo por sequia	submontano	-	
13	1C5a	BOSQUE DENSO	XEROMORFICO	espinoso	baja altitud	-	
15	2A2b	BOSQUE RALO	SIEMPRE VERDE	estacional	submontano	-	
19	2A3c	BOSQUE RALO	SIEMPRE VERDE	semideciduo	montano	-	
20	2A3e	BOSQUE RALO	SIEMPRE VERDE	semideciduo	nublado	-	
21	2B2b	BOSQUE RALO	CADUCIFOLIO	estacional	submontano	-	
22	2B3b	BOSQUE RALO	CADUCIFOLIO	semideciduo	submontano	-	
23	2B4b	BOSQUE RALO	CADUCIFOLIO	deciduo por sequia	submontano	-	
24	2B5b	BOSQUE RALO	CADUCIFOLIO	espinoso	submontano	-	
26	2C3b	BOSQUE RALO	XEROMORFICO	semideciduo	submontano	-	
27	2C4a	BOSQUE RALO	XEROMORFICO	deciduo por sequia	baja altitud	-	
28	2C4b	BOSQUE RALO	XEROMORFICO	deciduo por sequia	submontano	-	
29	2C4c	BOSQUE RALO	XEROMORFICO	deciduo por sequia	montano	-	
30	2C4q	BOSQUE RALO	XEROMORFICO	deciduo por sequia	aluvial	-	
31	2C5a	BOSQUE RALO	XEROMORFICO	espinoso	baja altitud	-	
32	2C5b	BOSQUE RALO	XEROMORFICO	espinoso	submontano	-	
33	2C5c	BOSQUE RALO	XEROMORFICO	espinoso	montano	-	
34	2C5q	BOSQUE RALO	XEROMORFICO	espinoso	aluvial	-	
36	3A3c	MATORRAL	SIEMPRE VERDE	semideciduo	montano	-	
39	3A3e	MATORRAL	SIEMPRE VERDE	semideciduo	nublado	-	
45	3B2c	MATORRAL	CADUCIFOLIO	estacional	montano	-	
46	3B3b	MATORRAL	CADUCIFOLIO	semideciduo	submontano	-	
47	3B3c	MATORRAL	CADUCIFOLIO	semideciduo	montano	-	
48	3B3d	MATORRAL	CADUCIFOLIO	semideciduo	subalpino	-	
49	3B4b	MATORRAL	CADUCIFOLIO	deciduo por sequia	submontano	-	
50	3B4c	MATORRAL	CADUCIFOLIO	deciduo por sequia	montano	-	
57	3C3c(5)	MATORRAL	XEROMORFICO	semideciduo	montano	semidesierto	
58	3C3q	MATORRAL	XEROMORFICO	semideciduo	aluvial	-	
59	3C4c	MATORRAL	XEROMORFICO	deciduo por sequia	montano	-	
60	3C4c(5)	MATORRAL	XEROMORFICO	deciduo por sequia	montano	semidesierto	
61	3C4d	MATORRAL	XEROMORFICO	deciduo por sequia	subalpino	-	
62	3C4q	MATORRAL	XEROMORFICO	deciduo por sequia	aluvial	-	
63	3C5a	MATORRAL	XEROMORFICO	espinoso	baja altitud	-	
64	3C5b	MATORRAL	XEROMORFICO	espinoso	submontano	-	
65	3C5c	MATORRAL	XEROMORFICO	espinoso	montano	-	
67	3C5q	MATORRAL	XEROMORFICO	espinoso	aluvial	-	
72	4B3d	MATORRAL ENANO	CADUCIFOLIO	semideciduo	subalpino	-	
73	4B4d	MATORRAL ENANO	CADUCIFOLIO	deciduo por sequia	subalpino	-	
77	4B9d	MATORRAL ENANO	CADUCIFOLIO	sinusia arbustiva	subalpino	-	
80	4C5c	MATORRAL ENANO	XEROMORFICO	espinoso	montano	-	
81	5C14d	HERBACEA	XEROMORFICO	mixto o mosaico	subalpino	-	
90	5E12c	HERBACEA	GRAMINOIDE INTERMEDIA	sin sinusia	montano	-	
94	5F7d(2)	HERBACEA	GRAMINOIDE BAJA	con matas y cojines	subalpino	a veces inundado	
99	5F9c	HERBACEA	GRAMINOIDE BAJA	sinusia arbustiva	montano	-	
103	5F9e	HERBACEA	GRAMINOIDE BAJA	sinusia arbustiva	nublado	-	
104	5F9h	HERBACEA	GRAMINOIDE BAJA	sinusia arbustiva	alpino	-	
108	5F12d	HERBACEA	GRAMINOIDE BAJA	sin sinusia	subalpino	-	
109	5F12d(6)	HERBACEA	GRAMINOIDE BAJA	sin sinusia	subalpino	bofedal	
113	5F14c	HERBACEA	GRAMINOIDE BAJA	mixto o mosaico	montano	-	
114	5F14d	HERBACEA	GRAMINOIDE BAJA	mixto o mosaico	subalpino	-	
c	6	Areas agricolas y pasturas (sembradas y de sucesión secundaria)					
f	--	Plantación forestal					

Fuente: ZONISIG, 2001.

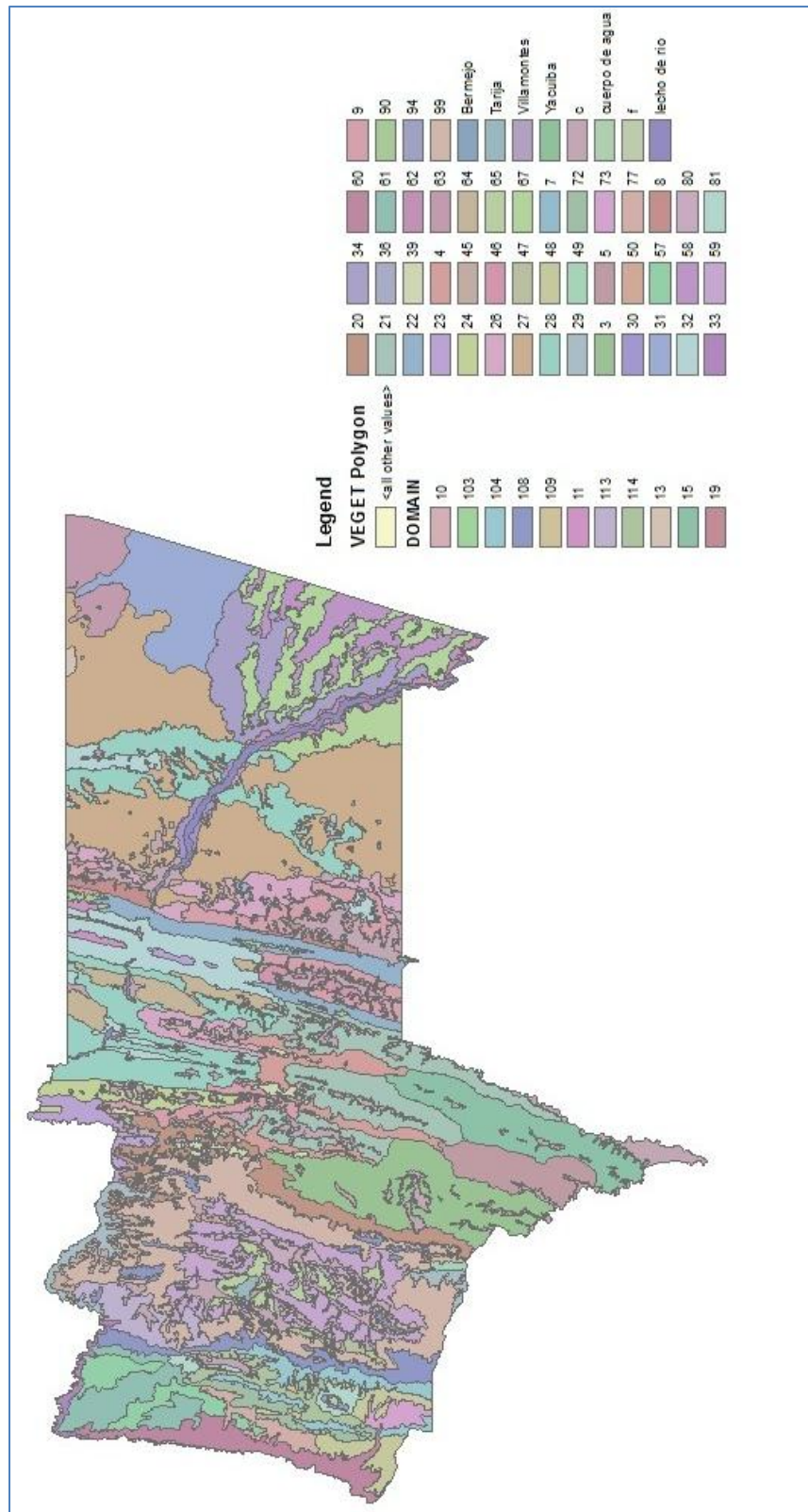


FIGURA 4.8. Tipos de cobertura en el departamento de Tarija.

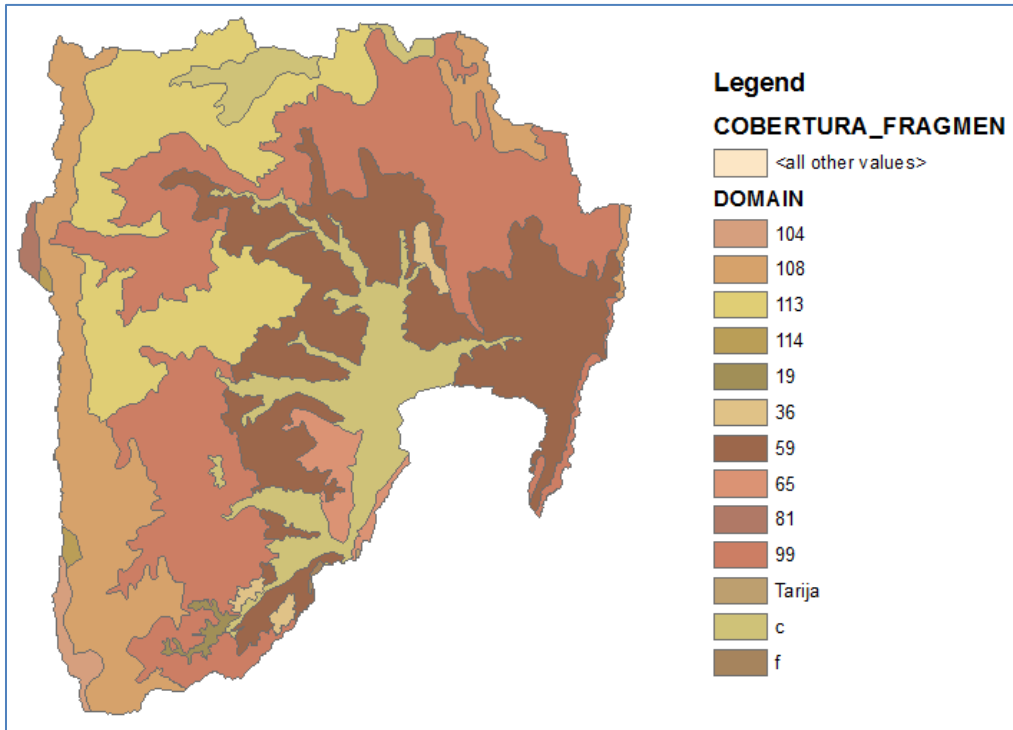


FIGURA 4.9. Tipos de cobertura en la cuenca Alta de Río Guadalquivir

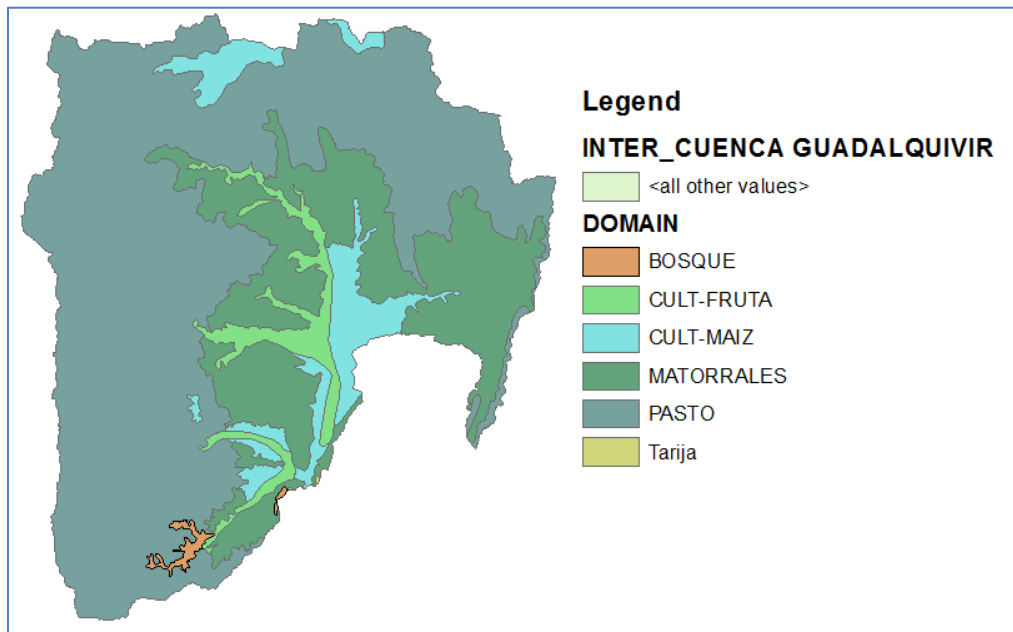


FIGURA 4.10. Clasificación de tipos significativos de coberturas para WEAP.

TABLA 4.4. Porcentajes de uso de suelo en la cuenca Alta del río Guadalquivir.

CÓDIGO MAPA	CÓDIGO UNESCO	CLASE DE FORMACIÓN	TIPO_WEAP	ÁREA (Km2)	% ÁREA
19	2A3c	BOSQUERALO	BOSQUE	4,932	0,51
f	--	Plantación forestal	BOSQUE		
36	3A3c	MATORRAL	MATORRAL	238,852	24,58
59	3C4c	MATORRAL	MATORRAL		
65	3C5c	MATORRAL	MATORRAL		
81	5C14d	HERBACEA	PASTO	617,377	63,53
99	5F9c	HERBACEA	PASTO		
104	5F9h	HERBACEA	PASTO		
108	5F12d	HERBACEA	PASTO		
113	5F14c	HERBACEA	PASTO		
114	5F14d	HERBACEA	PASTO		
c	6	Areas agrícolas y pasturas (sembradas y de sucesión)	CULTIVOS_FRUTALES	41,689	4,29
			CULTIVOS_MAIZ	68,905	7,09
			TOTAL	971,755	100,00

Fuente: Elaboración Propia

4.1.5. Supuestos Claves

Mediante los supuestos claves se crea y se organiza variables independientes usadas para el manejo de cálculos en el análisis. Las variables conductoras no son calculadas directamente en WEAP, pero son útiles como variables intermedias que pueden ser referenciadas en los cálculos del modelo.

Es muy útil la creación de supuestos claves en este punto para las principales hipótesis de la modelación, especialmente aquellas que varían de un escenario a otro.

Para la realización de este proyecto se tomaron en cuenta los siguientes supuestos claves:

4.1.5.1. LAI (Índice de área foliar)

El índice de área foliar es un parámetro que varía por el uso de suelo y es usado para controlar la respuesta de escurrimiento en la superficie, sabiendo que el escurrimiento tiende a reducir con valores altos de LAI. La determinación de este parámetro no es fácil por lo que se generan muchas discrepancias en las definiciones y valores, que se aplican para el mismo uso de suelo.

Para el proyecto se utilizaron los siguientes valores de LAI (Tabla 4.5):

TABLA 4.5. Valores de LAI para la cuenca Alta del río Guadalquivir.

TIPO DE USO DE SUELO	LAI
BOSQUE	5
CULTIVOS_MAIZ	4
CULTIVOS FRUTALES	5
PASTO	3
MATORRAL	3

Fuente: WEAP Modelación Hidrológica de la Cuenca Del Río Pastaza, Ecuador, 2009.

4.1.5.2. Ks (Zona radicular de conductividad)

La zona radicular (“recipiente” superior) es la tasa de conductividad hidráulica a saturación plena (cuando el almacenamiento relativo $z1=1.0$), que será fraccionado de acuerdo a dirección preferencial de flujo, entre interflujo y flujo hacia capas inferiores del suelo. La tasa de conductividad típicamente varía entre las clasificaciones de suelo y cobertura vegetal.

Los valores de Ks para la cuenca Alta del río Guadalquivir son (Tabla4.6):

TABLA 4.6. Valores de Ks

TIPO DE USO DE SUELO	Ks
BOSQUE	150
CULTIVOS_MAIZ	150
CULTIVOS FRUTALES	150
PASTO	150
MATORRAL	150

Fuente: WEAP Modelación Hidrológica de la Cuenca Del Río Pastaza, Ecuador, 2009.

4.1.5.3. Kc (Coeficiente de cultivo)

El coeficiente de cultivo, es un parámetro que representa los efectos de la evapotranspiración vegetal y la evaporación del suelo, por esta razón varía según el tipo de cobertura vegetal. Este parámetro fue creado para estudiar la humedad del suelo requerida para maximizar la producción de biomasa de cultivos; por lo tanto, Kc es típicamente usado para calcular la evapotranspiración requerida utilizando la ecuación:

$$(Evapotranspiración)_{requerida} = Kc * (Evapotranspiración)_{referencial}$$

Los valores de Kc utilizados para el presente proyecto se indican a continuación:

TABLA 4.7. Valores de coeficiente de cultivo

CULTIVO / ESPECIE	CICLO VEGETATIVO (DIAS)	COEFICIENTES DE CULTIVO (Kc)											
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MAIZ	180	0,41	0,80	1,08	1,03	0,80	-	-	-	-	-	-	0,24
PASTO	365	0,80	0,75	0,70	0,50	0,30	0,10	0,20	0,30	0,50	0,06	0,70	0,85
FRUTALES	270	1,15	1,15	1,10	0,90	0,85	-	-	-	0,55	0,95	1,05	1,15
MATORRAL	365	0,85	0,80	0,75	0,70	0,50	0,30	0,10	0,20	0,30	0,50	0,60	0,70
BOSQUE	365	1,00	1,00	1,00	0,95	0,90	0,85	0,70	0,50	0,75	0,95	1,00	1,00

Fuente: PRONAR, 2002.

4.1.5.4. Sw (Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces)

La capacidad de agua del suelo o la capacidad en la zona radicular es la capacidad de retención de agua efectiva, en milímetros, del primer cubo del método de humedad del suelo. La estructura del modelo WEAP permite que este parámetro caracterice los grupos de suelos dentro de una subcuenca. Típicamente en WEAP, valores de Sw son aplicados a los grupos de cobertura vegetal delineados dentro de cada subcuenca.

Los valores para la cuenca Alta del río Guadalquivir son (Tabla 4.8):

TABLA 4.8. Valores de Sw

TIPO DE USO DE SUELO	Sw
BOSQUE	750
CULTIVOS_MAIZ	1000
CULTIVOS FRUTALES	500
PASTO	950
MATORRAL	950

Fuente: WEAP Modelación Hidrológica de la Cuenca Del Río Pastaza, Ecuador, 2009.

4.1.5.5. Altura

La altura de cada catchment es el punto medio de la banda de elevación donde se encuentra localizado, se lo clasifica en alto, medio o bajo, según los siguientes valores (Tabla 4.9):

TABLA 4.9. Rango de clasificación por altura

CLASIFICACIÓN POR ALTURA	
ALTO	> 3000
MEDIO	ENTRE 2000 Y 3000 msnm
BAJO	< 2000 msnm

Fuente: WEAP Modelación Hidrológica de la Cuenca Del Río Pastaza, Ecuador, 2009.

Según este criterio entonces, los sitios de captación de la cuenca Alta del río Guadalquivir se clasifican como se indica a continuación (Tabla 4.10.):

TABLA 4.10. Clasificación de catchments por altura

N°	NOMBRE DEL CATCHMENT	ALTURA	CLASIFICACION POR ALTURA
1	CALAMA_1	1980	BAJO
2	CALAMA_2	2115	MEDIO
3	CALAMA_3	2560	MEDIO
4	CALAMA_4	3222	ALTO
5	CALAMA_5	3576	ALTO
6	CANASMORO1	2200	MEDIO
7	CANASMORO2	2500	MEDIO
8	CANASMORO3	3037	ALTO
9	CANASMORO4	3570	ALTO
10	COIMATA_1	1980	BAJO
11	COIMATA_2	2135	MEDIO
12	COIMATA_3	2850	MEDIO
13	COIMATA_4	3164	ALTO
14	ERQUIS_1	1972	BAJO
15	ERQUIS_2	2140	MEDIO
16	ERQUIS_3	2840	MEDIO
17	ERQUIS_4	3164	ALTO
18	ERQUIS_5	3523	ALTO
19	ERQUIS_6	4110	ALTO
20	LAJAS_1	2000	MEDIO
21	LAJAS_2	2122	MEDIO
22	LAJAS_3	2496	MEDIO
23	LAJAS_2_1	2100	MEDIO
24	LAJAS_2_2	2656	MEDIO
25	MAYU_1	2272	MEDIO
26	MAYU_2	2627	MEDIO
27	MAYU_3	3000	MEDIO
28	MAYU_4	3600	ALTO
29	PAJCHANI_1	2000	MEDIO
30	PAJCHANI_2	2099	MEDIO
31	PAJCHANI_3	2540	MEDIO
32	SELLA_ALTO_1	2180	MEDIO
33	SELLA_ALTO_2	2500	MEDIO

34	SELLA_ALTO_3	3100	ALTO
35	SELLA_ALTO_4	3588	ALTO
36	SELLA_BAJO_1	1980	BAJO
37	SELLA_BAJO_2	2060	MEDIO
38	SELLA_BAJO_3	2585	MEDIO
39	TOMATITAS_1	1940	BAJO
40	TOMATITAS_2	2121	MEDIO
41	VICTORIA_1	1959	BAJO
42	VICTORIA_2	2115	MEDIO
43	VICTORIA_3	2470	MEDIO
44	VICTORIA_4	2875	MEDIO
45	VICTORIA_5	3670	ALTO
46	VICTORIA_6	4129	ALTO

Fuente: Elaboración Propia

4.1.5.6. Kd (Conductividad Profunda)

El parámetro de conductividad profunda representa la tasa de conductividad para el segundo cubo, en milímetros por día. Controla la transmisión de caudal base y WEAP aplica un solo valor de Kd para todo el catchment.

Los valores aplicados para los catchments son de acuerdo a la clasificación por altura (Tabla 4.10).

TABLA 4.11. Valores de Kd

Clasificación	Kd
ALTO	100
MEDIO	50
BAJO	30

Fuente: WEAP Modelación Hidrológica de la Cuenca Del Río Pastaza, Ecuador, 2009.

4.1.5.7. Dw (Capacidad de agua profunda)

La capacidad de agua profunda es la capacidad de almacenamiento efectivo de agua, en milímetros, del estrato más profundo de la capa de suelo, o del segundo cubo del método de

humedad del suelo. El modelo WEAP aplica este parámetro a todo el catchment por lo que no puede ser caracterizado por el área de suelo o cobertura vegetal.

Para la cuenca Alta del río Guadalquivir se utilizaron los siguientes valores (Tabla 4.12), según la clasificación por altura de los catchments.

TABLA 4.12. Valores de Dw

Clasificación	Dw
ALTO	2000
MEDIO	8000
BAJO	15000

Fuente: WEAP Modelación Hidrológica de la Cuenca Del Río Pastaza, Ecuador, 2009.

4.1.5.8. RRF (Factor de resistencia a la escorrentía)

El factor de resistencia a la escorrentía se usa para controlar la respuesta del escurrimiento superficial. Está relacionado a factores tales como índice de área foliar y la pendiente del terreno. La escorrentía tiende a disminuir con valores más altos (rango 0,1 a 10). Este parámetro varía entre las clasificaciones de suelo y cobertura vegetal (Tabla 4.13).

TABLA 4.13. Valores de RRF

Clasificación	RRF
ALTO	0,4
MEDIO	0,2
BAJO	1

Fuente: WEAP Modelación Hidrológica de la Cuenca Del Río Pastaza, Ecuador, 2009.

4.1.5.9. Pfd (Dirección preferencial de flujo)

El parámetro de dirección de flujo preferente se utiliza para la partición de flujo de la zona de raíz al estrato inferior de la capa de suelo o aguas subterráneas. Puede variar según la clasificación de cobertura vegetal y su rango es de 0 a 1, donde 1 indica que la dirección de flujo horizontal es el 100% y 0 indica que la dirección de flujo vertical es 100%. Los valores son (Tabla 4.14):

TABLA 4.14. Valores de Pfd

Clasificación	Pfd
ALTO	0,6
MEDIO	0,4
BAJO	0,15

Fuente: WEAP Modelación Hidrológica de la Cuenca Del Río Pastaza, Ecuador, 2009.

4.1.5.10. Z1 (Z1 inicial)

El parámetro Z1 inicial, es el almacenamiento relativo dado como porcentaje del almacenamiento total efectivo de capacidad de agua en la zona radicular (Sw), al comienzo de la simulación. El valor del supuesto clave Z1 para cada subcuenca fue creado con un valor igual a 35 por ciento, excepto para los cultivos, donde su cálculo es diferente.

Para los cultivos, de acuerdo al método de humedad del suelo de la figura 4.11, se necesita de riego para que Z1 llegue hasta el umbral superior, es por eso que su cálculo es:

$$Z1_{CADA\ CULTIVO} = \frac{(Umbral\ Inferior + Umbral\ Superior)_{CADA\ CULTIVO}}{2}$$

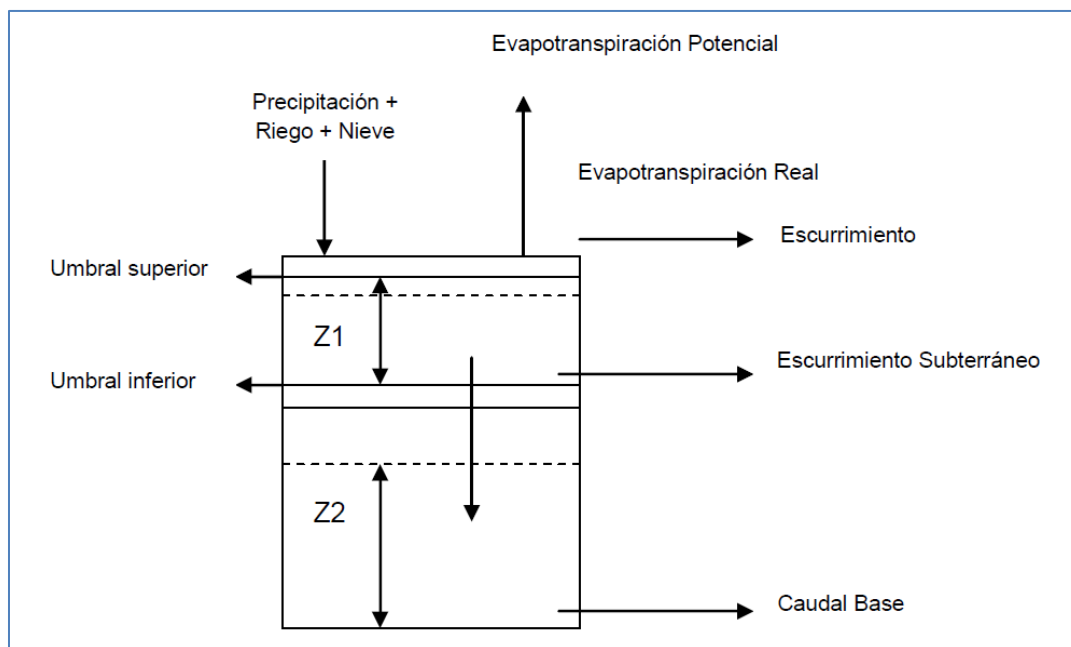


FIGURA 4.11. Método de humedad del suelo

TABLA 4.15. Valores de Z2 (umbral inferior) y Z1 (umbral superior) para los cultivos del modelo WEAP de la cuenca Alta del río Guadalquivir

CULTIVOS	Z2	Z1	Z1 cultivo
FRUTALES	50	65	57,5
MAIZ	50	75	62,5

Fuente: WEAP Modelación Hidrológica de la Cuenca Del Río Pastaza, Ecuador, 2009.

4.1.5.11. Z2 (Z2 inicial)

El parámetro Z2 inicial es el almacenamiento relativo dado como porcentaje del almacenamiento total efectivo de la capacidad de agua profunda Dw al comienzo de la simulación. WEAP, como Dw, lleva a Z2 a ser constante para cada cuenca, es por eso que el valor tomado para la cuenca Alta del río Guadalquivir es 35 por ciento, al igual que el modelo WEAP del río Santa en Perú.

4.1.5.12. Altura de Estación (Altura de las estaciones base)

La altura de la estación base (tabla 4.16), es la elevación en metros de las estaciones utilizadas en cálculos posteriores como son la precipitación y temperatura de cada catchment; y se la utiliza para el cálculo de otro supuesto clave denominado FormTemp.

TABLA 4.16. Altura de las estaciones base de la cuenca Alta del río Guadalquivir para WEAP

ESTACION BASE	ALTURA
TRANCAS	2198
SELLA QDAS	2145
TUCUMILLAS	2557
AASANA	1849

Fuente: SENAMHI, 2013.

4.1.5.13. Factor Temp (Factor de temperatura)

El factor de temperatura depende de las zonas homogéneas de temperatura, de donde se determinó trabajar con una sola zona de temperatura, dado la baja disponibilidad de datos en distintas partes de la cuenca. El valor de este supuesto clave es el factor Z de la ecuación analizada en el capítulo anterior, es decir -0.0046. Este factor influye en cálculo de un supuesto clave posterior.

4.1.5.14. Form Temp (Fórmula de la temperatura)

La fórmula de la temperatura se calcula con la siguiente expresión:

$$FormTemp = FactorTemp * (Altura - AlturaEstacion)$$

Para todos los catchments se utilizó el valor de -0.0046 como Factor Temp y la altura de la estación base AASANA.

4.1.6. Sitios de demanda y catchments

Los sitios de demanda y catchments (sitios de captación) contienen parámetros del suelo y datos de clima necesarios para la modelación con WEAP. El catchment es la componente clave en la construcción del modelo, elemento que define una subcuenca, ya que tiene incorporado de forma nativa la estructura de datos que permite ingresar parámetros que van desde el área, pasando por las series meteorológicas de interés, hasta llegar a las propiedades del suelo. También se define un catchment como la unidad de análisis hidrológico del modelo WEAP, sobre los cuales WEAP aplica las rutinas para estimar evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, flujo horizontal entre capas y flujo base. (16)

Para el presente proyecto se diferencian 46 catchments, como resultado de la intersección de las bandas de elevación con las subcuencas. (Tabla 4.17)

TABLA 4.17 Tabla de áreas de los catchments

N°	NOMBRE DEL CATCHMENT	BANDA DE ELEVACION	ETIQUETA	ÁREA	BOSQUE	MATORRAL	PASTO	CULTIVO FRUTALES	CULTIVOS MAIZ
				Km2	Km2	Km2	Km2	Km2	Km2
1	CALAMA_1	BANDA 1	CAL_1	1,273	0,000	0,139	0,000	0,142	0,992
2	CALAMA_2	BANDA 2	CAL_2	45,432	0,000	25,171	9,099	10,220	0,943
3	CALAMA_3	BANDA 3	CAL_3	48,689	0,000	0,293	47,807	0,000	0,589
4	CALAMA_4	BANDA 4	CAL_4	28,270	0,000	0,000	28,270	0,000	0,000
5	CALAMA_5	BANDA 5	CAL_5	9,938	0,000	0,000	9,938	0,000	0,000
6	CANASMORO1	BANDA 2	CAN_1	84,886	0,000	43,766	33,339	7,554	0,227
7	CANASMORO2	BANDA 3	CAN_2	165,377	0,000	2,796	146,562	0,000	16,019
8	CANASMORO3	BANDA 4	CAN_3	51,708	0,000	0,000	51,708	0,000	0,000
9	CANASMORO4	BANDA 5	CAN_4	6,267	0,000	0,000	6,267	0,000	0,000
10	COIMATA_1	BANDA 1	COI_1	2,027	0,000	0,395	0,000	0,584	1,048
11	COIMATA_2	BANDA 2	COI_2	12,840	0,000	2,139	6,831	0,441	3,429
12	COIMATA_3	BANDA 3	COI_3	11,870	0,000	0,000	11,870	0,000	0,000
13	COIMATA_4	BANDA 4	COI_4	4,206	0,000	0,000	4,206	0,000	0,000
14	ERQUIS_1	BANDA 1	ERQ_1	1,269	0,000	0,223	0,000	0,771	0,275
15	ERQUIS_2	BANDA 2	ERQ_2	10,297	0,000	1,195	4,579	2,695	1,829
16	ERQUIS_3	BANDA 3	ERQ_3	16,685	0,000	0,000	16,215	0,000	0,470
17	ERQUIS_4	BANDA 4	ERQ_4	18,597	0,000	0,000	18,597	0,000	0,000
18	ERQUIS_5	BANDA 5	ERQ_5	17,784	0,000	0,000	17,784	0,000	0,000
19	ERQUIS_6	BANDA 6	ERQ_6	5,440	0,000	0,000	5,440	0,000	0,000
20	LAJAS_1	BANDA 1	LAJ_1	0,061	0,000	0,000	0,000	0,061	0,000
21	LAJAS_2	BANDA 2	LAJ_2	16,293	0,000	11,864	0,982	3,445	0,003
22	LAJAS_3	BANDA 3	LAJ_3	0,145	0,000	0,000	0,145	0,000	0,000
23	LAJAS_2_1	BANDA 2	JAS_1	16,446	0,000	7,527	1,902	0,764	6,253
24	LAJAS_2_2	BANDA 3	JAS_2	0,580	0,000	0,193	0,387	0,000	0,000
25	MAYU_1	BANDA 2	MAY_1	37,035	0,000	17,796	15,139	0,248	3,852
26	MAYU_2	BANDA 3	MAY_2	45,477	0,000	1,032	40,908	0,000	3,537
27	MAYU_3	BANDA 4	MAY_3	9,359	0,000	0,000	9,359	0,000	0,000
28	MAYU_4	BANDA 5	MAY_4	0,465	0,000	0,000	0,465	0,000	0,000
29	PAJCHANI_1	BANDA 1	PAJ_1	0,129	0,000	0,000	0,000	0,129	0,000
30	PAJCHANI_2	BANDA 2	PAJ_2	17,450	0,000	11,047	2,673	3,730	0,000
31	PAJCHANI_3	BANDA 3	PAJ_3	12,101	0,000	0,149	11,952	0,000	0,000
32	SELLA_ALTO_1	BANDA 2	ALTO_1	62,249	0,000	52,078	9,357	0,000	0,814
33	SELLA_ALTO_2	BANDA 3	ALTO_2	67,964	0,000	16,731	51,234	0,000	0,000
34	SELLA_ALTO_3	BANDA 4	ALTO_3	11,523	0,000	0,000	11,523	0,000	0,000
35	SELLA_ALTO_4	BANDA 5	ALTO_4	0,107	0,000	0,000	0,107	0,000	0,000
36	SELLA_BAJO_1	BANDA 1	SEL_1	5,044	0,000	0,000	0,000	2,114	2,930
37	SELLA_BAJO_2	BANDA 2	SEL_2	25,694	0,000	8,550	1,157	1,545	14,442
38	SELLA_BAJO_3	BANDA 3	SEL_3	0,252	0,000	0,185	0,067	0,000	0,000
39	TOMATITAS_1	BANDA 1	TOM_1	20,667	0,000	9,215	0,000	3,431	8,021
40	TOMATITAS_2	BANDA 2	TOM_2	14,857	0,000	12,270	0,000	0,191	2,397
41	VICTORIA_1	BANDA 1	VIC_1	2,661	0,048	1,074	0,000	0,977	0,562
42	VICTORIA_2	BANDA 2	VIC_2	26,486	3,592	13,070	6,954	2,647	0,224
43	VICTORIA_3	BANDA 3	VIC_3	14,448	1,290	0,029	13,130	0,000	0,000
44	VICTORIA_4	BANDA 4	VIC_4	12,011	0,003	0,000	12,008	0,000	0,000
45	VICTORIA_5	BANDA 5	VIC_5	6,850	0,000	0,000	6,850	0,000	0,000
46	VICTORIA_6	BANDA 6	VIC_6	2,503	0,000	0,000	2,503	0,000	0,000
TOTAL				971,7	4,932	213,321	522,196	31,327	66,332

Fuente: Elaboración propia

4.1.6.1. Uso de suelo o cobertura vegetal

Luego de clasificar cada catchment de la cuenca en estudio de acuerdo al tipo de cultivo o uso de suelo del mismo, se obtienen los datos mostrados en la Tabla 4.17.

Mediante el uso del Constructor de Expresiones se puede dar valores a los parámetros de cobertura vegetal de los catchments en base a los supuestos claves definidos, que pueden ser funciones o las ramas de una lista de un árbol esquemático de WEAP como se muestra en la Tabla 4.18.

TABLA 4.18. Expresiones de ingreso al modelo

PARÁMETRO	EXPRESIÓN
Z2	Key\Z2
Z1	Key\Z1\((TIPO DE COBERTURA)
Kc	Key\Kc\((TIPO DE COBERTURA)
Sw	Key\Sw\((TIPO DE COBERTURA)
Dw	Key\Altura\((CLASIFICION POR ALTURA)
Kd	Key\Factor_Kd\Altura\((CLASIFICION POR ALTURA)
Pfd	Key\Factor Pfd\Altura\((CLASIFICION POR ALTURA)
RRF	Key\LAI\((TIPO DE COBERTURA)*Key\Factor RRF\Altura\((CLASIFICION POR ALTURA)
Ks	Key\Ks\((TIPO DE COBERTURA)*Key\Factor Ks\Altura\((CLASIFICION POR ALTURA)

Fuente: Elaboración Propia

4.1.6.2. Clima

Los datos de ingreso del clima, es decir, precipitación, temperatura, humedad, y viento; son los recolectados del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), transformados a formato CSV reconocido por el modelo WEAP, y dispuesto como se indica en la figura 4.12.

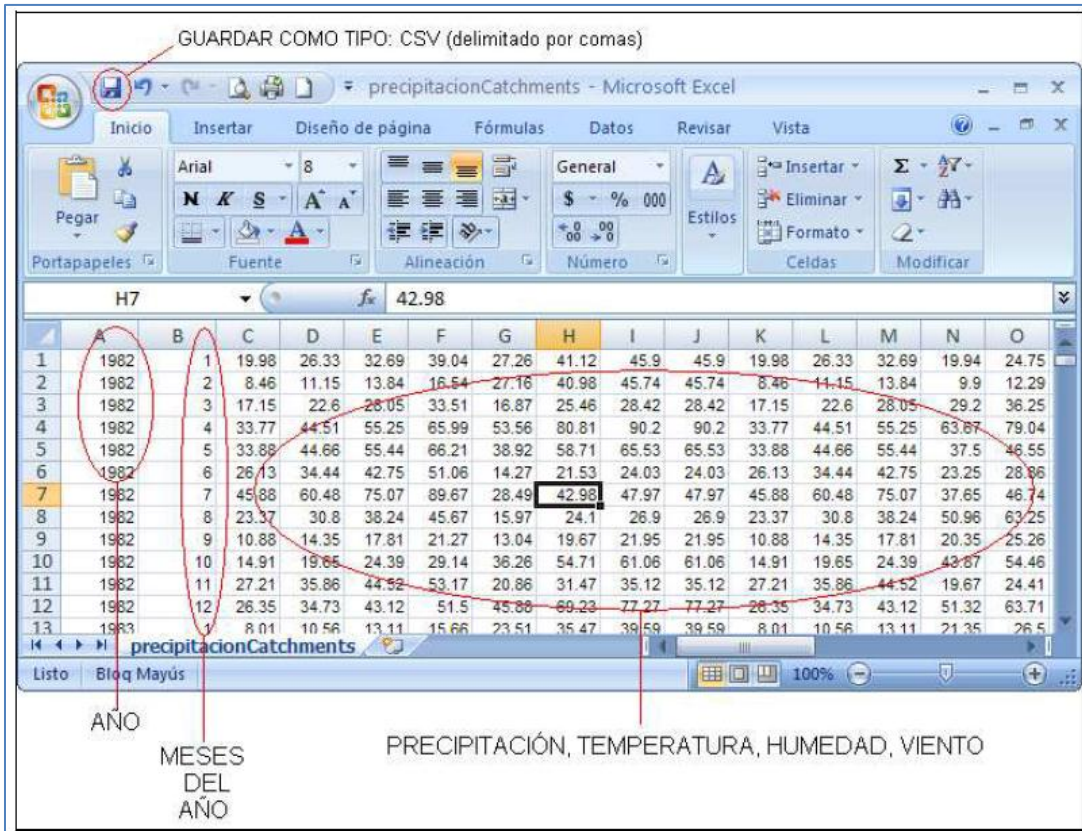


FIGURA 4.12. Datos en formato CSV

Para la temperatura, humedad y viento se utilizan los datos de las estaciones base multiplicadas o sumadas por un índice ya calculado en los supuestos claves.

A cada catchment le correspondería una determinada estación para su cálculo, si es que hubieran dos o más zonas homogéneas de temperatura, este no es el caso para el presente proyecto. La tabla 4.19, muestra la construcción de la expresión en el modelo para su cálculo.

TABLA 4.19. Expresiones para el cálculo de los parámetros meteorológicos

PARÁMETRO METEREOLÓGICO	EXPRESIÓN
Temperatura	ReadFromFile(((Carpeta de datos)\(Archivo CSV de la estación base).CSV, (#de columna)) +Key\FormTemp\(\Nombre del catchment))
Humedad	ReadFromFile(((Carpeta de datos)\(Archivo CSV de la estación base).CSV, (#de columna))
Viento	ReadFromFile(((Carpeta de datos)\(Archivo CSV de la estación base).CSV, (#de columna))

El caso de la precipitación es diferente ya que se calcula la precipitación mensual de cada catchment en base a la precipitación anual del mismo y la precipitación mensual de la estación base o índice.

$$P_c = P_e * \frac{Ll_z c}{Ll_z e}$$

Dónde:

P_c → precipitación mensual del catchment

P_e → precipitación mensual de la estación

$Ll_z c$ → precipitación promedio anual del catchment estimada con las ecuaciones

$Ll_z e$ → precipitación promedio anual de la estación estimada con datos de la estación

Las estaciones estimadas para los distintos catchments están registradas en la Tabla 4.20:

TABLA 4.20. Estaciones estimadas de la precipitación mensual de los catchments

N°	NOMBRE DEL CATCHMENT	BANDA DE ELEVACION	ETIQUETA	ESTACION ESTIMADA	SUBCUENCA	COLUMNA
1	CALAMA_1	BANDA 1	CAL_1	SAN LORENZO	1	4
2	CALAMA_2	BANDA 2	CAL_2	SAN LORENZO	1	4
3	CALAMA_3	BANDA 3	CAL_3	TRANCAS	1	10
4	CALAMA_4	BANDA 4	CAL_4	EL MOLINO	1	9
5	CALAMA_5	BANDA 5	CAL_5	EL MOLINO	1	9
6	CANASMORO1	BANDA 2	CAN_1	TRANCAS	1	10
7	CANASMORO2	BANDA 3	CAN_2	TRANCAS	1	10
8	CANASMORO3	BANDA 4	CAN_3	EL MOLINO	1	9
9	CANASMORO4	BANDA 5	CAN_4	EL MOLINO	1	9
10	COIMATA_1	BANDA 1	COI_1	COIMATA	3	2
11	COIMATA_2	BANDA 2	COI_2	COIMATA	3	2
12	COIMATA_3	BANDA 3	COI_3	TUCUMILLAS	3	1
13	COIMATA_4	BANDA 4	COI_4	TUCUMILLAS	3	1
14	ERQUIS_1	BANDA 1	ERQ_1	TUCUMILLAS	3	1
15	ERQUIS_2	BANDA 2	ERQ_2	TUCUMILLAS	3	1
16	ERQUIS_3	BANDA 3	ERQ_3	TUCUMILLAS	3	1
17	ERQUIS_4	BANDA 4	ERQ_4	TUCUMILLAS	3	1
18	ERQUIS_5	BANDA 5	ERQ_5	TUCUMILLAS	3	1
19	ERQUIS_6	BANDA 6	ERQ_6	TUCUMILLAS	3	1
20	LAJAS_1	BANDA 1	LAJ_1	CANASMORO	1	8
21	LAJAS_2	BANDA 2	LAJ_2	CANASMORO	1	8
22	LAJAS_3	BANDA 3	LAJ_3	CANASMORO	1	8
23	LAJAS_2_1	BANDA 2	JAS_1	SELLA QDAS	2	6
24	LAJAS_2_2	BANDA 3	JAS_2	SELLA QDAS	2	6
25	MAYU_1	BANDA 2	MAY_1	SELLA QDAS	2	6
26	MAYU_2	BANDA 3	MAY_2	SELLA QDAS	2	6
27	MAYU_3	BANDA 4	MAY_3	LEON CANCHA	2	7
28	MAYU_4	BANDA 5	MAY_4	LEON CANCHA	2	7
29	PAJCHANI_1	BANDA 1	PAJ_1	SAN LORENZO	1	4
30	PAJCHANI_2	BANDA 2	PAJ_2	CANASMORO	1	8
31	PAJCHANI_3	BANDA 3	PAJ_3	TRANCAS	1	10
32	SELLA_ALTO_1	BANDA 2	ALTO_1	SELLA QDAS	2	6
33	SELLA_ALTO_2	BANDA 3	ALTO_2	SELLA QDAS	2	6
34	SELLA_ALTO_3	BANDA 4	ALTO_3	LEON CANCHA	2	7
35	SELLA_ALTO_4	BANDA 5	ALTO_4	LEON CANCHA	2	7
36	SELLA_BAJO_1	BANDA 1	SEL_1	SAN LORENZO	2	4
37	SELLA_BAJO_2	BANDA 2	SEL_2	SAN LORENZO	2	4
38	SELLA_BAJO_3	BANDA 3	SEL_3	SELLA QDAS	2	6
39	TOMATITAS_1	BANDA 1	TOM_1	AASANA	2	5
40	TOMATITAS_2	BANDA 2	TOM_2	AASANA	2	5
41	VICTORIA_1	BANDA 1	VIC_1	COIMATA	3	2
42	VICTORIA_2	BANDA 2	VIC_2	LA VICTORIA	3	3
43	VICTORIA_3	BANDA 3	VIC_3	LA VICTORIA	3	3
44	VICTORIA_4	BANDA 4	VIC_4	TUCUMILLAS	3	1
45	VICTORIA_5	BANDA 5	VIC_5	TUCUMILLAS	3	1
46	VICTORIA_6	BANDA 6	VIC_6	TUCUMILLAS	3	1

Con respecto a la latitud de cada catchment, se obtienen los valores de la Tabla 4.21 del programa ARCGIS con referencia al punto medio de cada catchment.

TABLA 4.21. Valores de latitud de cada catchment

N°	NOMBRE DEL CATCHMENT	LATITUD	N°	NOMBRE DEL CATCHMENT	LATITUD
1	CALAMA_1	-21,429088	24	LAJAS_2_2	-21,351217
2	CALAMA_2	-21,417771	25	MAYU_1	-21,312669
3	CALAMA_3	-21,416332	26	MAYU_2	-21,255512
4	CALAMA_4	-21,441873	27	MAYU_3	-21,237544
5	CALAMA_5	-21,464683	28	MAYU_4	-21,230731
6	CANASMORO1	-21,314757	29	PAJCHANI_1	-21,399327
7	CANASMORO2	-21,300085	30	PAJCHANI_2	-21,38575
8	CANASMORO3	-21,292799	31	PAJCHANI_3	-21,371705
9	CANASMORO4	-21,249981	32	SELLA_ALTO_1	-21,374919
10	COIMATA_1	-21,489772	33	SELLA_ALTO_2	-21,331216
11	COIMATA_2	-21,490995	34	SELLA_ALTO_3	-21,316725
12	COIMATA_3	-21,497008	35	SELLA_ALTO_4	-21,245168
13	COIMATA_4	-21,50733	36	SELLA_BAJO_1	-21,416497
14	ERQUIS_1	-21,481044	37	SELLA_BAJO_2	-21,394971
15	ERQUIS_2	-21,469832	38	SELLA_BAJO_3	-21,363791
16	ERQUIS_3	-21,471559	39	TOMATITAS_1	-21,461981
17	ERQUIS_4	-21,500493	40	TOMATITAS_2	-21,452458
18	ERQUIS_5	-21,52024	41	VICTORIA_1	-21,496506
19	ERQUIS_6	-21,511068	42	VICTORIA_2	-21,529692
20	LAJAS_1	-21,396607	43	VICTORIA_3	-21,543697
21	LAJAS_2	-21,366385	44	VICTORIA_4	-21,551228
22	LAJAS_3	-21,360406	45	VICTORIA_5	-21,561115
23	LAJAS_2_1	-21,368822	46	VICTORIA_6	-21,558673

Fuente: Elaboración propia

El clima está condicionado por la latitud, la altitud y la continentalidad.

Los valores de la latitud son negativos porque la cuenca del río Guadalquivir se encuentra en el hemisferio sur.

4.1.6.3. Medidores de caudal

Un medidor de caudal se compara con una estación hidrológica, facilita la comparación del caudal observado (medido en sitio) y el caudal simulado, ambos en términos de cantidad y cualidad. Su lectura es a través de un archivo CSV usado por el modelo WEAP.

Las estaciones hidrológicas utilizadas en la calibración, validación y aplicación de modelo WEAP para la cuenca Alta del río Guadalquivir, son las establecidas en la Tabla 4.22.

TABLA 4.22. Estaciones hidrológicas usadas para medidores de caudal

ESTACIÓN	UBICACIÓN		ALTURA (msnm)
	LATITUD S:	LONGITUD W:	
CANASMORO	21° 21' 24"	64° 44' 54"	2085
SELLA QDAS	21° 23' 12"	64° 41' 03"	2119
OBRAJES	21° 30' 21"	64° 45' 46"	1922

Fuente: Elaboración propia

4.2 Calibración del modelo WEAP para la cuenca Alta del río Guadalquivir

La calibración se realiza manualmente con el objetivo de que los caudales producidos por el modelo sigan el comportamiento de los caudales medidos en las subcuencas de calibración.

En la etapa de calibración del modelo se busca lograr un conjunto de parámetros hidrológicos y operaciones que permitan obtener una representación de caudales y de operación de obras de infraestructura que asemeje los datos históricos de la forma más cercana posible. Para esto, es necesario realizar comparaciones entre series de datos de caudales en puntos específicos de la cuenca observadas versus simuladas, así como comparar los datos de niveles de reservorios observados versus simulados así como otras variables que representen la operación de los recursos hídricos en una cuenca. Con base en estas comparaciones se realizan medidas estadísticas para estimar la precisión del modelo y de esta manera ajustar los parámetros hasta lograr la mejor respuesta de dichas medidas estadísticas.

El proceso de calibración del modelo desarrollado de acuerdo al análisis de oferta y demanda de agua se realiza en tres etapas consecutivas. Estas etapas permiten revisar el

comportamiento del modelo primero en las subcuencas aportantes que corresponden a zonas de régimen natural, luego en las subcuencas intermedias y finalmente en las subcuencas bajas.

Se definen la subcuencas aportantes de calibración en la parte alta de la cuenca: Canasmoro y Sella.

4.2.1. Calibración de las subcuencas aportantes

La primera etapa consiste en una calibración hidrológica de las subcuencas aportantes. Se espera que la influencia humana en estas subcuencas sea baja y por lo tanto los caudales no son afectados por el uso o manejo del recurso. De suma importancia en esta etapa del proceso de calibración es el análisis de las características hidrológicas particulares asociadas a los ecosistemas que sean relevantes en la cuenca en estudio. Igualmente importante es la revisión de la literatura existente.

En una primera aproximación es una buena práctica establecer factores de calibración generales para toda el área mencionada, los cuales modifican los parámetros de uso de suelo incluyendo, principalmente:

- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces, Sw
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda, Dw
- Factor de resistencia a la escorrentía, RRF
- Conductividad de zona de raíces, Ks
- Conductividad de zona profunda, Kd
- Dirección preferencial de flujo, f

En la ecuación del balance de masa del modelo WEAP para el balde superior y en el balde inferior del módulo hidrológico, se observa como cada término de la ecuación que corresponde a un elemento del balance hidrológico es afectado de forma diferente por los parámetros indicados.

Balde Superior:

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t)\left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3}\right) - P_e(t)z_{1,j}^{\frac{RRF_j}{2}} - f_j k_s z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_s z_{1,j}^2$$

Ec. 4.1

Dónde:

1er término: Cambio en humedad del suelo

2do factor: Precipitación efectiva (incluye riego y derretimiento de nieves)

3er término: Evapotranspiración

4to factor: Escorrentía superficial

5to término: Flujo intermedio

6to factor: Percolación

Balde Inferior:

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d z_{1,j}^2 + (1 - f_j)k_s z_{2,j}^2$$

Ec. 4.2.

Dónde:

1er término: Flujo base

2do término: Percolación

Generalmente se busca ajustar caudales pico y caudales base. Por ejemplo, si se busca aumentar la respuesta de caudales pico, se debe ajustar la escorrentía superficial la cual es directamente afectada por el RRF y K_s , los cuales afectan la reactividad de los catchments. Por otro lado, si se quiere afectar los caudales base se debe ajustar f y K_d . Nótese que la relación entre los diferentes términos de la ecuación es no-lineal y por lo tanto al afectar un término, se afectan los otros de forma indirecta. Por ejemplo, otro factor de calibración

como la conductividad hidráulica de la zona profunda, K_d , puede ser incrementado, aumentando la conductividad, y por tanto la descarga de los perfiles profundos, y el consecuente aumento en los caudales base. Por otro lado, si se aumenta la capacidad hídrica del perfil superior, Sw , se logra un mayor flujo sub-superficial, y por tanto un aumento de los caudales máximos. Finalmente para el parámetro de capacidad de retención de humedad en el perfil profundo (Dw), regula la transmisión de los flujos a los caudales base. (17)

De esta forma, dependiendo del elemento del caudal que se requiera mejorar, se debe ajustar el o los parámetros correspondientes. Una vez ajustados los factores de calibración necesarios, se realiza la comparación de los caudales modelados con los registros históricos de estaciones de aforo de caudales de la zona. Para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y los valores simulados se pueden utilizar dos índices/métricas utilizadas normalmente en la calibración de modelos hidrológicos: el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el sesgo (o Bias o desviación relativa de los caudales). Además para una mejor correlación de los datos obtenidos se obtiene el coeficiente de correlación de R y el error medio cuadrático (RMSE).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{n-1}}$$

Ec. 4.3

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})}{n}$$

Ec. 4.4

$$Ef = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}$$

Ec. 4.5

Donde $Q_{s,i}$ y $Q_{o,i}$ son caudales simulados y observados para cada paso de tiempo i , y n es el número de datos existentes para la correlación.

Luego de obtener un buen ajuste entre los caudales simulados y los observados de forma visual, se procede a estimar las estadísticas mencionadas las cuales sirven para determinar en qué sentido se debe ajustar la calibración en pasos subsiguientes.

En general, el criterio para interpretar las estadísticas es el siguiente:

- Nash-Sutcliffe (Ef): mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, $E=1$; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $E=0$. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la siguiente tabla.

TABLA 4.23. Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Fuente: Cabrera, 2011

- Bias: entre menor el porcentaje de Bias, mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados. Un Bias positivo indica sobreestimación y un Bias negativo indica sub-estimación de caudales.
- Coeficiente de Correlación (R): mientras más tienda a uno hay una mejor correlación de la observación con la simulación.
- Error medio cuadrático (RMSE): La raíz del error cuadrático medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito (positivo). El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste.

4.2.1.1. Calibración de la subcuenca aportante Canasmoro

La primera subcuenca aportante de calibración es la del río Guadalquivir hasta la ubicación de la estación Canasmoro. El período de calibración de esta subcuenca es de 1980 a 1984, ya que se puede comparar con la estación Canasmoro que registra datos observados del período de 1980 a 1988.

En la primera corrida se considera todos los datos de ingreso del modelo, descritos en la sección anterior, y se procede a evaluar los índices de correlación (figura 4.13)

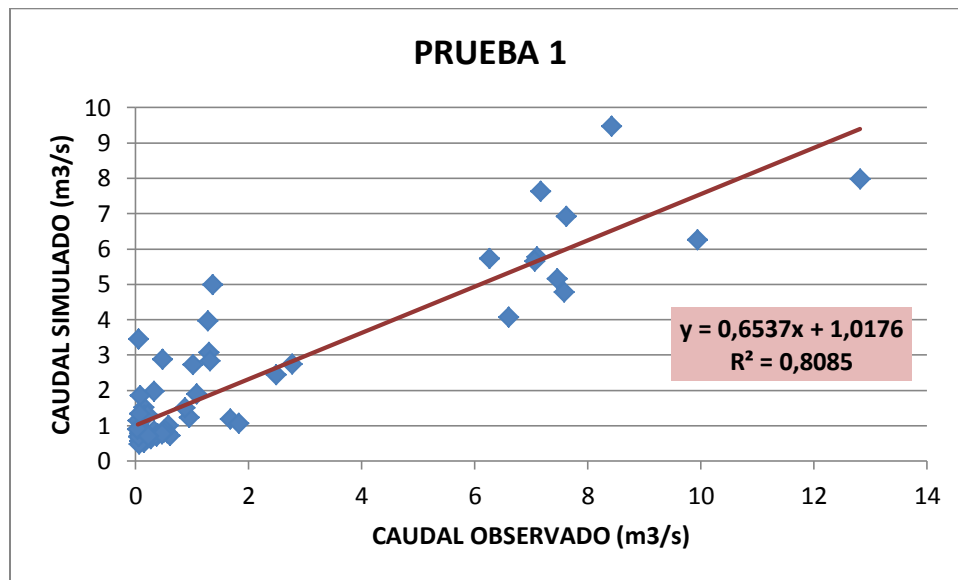


FIGURA 4.13. Coeficiente de determinación Prueba 1, subcuenca Canasmoro

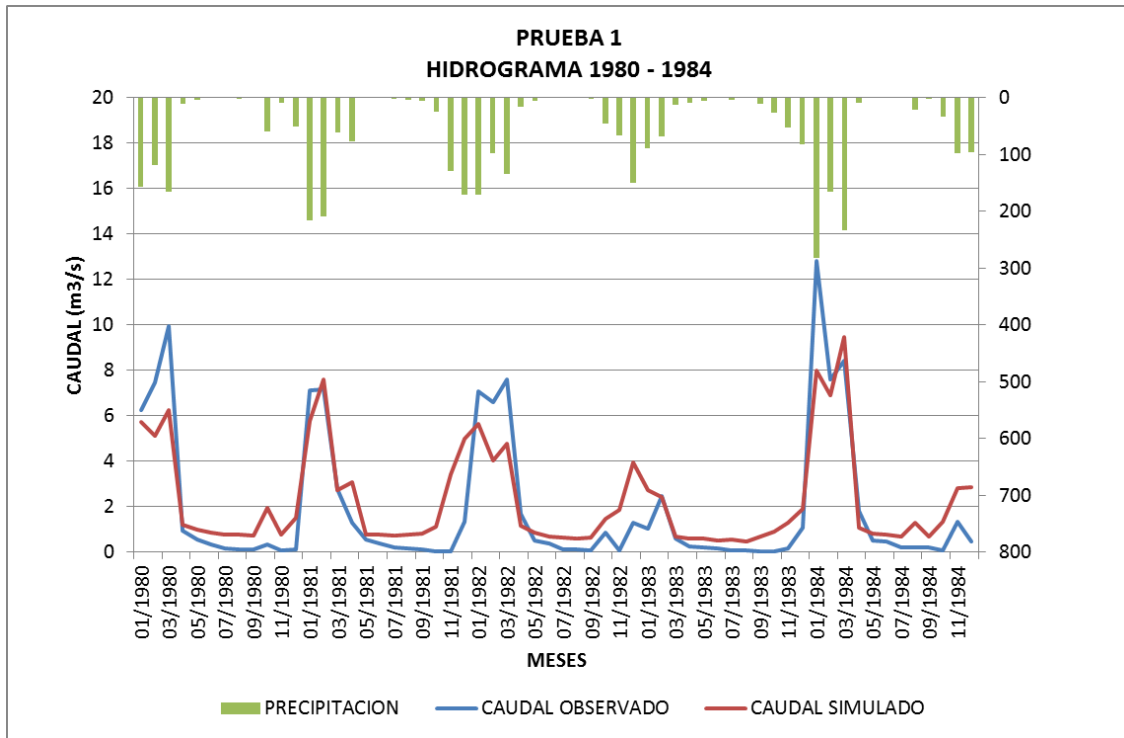


FIGURA 4.14. Hidrograma obtenido en la Prueba 1, subcuenca Canasmoro

En la figura 4.14, se observa el caudal simulado y el caudal observado, así como la precipitación que le corresponde. A continuación, en la tabla 4.24, se muestra los valores de los índices de correlación y los resultados obtenidos de variar los parámetros indicados en las pruebas subsecuentes de calibración para la subcuenca Canasmoro.

TABLA 4.24. Resultados obtenidos en las pruebas de calibración de la subcuenca Canasmoro

SUPUESTO CLAVE		PRUEBAS DE CALIBRACIÓN								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ks	BOSQUE	150	150	150	150	120	120	120	120	150
	CULTIVOS FRUTALES	150	150	150	150	120	120	120	120	150
	CULTIVOS MAIZ	150	150	150	150	120	120	120	120	150
	MATORRAL	150	150	150	150	120	120	120	120	150
	PASTO	150	150	150	150	120	120	120	120	150
Sw	BOSQUE	750	750	500	500	400	400	400	400	500
	CULTIVOS FRUTALES	500	500	300	300	250	250	250	250	300
	CULTIVOS MAIZ	1000	1000	700	700	500	500	500	500	700
	MATORRAL	950	950	700	700	500	500	500	500	700
	PASTO	950	950	700	700	500	500	500	500	700
Kd	ALTO	100	20	20	20	20	20	20	20	20
	MEDIO	50	20	20	10	10	10	10	10	15
	BAJO	30	20	20	10	10	10	10	10	10
Dw	ALTO	2000	2000	500	300	200	200	200	200	300
	MEDIO	8000	8000	1000	600	500	500	500	500	600
	BAJO	15000	15000	2000	1000	800	800	800	800	1000
RRF	ALTO	0,4	0,4	1	1	0,3	1	1	1	1
	MEDIO	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,7	0,6
	BAJO	1	1	0,1	0,1	0,1	0,1	2	2	0,4
Pfd	ALTO	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
	MEDIO	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,4	0,4	0,5
	BAJO	0,15	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,2	0,2	0,3
Z1	BOSQUE	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
	CULTIVOS FRUTALES	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5
	CULTIVOS MAIZ	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5
	MATORRAL	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
	PASTO	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Z2		0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
RMSE =		1,487	1,444	1,429	1,438	1,495	1,540	2,282	2,647	2,555
BIAS =		2,173	2,050	2,008	2,034	2,197	2,333	5,122	6,892	6,419
Ef =		0,765	0,778	0,783	0,780	0,762	0,748	0,446	0,255	0,306
R =		0,899	0,899	0,902	0,901	0,898	0,905	0,864	0,797	0,822

Se observa que la prueba que trae mejores resultados para la subcuenca Canasmoro es la prueba de calibración 3, dichos resultados se obtuvieron al variar la capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (Sw), la capacidad de almacenamiento de

agua en la zona profunda (Dw) y especialmente el factor de resistencia a la escorrentía (RRF). Estos parámetros se cambiaron buscando disminuir el caudal base y a la vez tratar de mantener los caudales máximos que se simulan en la subcuenca.

En la figura 4.15 y 4.16 se observan los resultados de la prueba 3.

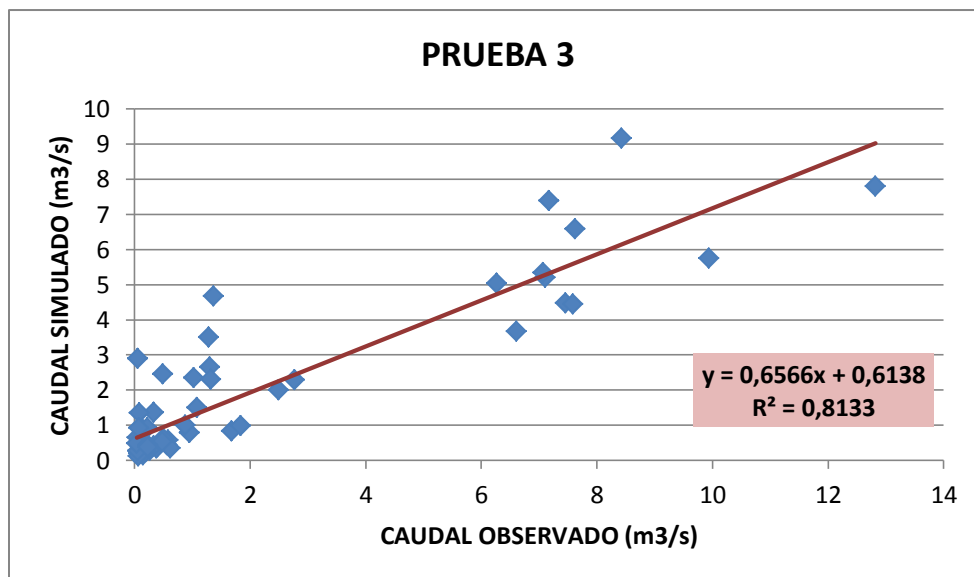


FIGURA 4.15. Coeficiente de determinación Prueba 3, subcuenca Canasmoro

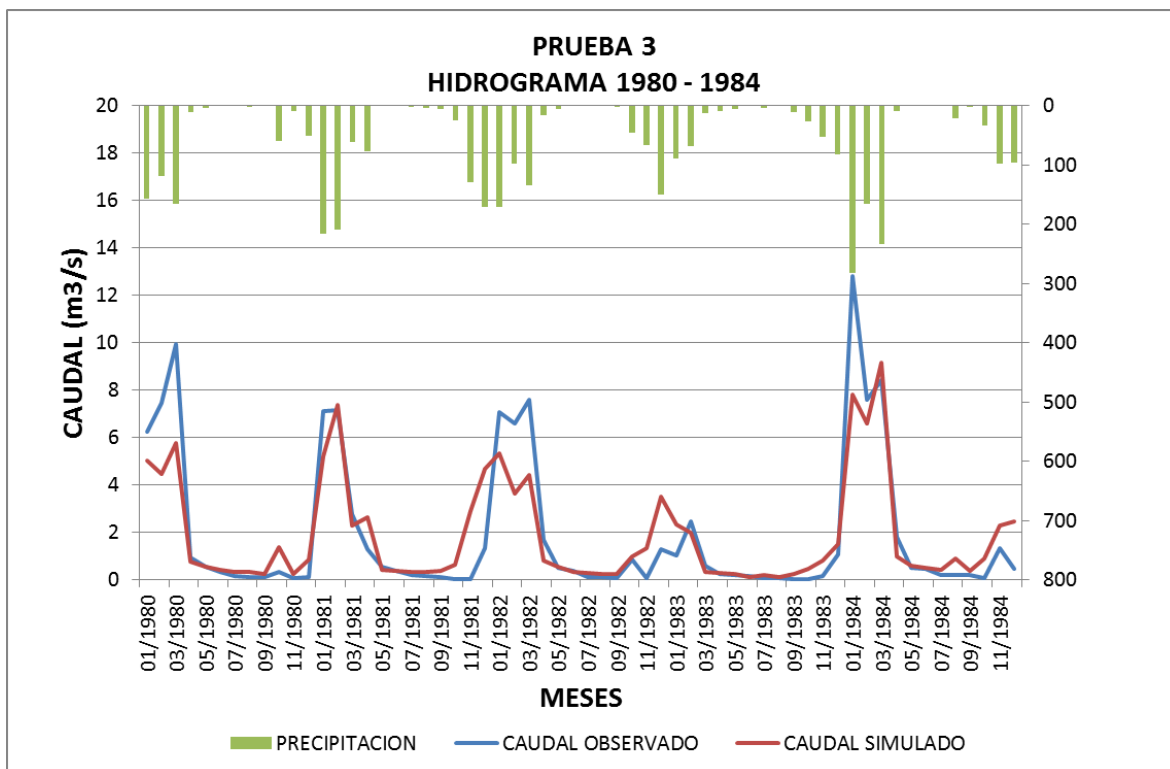


FIGURA 4.16. Hidrograma obtenido en la Prueba 3, subcuenca Canasmoro

4.2.1.2. Calibración de la subcuenca aportante Sella

La siguiente subcuenca aportante es la del río Sella, y se calibra de igual manera que la anterior, la primera corrida considera los datos de ingreso del modelo sin ninguna variación de los parámetros. La única diferencia es que debido a la disponibilidad de información la estación de caudales observados en Sella Qdas solo tiene registros del periodo 1979 – 1984, es por eso que su calibración se hará sobre el periodo de 1979 – 1981.

En las figuras 4.17 y 4.18 se observa los resultados obtenidos con la prueba 1 para la calibración de la subcuenca Sella.

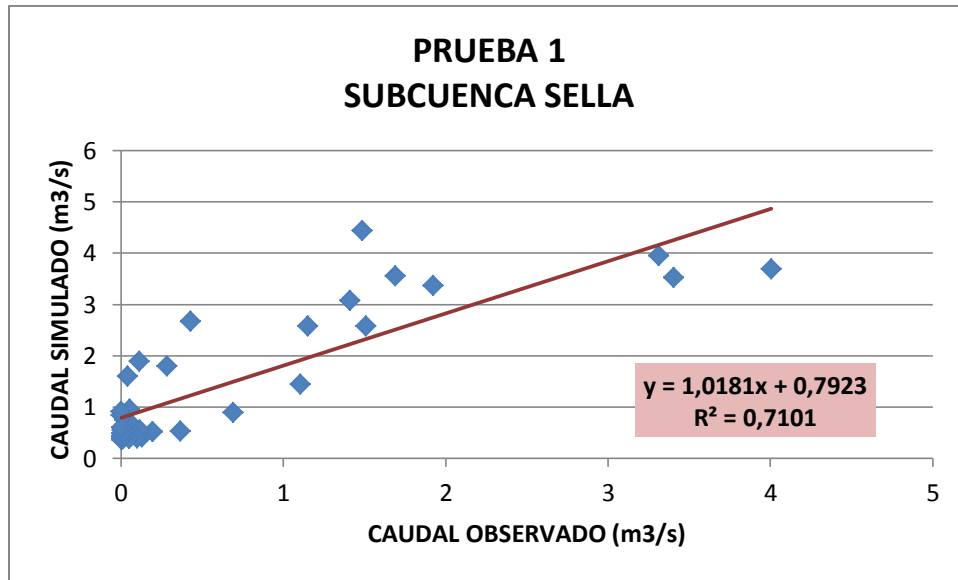


FIGURA 4.17. Coeficiente de determinación Prueba 1, subcuena Sella

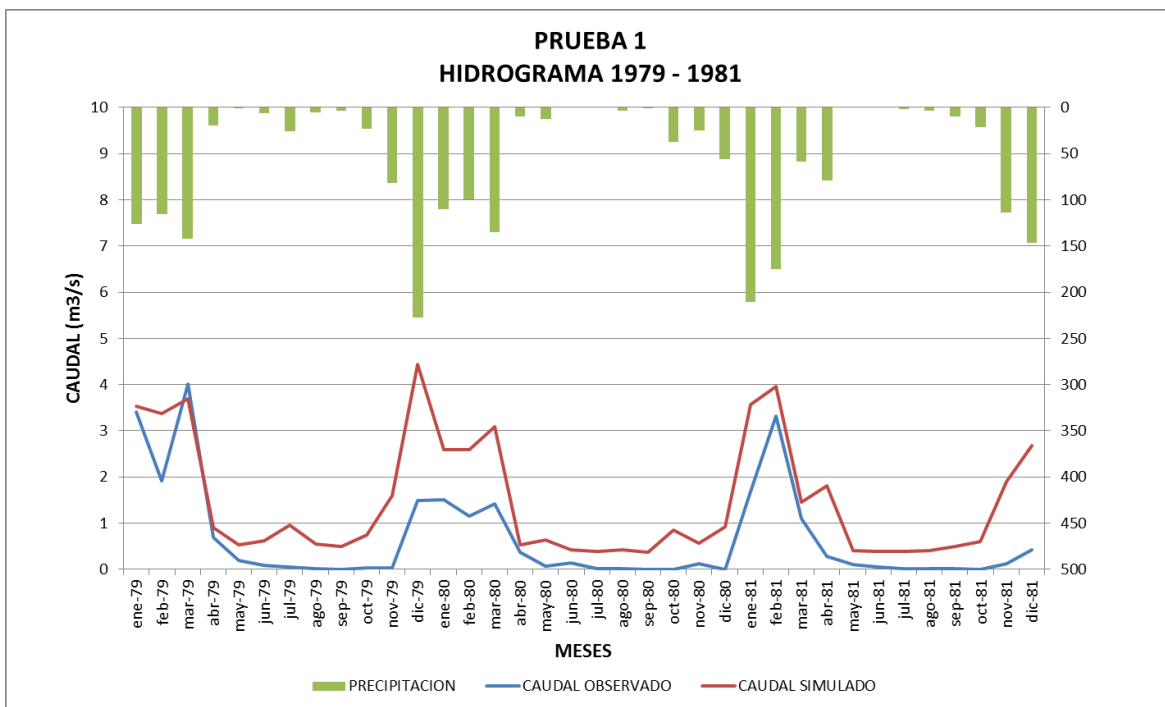


FIGURA 4.18. Hidrograma obtenido en la Prueba 1, subcuena Sella

La tabla 4.25 contiene los resultados de las pruebas de calibración realizadas para la subcuenca Sella.

TABLA 4.25. Resultados obtenidos en las pruebas de calibración de la subcuenca Sella

SUPUESTO CLAVE		PRUEBAS DE CALIBRACIÓN								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ks	BOSQUE	150	150	150	150	120	120	120	120	150
	CULTIVOS FRUTALES	150	150	150	150	120	120	120	120	150
	CULTIVOS MAIZ	150	150	150	150	120	120	120	120	150
	MATORRAL	150	150	150	150	120	120	120	120	150
	PASTO	150	150	150	150	120	120	120	120	150
Sw	BOSQUE	750	750	500	500	400	400	400	400	500
	CULTIVOS FRUTALES	500	500	300	300	250	250	250	250	300
	CULTIVOS MAIZ	1000	1000	700	700	500	500	500	500	700
	MATORRAL	950	950	700	700	500	500	500	500	700
	PASTO	950	950	700	700	500	500	500	500	700
Kd	ALTO	100	20	20	20	20	20	20	20	20
	MEDIO	50	20	20	10	10	10	10	10	15
	BAJO	30	20	20	10	10	10	10	10	10
Dw	ALTO	2000	2000	500	300	200	200	200	200	300
	MEDIO	8000	8000	1000	600	500	500	500	500	600
	BAJO	15000	15000	2000	1000	800	800	800	800	1000
RRF	ALTO	0,4	0,4	1	1	0,3	1	1	1	1
	MEDIO	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,7	0,6
	BAJO	1	1	0,1	0,1	0,1	0,1	2	2	0,4
Pfd	ALTO	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
	MEDIO	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,4	0,4	0,5
	BAJO	0,15	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,2	0,2	0,3
Z1	BOSQUE	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
	CULTIVOS FRUTALES	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5
	CULTIVOS MAIZ	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5
	MATORRAL	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
	PASTO	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Z2		0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
RMSE =		1,069	0,989	0,977	0,955	1,261	0,839	0,732	0,787	0,778
BIAS =		1,111	0,952	0,928	0,886	1,545	0,685	0,520	0,602	0,588
Ef =		-0,014	0,131	0,153	0,191	-0,411	0,374	0,525	0,450	0,463
R =		0,843	0,846	0,850	0,850	0,811	0,863	0,815	0,757	0,773

En la prueba de calibración 7 se obtienen los mejores resultados para la subcuenca, variando esencialmente los parámetros: capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (Sw), la capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (Dw) y especialmente el factor de resistencia a la escorrentía (RRF). Las figuras 4.19 y 4.20 se aprecian los resultados obtenidos en esta prueba.

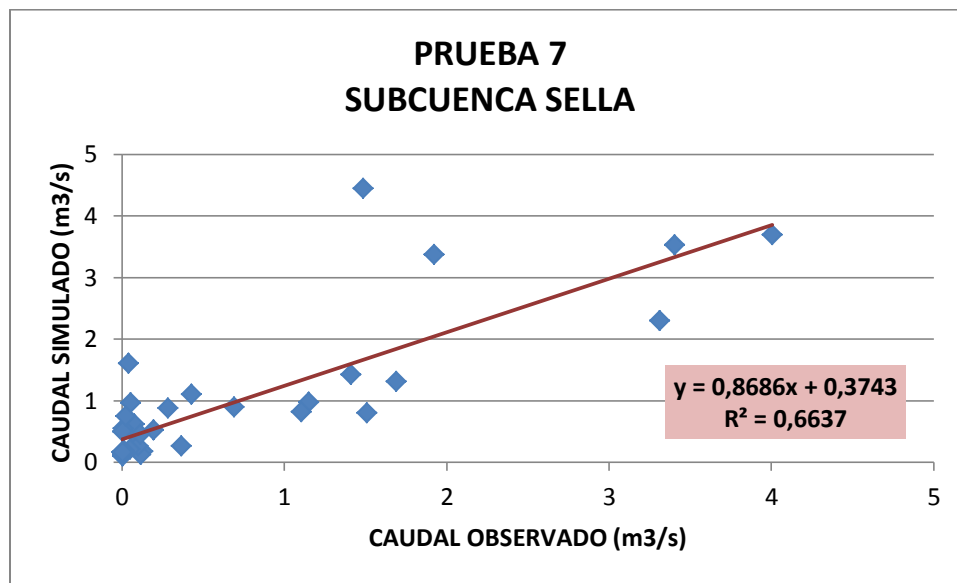


FIGURA 4.19. Coeficiente de determinación Prueba 7, subcuenca Sella

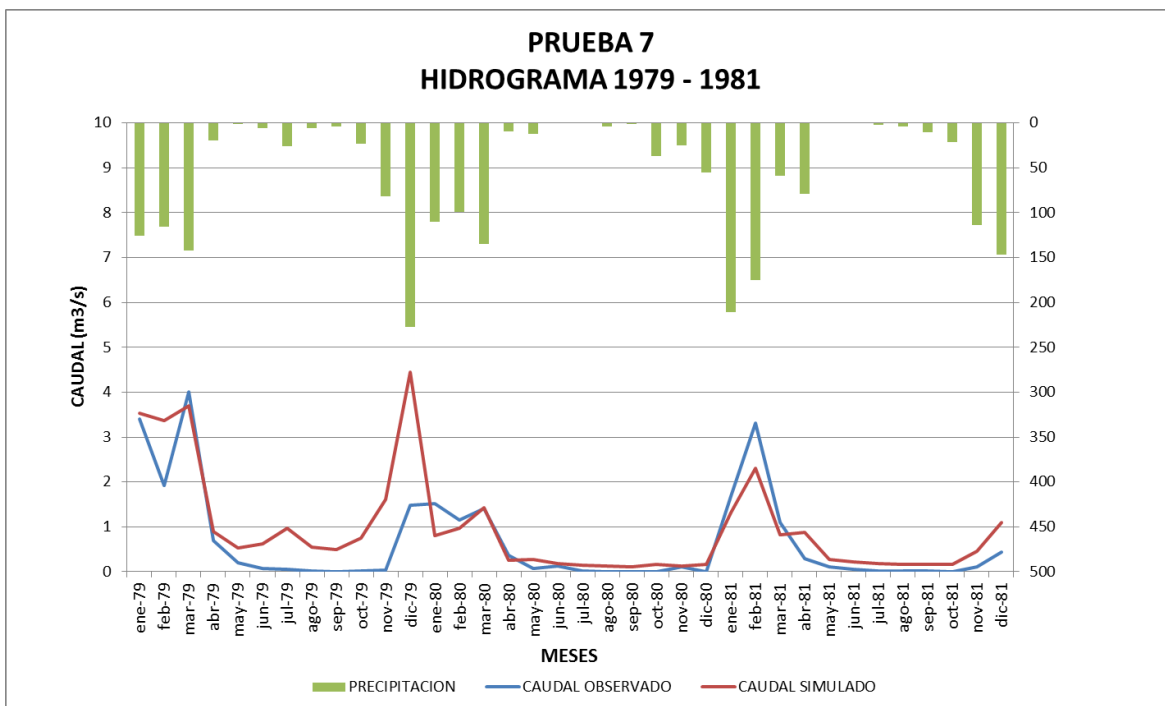


FIGURA 4.20. Hidrograma obtenido en la Prueba 7, subcuenca Sella

También se destacan los resultados de la prueba de calibración 9, cuyos parámetros se diferencian de la prueba 7, esencialmente en el factor de resistencia a la escorrentía (RRF), la conductividad en la zona de raíces (Ks) y el almacenamiento en la zona de raíces (Sw).

A continuación se presentan los resultados de la prueba de calibración 9 (Figuras 4.21 y 4.22).

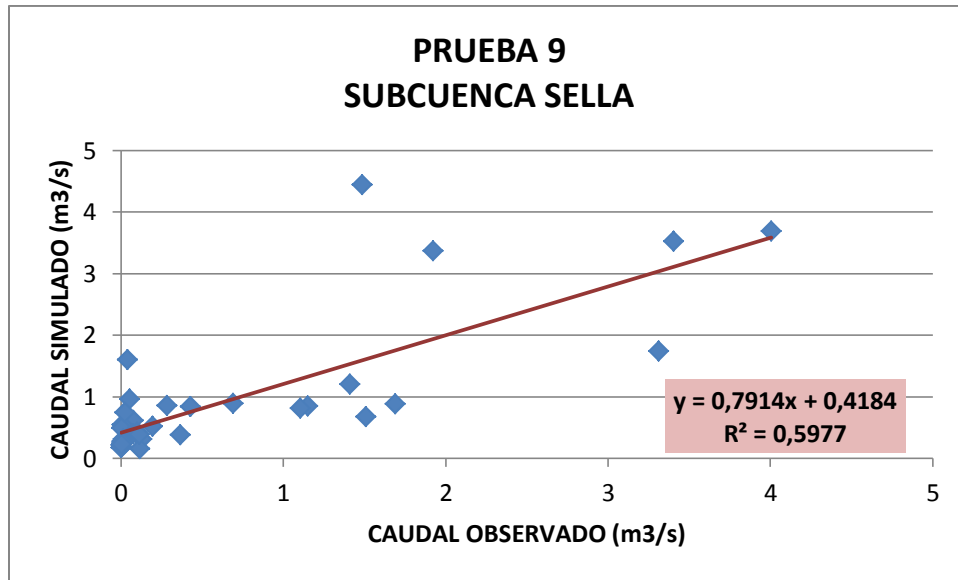


FIGURA 4.21. Coeficiente de determinación Prueba 9, subcuena Sella

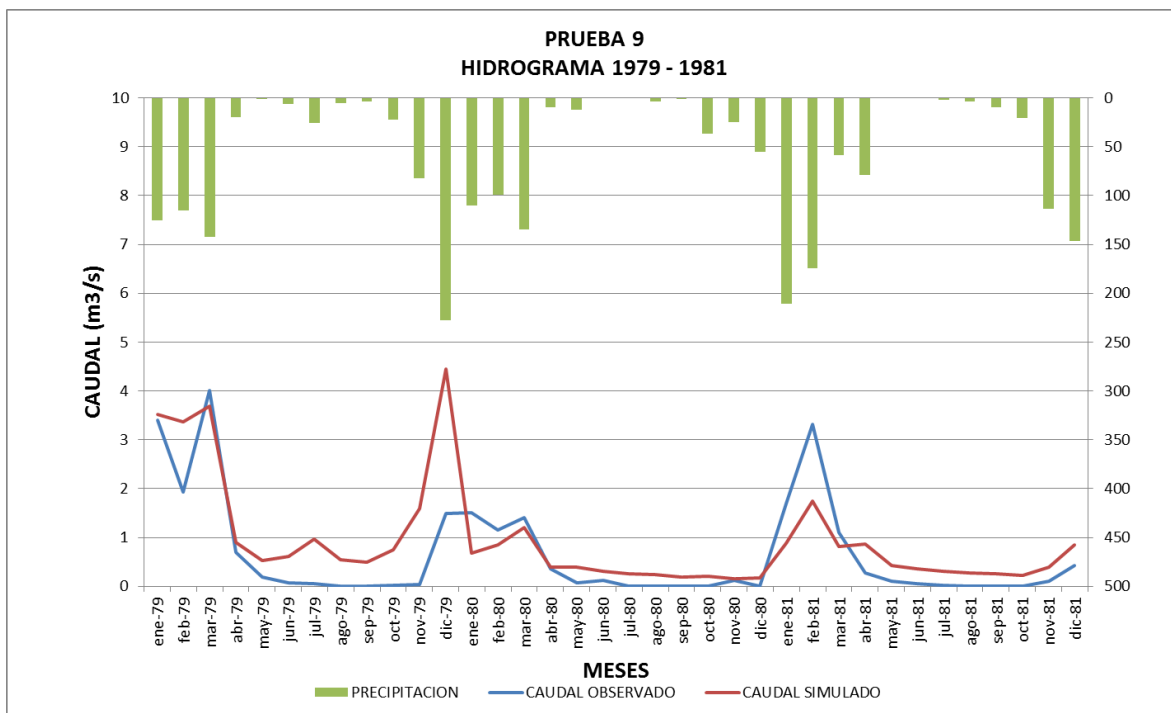


FIGURA 4.22. Hidrograma obtenido en la Prueba 9, subcuena Sella

4.3. Validación del modelo WEAP para las subcuencas aportantes Canasmoro y Sella

El objetivo de la validación es demostrar que el método es apto para el propósito previsto y que los resultados tienen una incertidumbre aceptable. La verificación debe entregar información sobre la representatividad, repetibilidad y reproducibilidad del método.

4.3.1. Validación de la subcuenca aportante Canasmoro

A continuación se muestra los resultados de validación obtenidos en la subcuenca aportante Canasmoro, el período para la validación es 1985 - 1988.

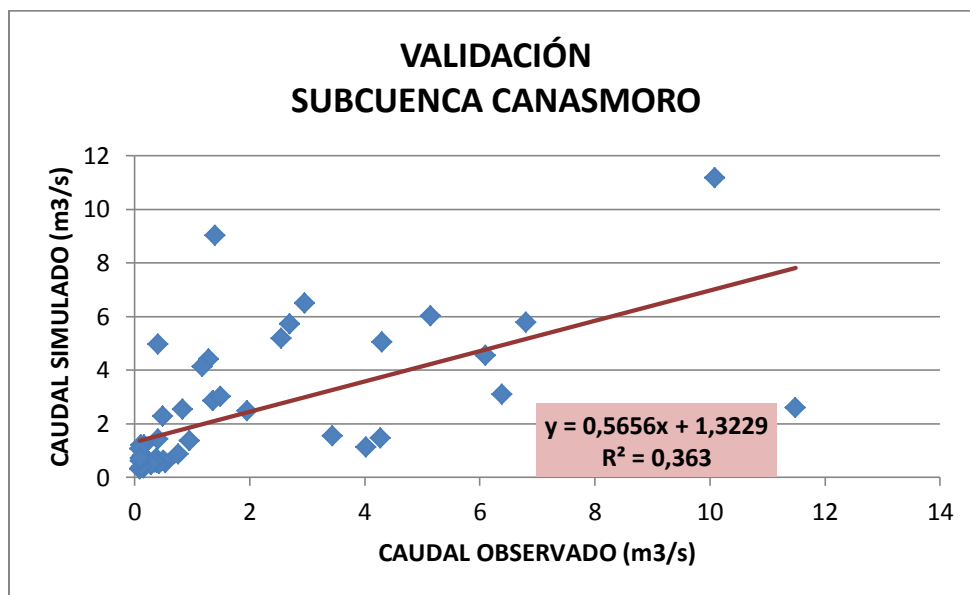


FIGURA 4.23. Coeficiente de determinación en la validación de la subcuenca Canasmoro

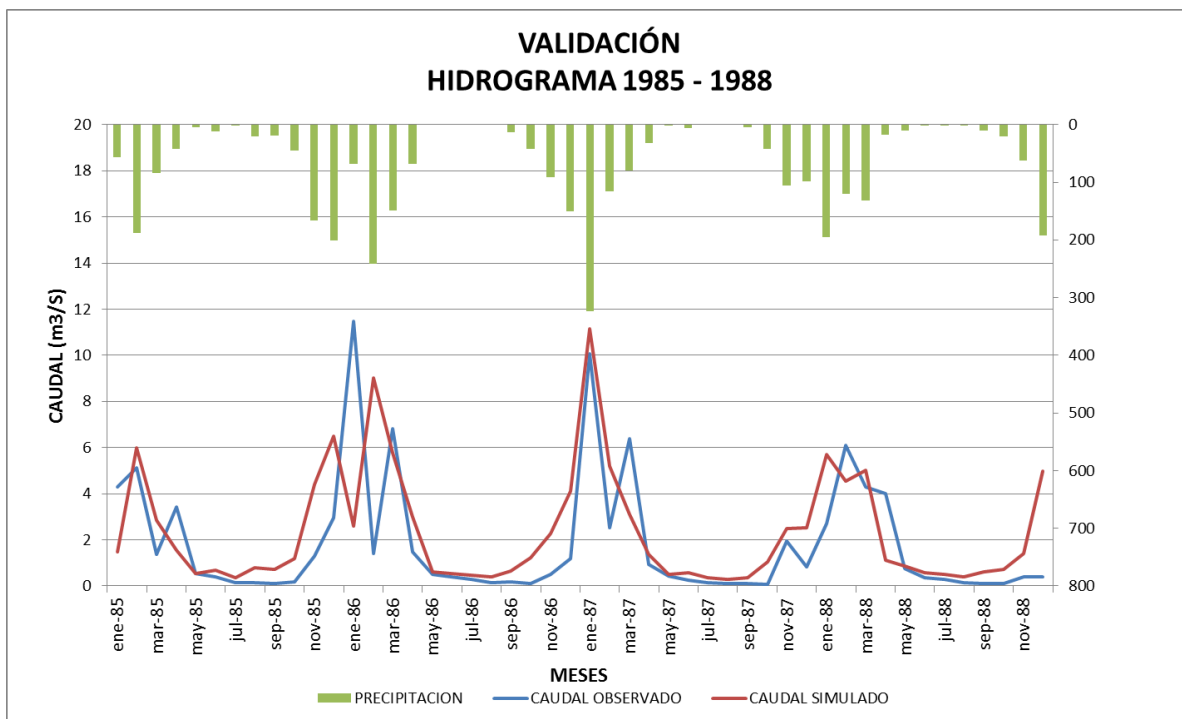


FIGURA 4.24. Hidrograma obtenido en la validación de la subcuenca Canasmoro

TABLA 4.26. Resultados obtenidos en la validación de la subcuenca Canasmoro

RMSE =	2,349
BIAS =	5,402
Ef =	0,209
R =	0,602

4.3.2. Validación de la subcuenca aportante Sella

El periodo de validación para la subcuenca aportante Sella es 1982 – 1984, los resultados se muestran a continuación.

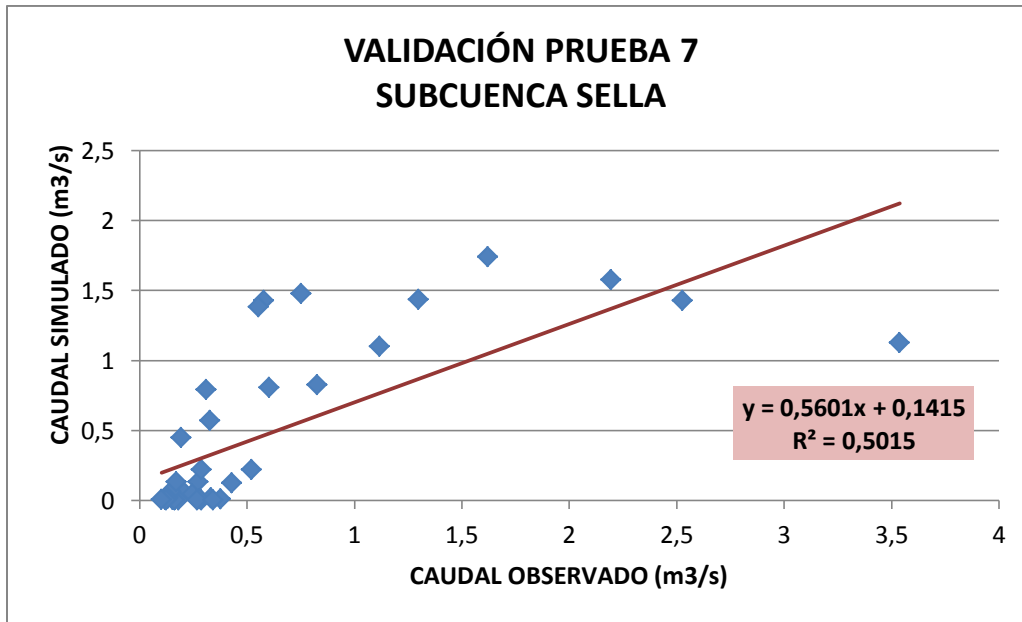


FIGURA 4.25. Coeficiente de determinación en la validación de la prueba 7, subcuena Sella

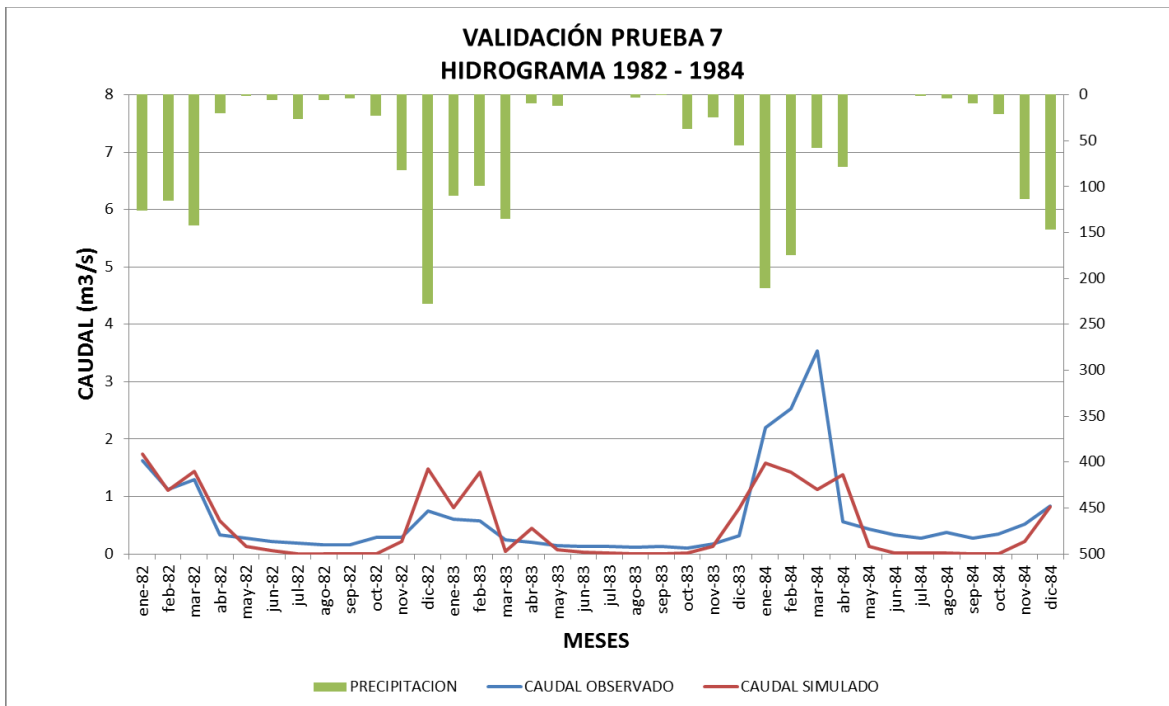


FIGURA 4.26. Hidrograma obtenido en la validación de la prueba 7, subcuena Sella

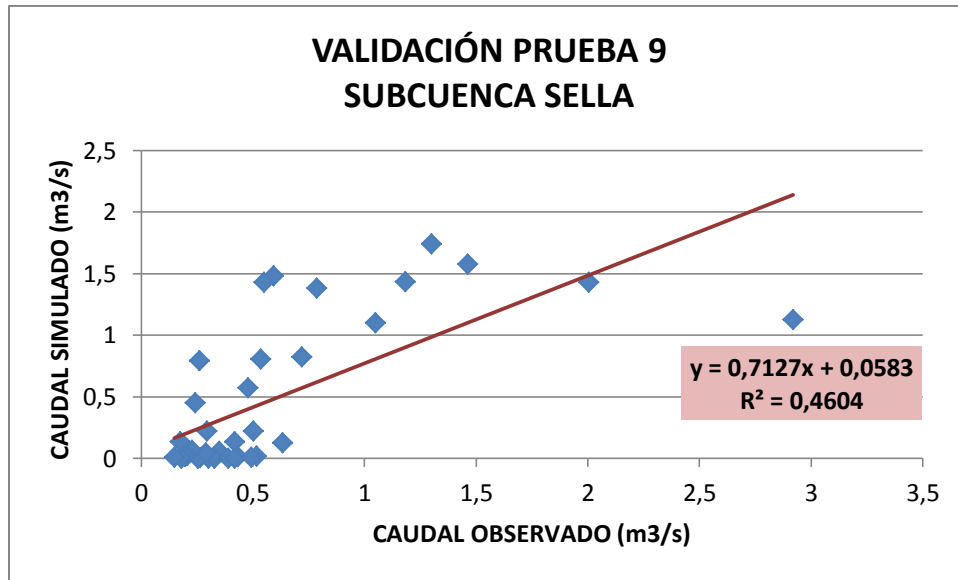


FIGURA 4.27. Coeficiente de determinación en la validación de la prueba 9, subcuenca Sella

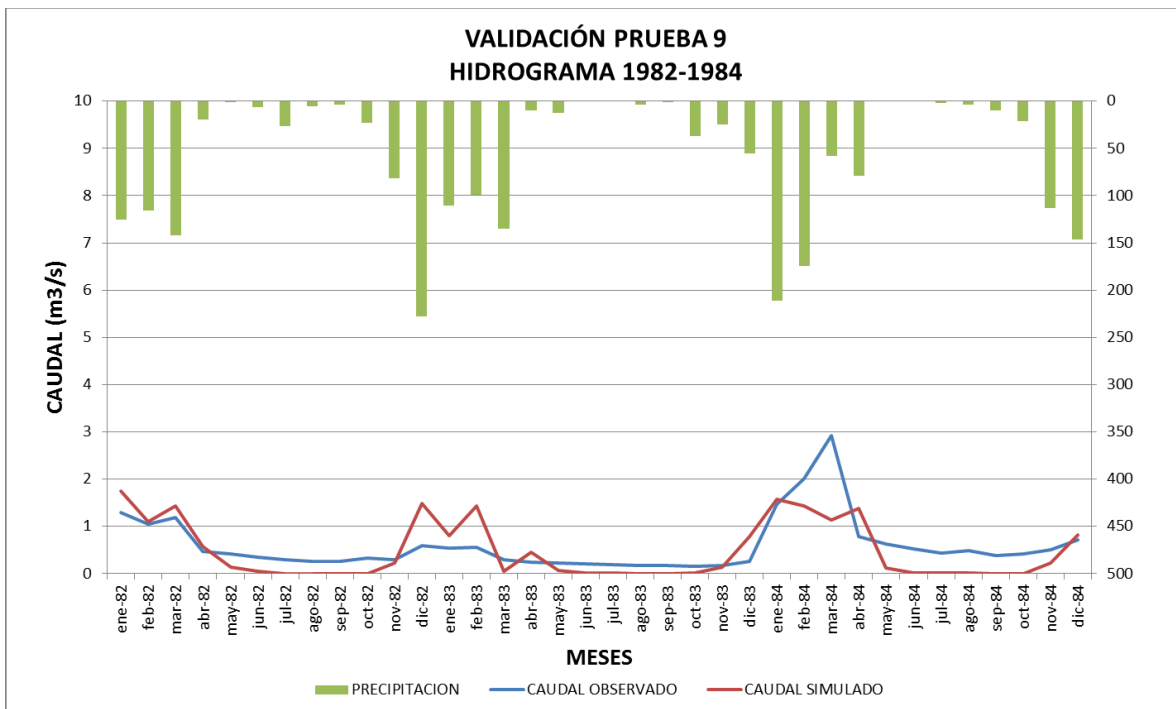


FIGURA 4.28. Hidrograma obtenido en la validación de la prueba 9, subcuenca Sella

TABLA 4.27. Resultados obtenidos en la validación de la subcuenca Sella

	PRUEBA 7	PRUEBA 9
RMSE =	0,554	0,484
BIAS =	0,299	0,228
Ef =	0,184	0,372
R =	0,708	0,679

4.4. Aplicación del modelo WEAP sobre la cuenca Alta del río Guadalquivir (hasta la estación de Obrajes)

Para la aplicación del modelo WEAP sobre la cuenca Alta del río Guadalquivir, se considera un periodo diferente (1999 – 2007), debido a la falta de información hidrológica para comparar los resultados que se obtienen de la modelación.

A pesar de tener varias estaciones hidrológicas dentro de la cuenca en estudio, solo nueve de ellas contienen información hidrológica confiable, sin tener gran extensión de datos. Además, no se cuenta con una estación que registre caudales a la altura de la quebrada San Pedro del municipio de Tarija (Cercado) que es hasta donde tradicionalmente se considera la desembocadura de la cuenca Alta del río Guadalquivir, es por este motivo que la modelación a realizarse se cierra en la estación de Obrajes.

4.4.1. Modelación de la cuenca Alta del río Guadalquivir, utilizando los parámetros de calibración de la subcuenca Canasmoro

Al aplicar los parámetros de calibración de la subcuenca Canasmoro para la cuenca Alta del Río Guadalquivir, se obtienen los siguientes resultados (figura 4.29 y figura 4.30).

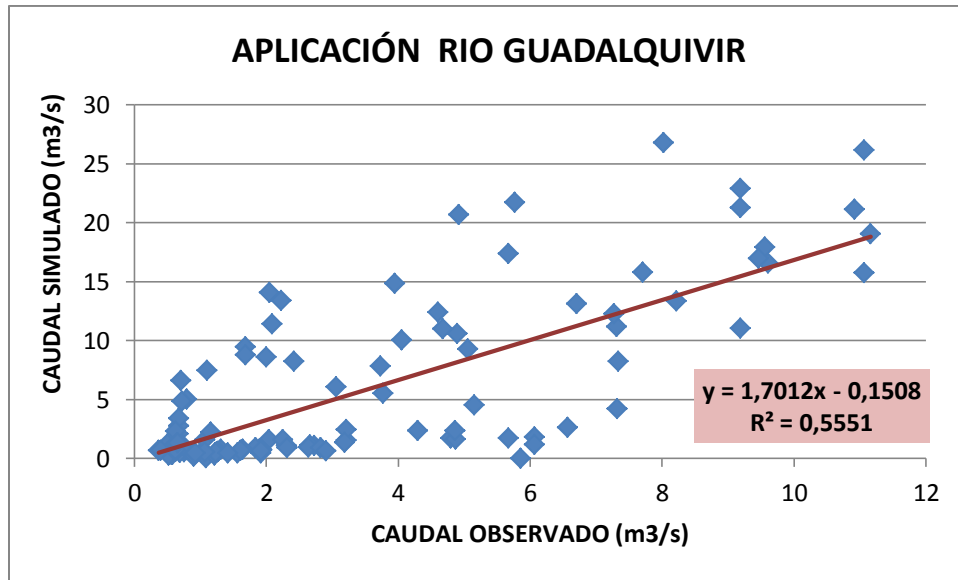


FIGURA 4.29. Coeficiente de determinación de la Aplicación al río Guadalquivir, de los parámetros de calibración de la subcuenca Canasmoro

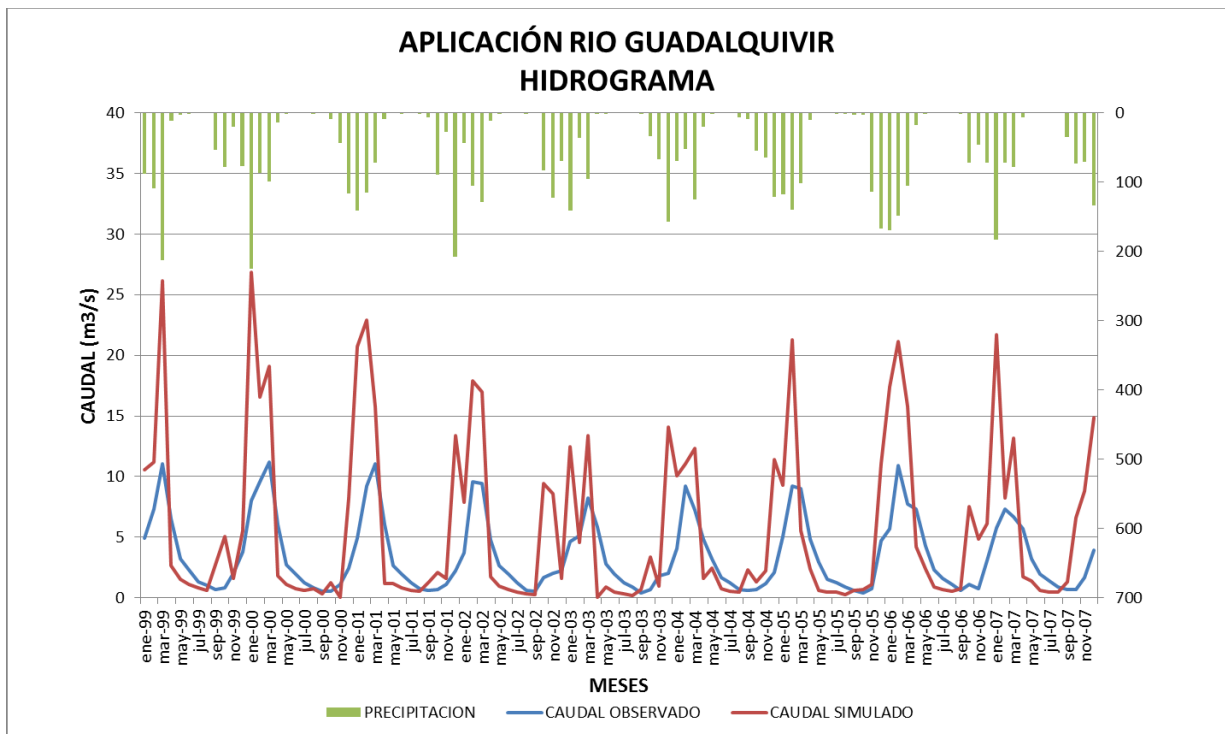


FIGURA 4.30. Hidrograma obtenido en la Aplicación al río Guadalquivir, de los parámetros de calibración de la subcuenca Canasmoro

Al utilizar los parámetros de calibración de la subcuenca Canasmoro se obtienen los índices de correlación descritos en la tabla 4.27.

TABLA 4.28. Índices de correlación para la aplicación del modelo WEAP en la cuenca Alta del río Guadalquivir, utilizando los parámetros de calibración de la subcuenca Canasmoro

RMSE =	5,568
BIAS =	30,715
Ef =	-2,364
R =	0,745

4.4.2. Modelación de la cuenca Alta del río Guadalquivir, utilizando los parámetros de calibración de la subcuenca Sella

Utilizando los parámetros de calibración de la prueba 7 de la subcuenca Sella, se obtienen los resultados que se muestran en las siguientes figuras (figuras 4.31 y 4.32) y en la tabla 4.28.

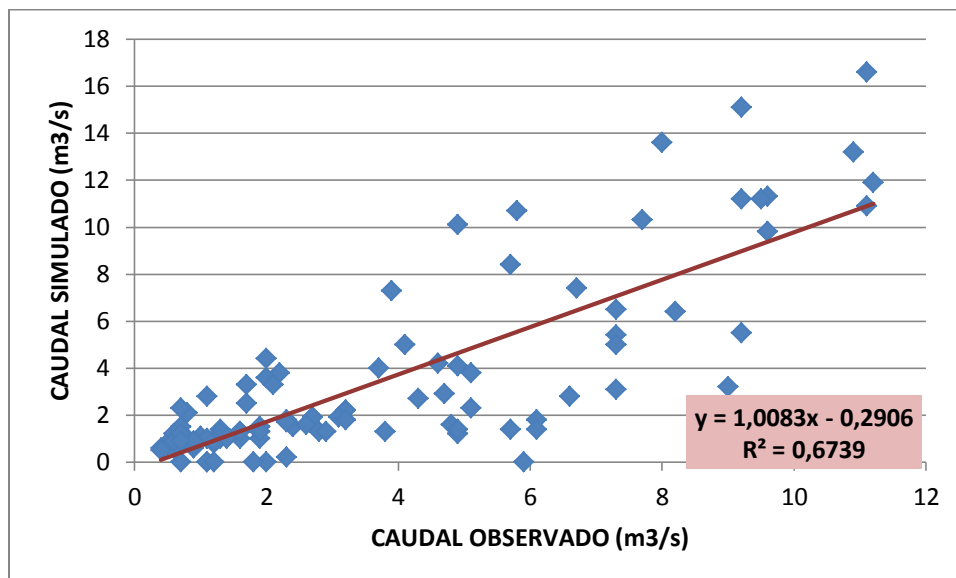


FIGURA 4.31. Coeficiente de determinación de la Aplicación al río Guadalquivir, de los parámetros de calibración de la prueba 7 de la subcuenca Sella

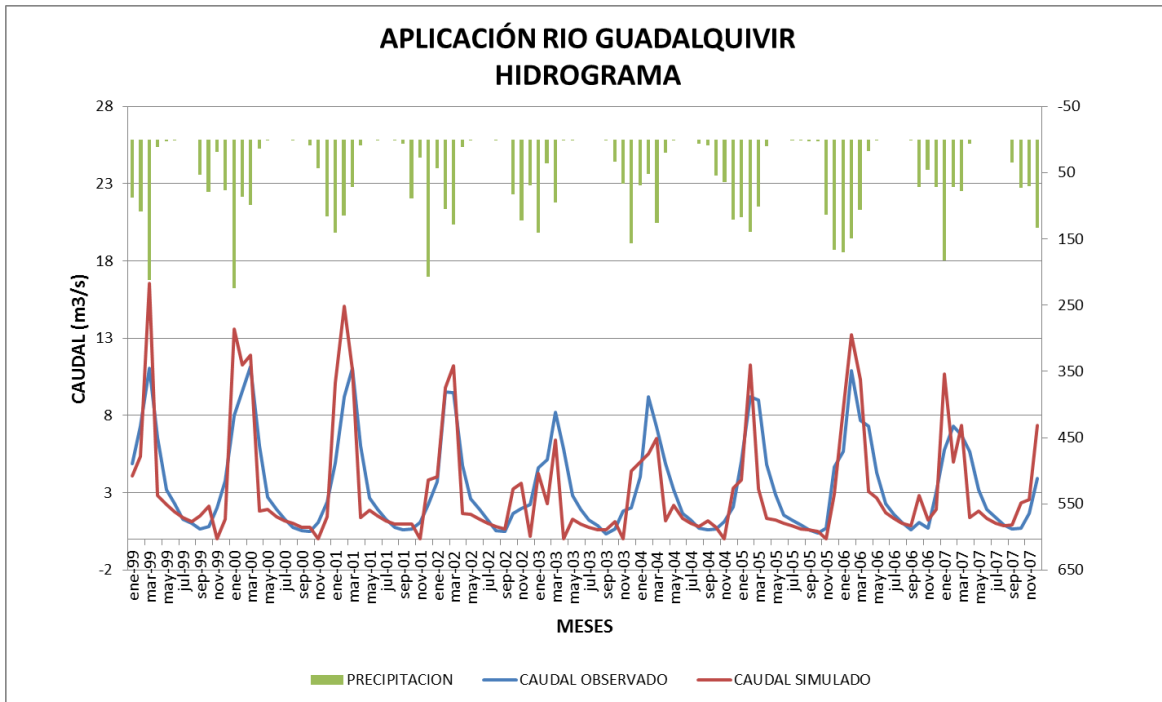


FIGURA 4.32. Hidrograma obtenido en la Aplicación al río Guadalquivir, de los parámetros de calibración de la prueba 7 de la subcuenca Sella

TABLA 4.29. Índices de correlación para la aplicación del modelo WEAP en la cuenca Alta del río Guadalquivir, utilizando los parámetros de calibración de la prueba 7 de la subcuenca Sella

RMSE =	2,146
BIAS =	4,562
Ef =	0,500
R =	0,821

Utilizando los parámetros de calibración de la prueba 9 de la subcuenca Sella, se obtienen los resultados que se muestran en las siguientes figuras (figuras 4.33 y 4.34) y en la tabla 4.29.

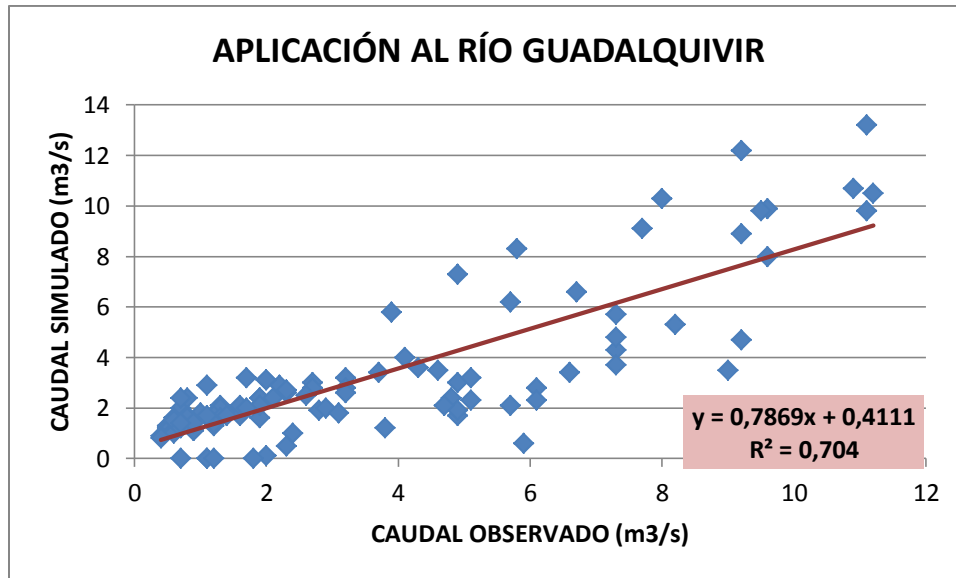


FIGURA 4.33. Coeficiente de determinación de la Aplicación al río Guadalquivir, de los parámetros de calibración de la prueba 9 de la subcuenca Sella

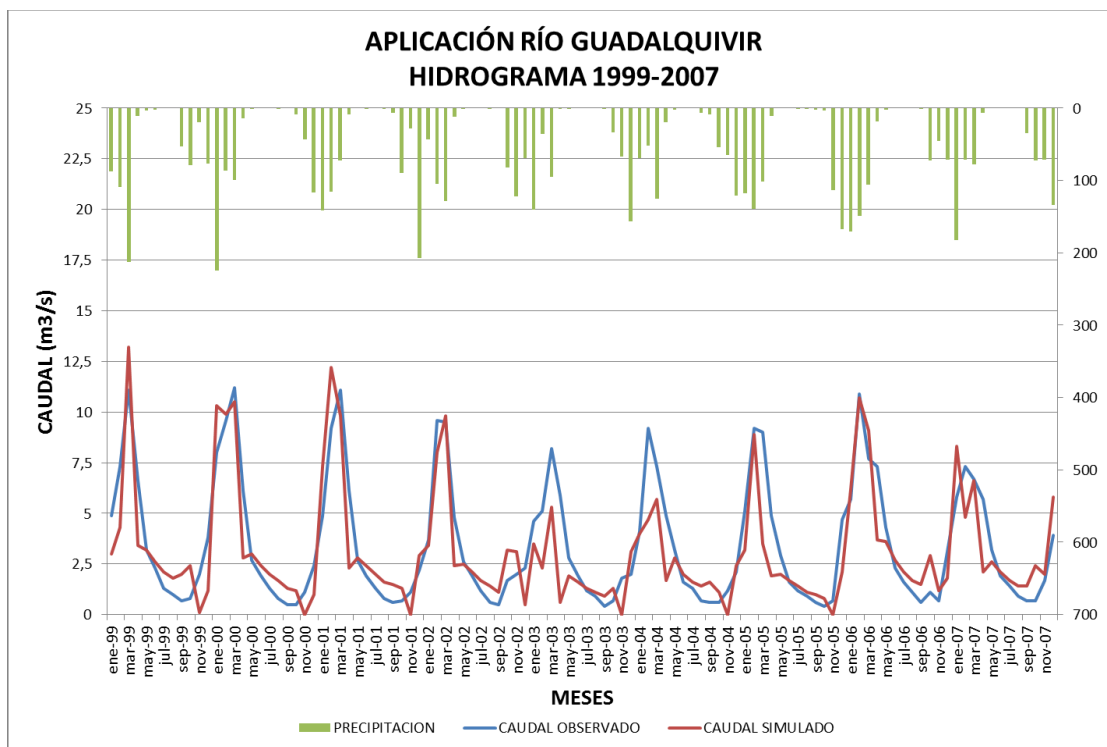


FIGURA 4.34. Hidrograma obtenido en la Aplicación al río Guadalquivir, de los parámetros de calibración de la prueba 9 de la subcuenca Sella

TABLA 4.30. Índices de correlación para la aplicación del modelo WEAP en la cuenca Alta del río Guadalquivir, utilizando los parámetros de calibración de la prueba 9 de la subcuenca Sella

RMSE =	1,711
BIAS =	2,899
Ef =	0,683
R =	0,839

Al aplicar los parámetros de calibración de las dos subcuencas con que se dispone a la cuenca en estudio, se puede observar que la cuenca responde de una manera adecuada a los parámetros obtenidos para la subcuenca Sella, tanto para la prueba 7 y prueba 9, obteniéndose aceptables índices de ajuste.

A continuación, y para desarrollar un análisis detallado de la cuenca en su totalidad, se procederá a aplicar los parámetros de calibración de la subcuenca Sella a la subcuenca Canasmoro.

4.4.2.1. Aplicación de los parámetros de calibración de la subcuenca Sella a la subcuenca Canasmoro

Al aplicar los parámetros de calibración de la subcuenca Sella a la subcuenca Canasmoro, se obtienen los siguientes resultados:

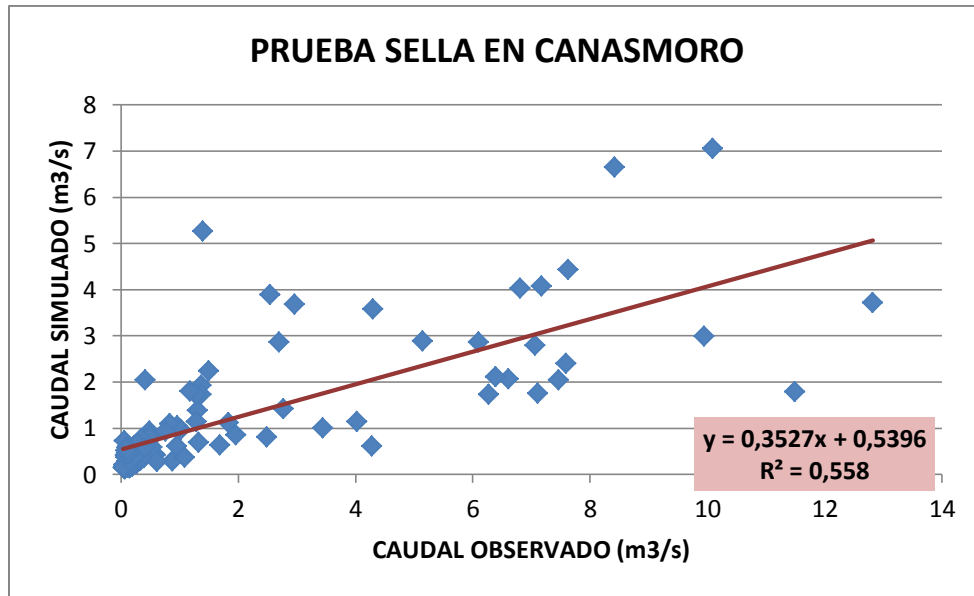


FIGURA 4.35. Coeficiente de determinación de la Aplicación de los parámetros de calibración de la subcuenca Sella a la subcuenca Canasmoro

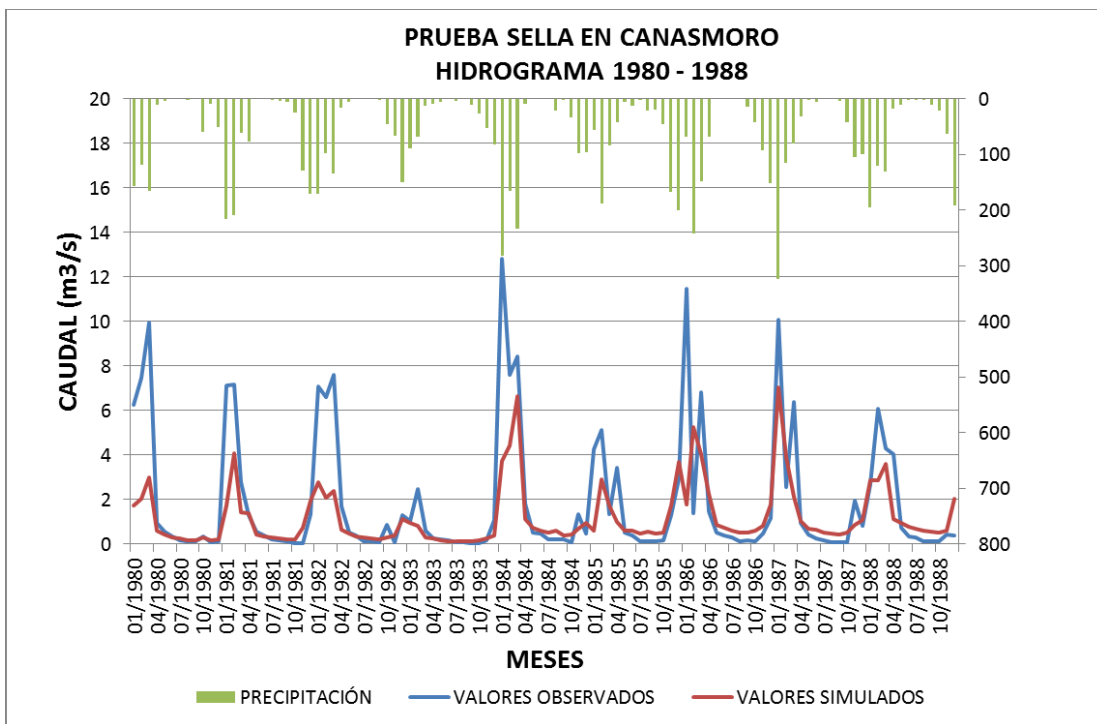


FIGURA 4.36. Hidrograma obtenido en la Aplicación de los parámetros de calibración de la subcuenca Sella a la subcuenca Canasmoro

TABLA 4.31. Índices de correlación para la aplicación de los parámetros de calibración de la subcuenca Sella en la subcuenca Canasmoro

RMSE =	2,175
BIAS =	4,686
Ef =	0,427
R =	0,747

Al observar los índices de correlación identificamos valores, que si bien no son los óptimos como los obtenidos en la prueba de calibración 3, responden de manera aceptable a la modelación de la subcuenca. Por lo tanto se puede afirmar en este punto que se acepta la modelación de la cuenca Alta del río Guadalquivir, bajo los parámetros obtenidos para la subcuenca Sella prueba 9.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos en la aplicación del modelo WEAP a la cuenca Alta del río Guadalquivir.

5.1. Calibración de subcuencas aportantes

En la etapa de calibración del modelo fue necesario realizar varias pruebas para lograr obtener resultados satisfactorios; sin variar ninguno de los parámetros climáticos de ingreso al modelo (precipitación, temperatura y humedad relativa), sino únicamente los parámetros de uso de suelo, como son: Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces (S_w), Factor de resistencia a la escorrentía, Zona radicular de conductividad (K_s), Conductividad profunda (K_d) y Dirección preferente de flujo (P_{fd}).

Los tres primeros parámetros mencionados intervienen en la variación de los caudales pico simulados por el modelo y los dos últimos en la variación de los caudales base.

Tanto para la subcuenca aportante Canasmoro, como para la Sella, y para la primera calibración se tomaron como referencia los valores de los parámetros utilizados para la calibración de la cuenca del río Pastaza en el Ecuador.

En la subcuenca Canasmoro, en la primera calibración se obtuvieron los siguientes índices de ajuste:

- Se obtuvo un R igual a 0,899, que indica un buen valor de correlación entre los datos observados y los simulados.
- Se alcanzó un RMSE igual a 1,487, que no está mal considerando un RMSE igual a cero representa un ajuste perfecto.
- Se obtuvo un BIAS igual a 2,173, que indica sobreestimación de caudales.
- Se obtuvo un coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E_f) de 0,765 que según la tabla 4.22 (Cabrera, 2011) significa un ajuste muy bueno.

A partir de esta primera calibración, el objetivo fue disminuir el índice BIAS que indicaba sobreestimación de caudales, a la vez tratando de mantener los demás índices que resultaban satisfactorios.

Entonces, observado el hidrograma resultante de la prueba 1 de calibración, se verifica que la sobreestimación de caudales se debe a que los caudales en época de estiaje tienen valores muy altos, por lo que se deben disminuir los caudales de estiaje y tratar de mantener y corregir los caudales en época de lluvias.

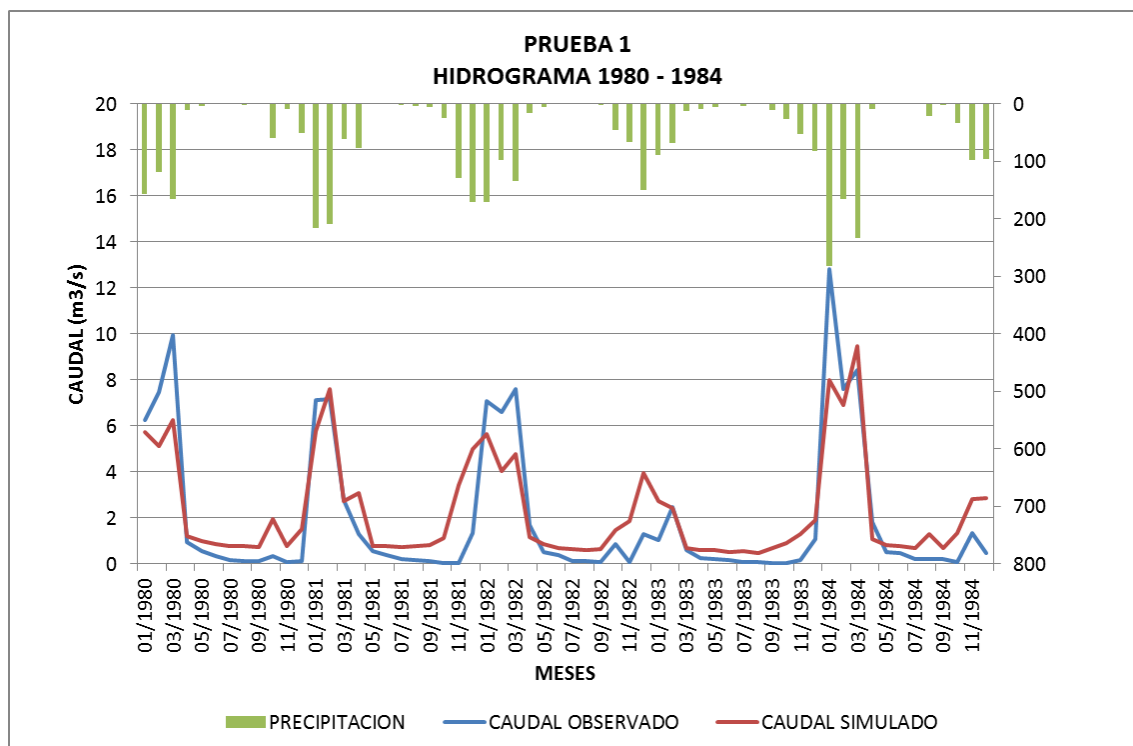


FIGURA 5.1. Hidrograma obtenido en la prueba 1, subcuenca Canasmoro

Para la segunda prueba de calibración se varió la conductividad de la zona profunda (Kd) llevando este parámetro a valores estándar, y también se cambió la dirección preferente de flujo (Pfd), pero sólo para los catchments clasificados con una altitud baja, duplicando dicho valor.

Los resultados obtenidos en la prueba 2 de calibración fueron todavía mejores que los obtenidos en la prueba de calibración 1, logrando disminuir los índices RMSE y BIAS,

acercando el coeficiente Nash-Sutcliffe (E_f) todavía más a uno, y manteniendo el coeficiente de correlación.

Entonces, siguiendo con el criterio de la prueba de calibración 2, se disminuyeron los parámetros de la capacidad de almacenamiento en la zona de raíces (S_w) y la capacidad de almacenamiento profunda (D_w), en el orden de disminuir los caudales en época de estiaje. También se modificaron los valores del factor de resistencia a la escorrentía, para que las modificaciones realizadas afecten menos a los caudales pico, que tenían buena correlación.

Como resultado, en la prueba de calibración 3 se obtuvieron los mejores resultados para la subcuenca Canasmoro:

- Se obtuvo un R igual a 0,902, que indica un buen valor de correlación entre los datos observados y los simulados.
- Se alcanzó un RMSE igual a 1,429, disminuyendo todavía más los resultados obtenidos en anteriores pruebas.
- Se obtuvo un BIAS igual a 2,008, que sigue indicando sobreestimación de caudales.
- Se obtuvo un coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E_f) de 0,783 que según la tabla 4.22 (Cabrera, 2011) significa un ajuste muy bueno, casi excelente.

En la figura 5.2 se observa que se logró el objetivo de disminuir los caudales en época de estiaje y mantener los caudales pico.

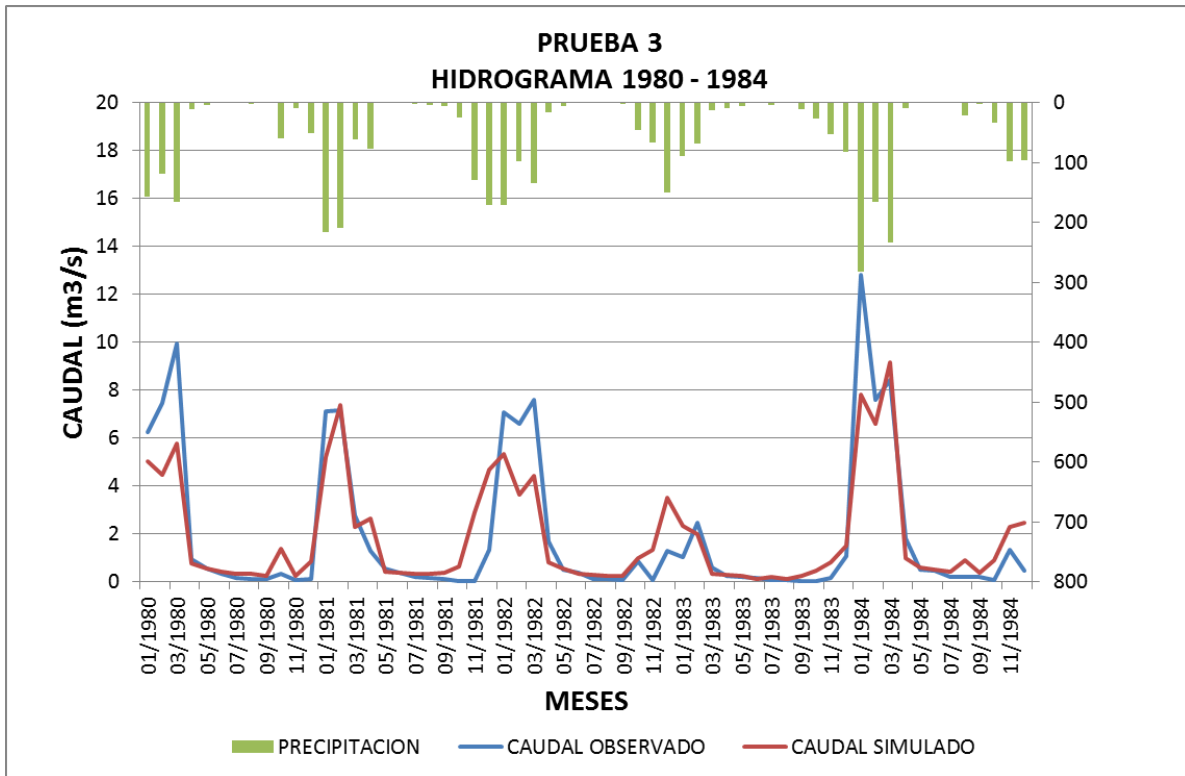


FIGURA 5.2. Hidrograma obtenido en la prueba 3, subcuenca Canasmoro

Para la prueba 4 de calibración se trató de mejorar aún más los resultados de la prueba 3, se disminuyeron los parámetros de conductividad en la zona profunda (K_d) y la capacidad de almacenamiento profundo (D_w). Pero los resultados obtenidos de esta prueba de calibración no fueron los esperados y aumentaron, en lugar de disminuir como se esperaba.

Por lo tanto, se pasó a etapa de verificación de los parámetros obtenidos en la prueba 3. Comprobando que dichos parámetros no respondieron a las expectativas generadas. (Figura 5.3)

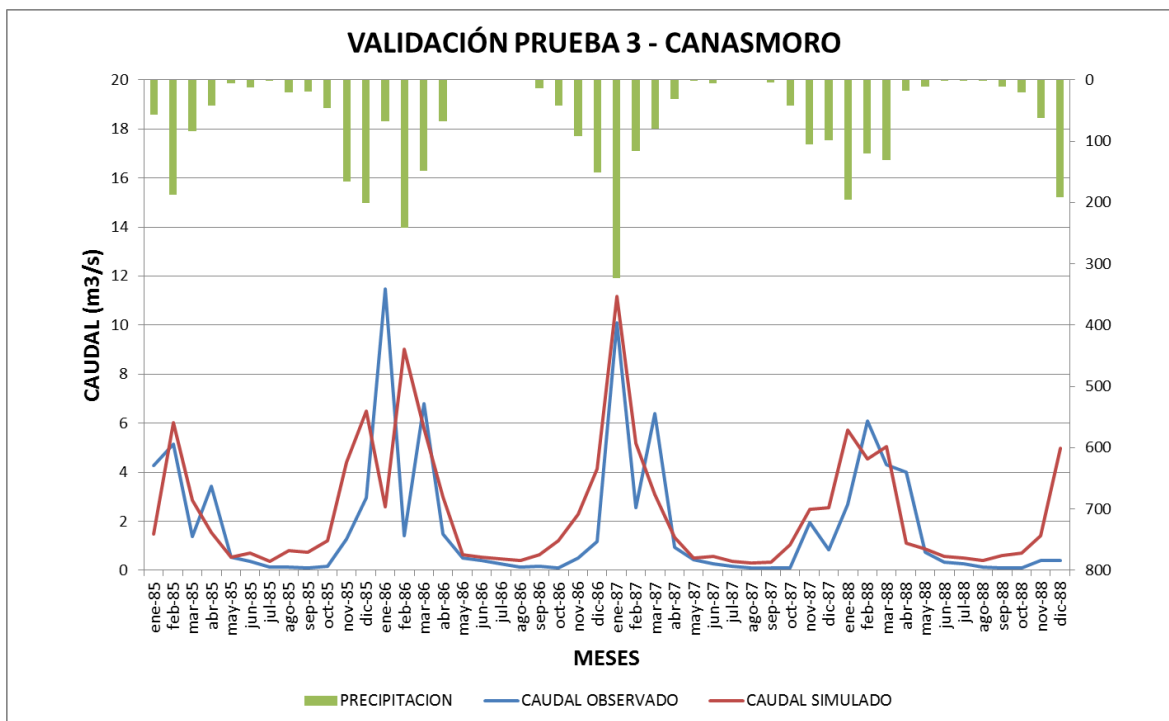


FIGURA 5.3. Hidrograma obtenido en la validación de la prueba 3, subcuenca Canasmoro

Los resultados de la validación se explican a continuación:

- Se obtuvo un R igual a 0,602, que indica un valor de correlación satisfactorio entre los datos observados y los simulados.
- Se alcanzó un RMSE igual a 2,349, indicando un menor ajuste.
- Se obtuvo un BIAS igual a 5,402, aumentando la sobreestimación de caudales.
- Se obtuvo un coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Ef) de 0,209 que según la tabla 4.22 (Cabrera, 2011) significa un ajuste satisfactorio.

Si bien los resultados obtenidos en la validación no son los esperados, tampoco quiere decir que son malos. Verificando la figura 5.3, apreciamos que el hidrograma de caudal simulado tiene similitud con el hidrograma de caudal observado, y como se observa en la gráfica, responde fielmente a las precipitaciones registradas para ese período. También se

comprueba mediante esta figura, que el hidrograma de caudales simulados representa los caudales pico registrados.

El menor ajuste indicado por los índices, se explica porque la forma en meses puntuales del hidrograma de caudales simulados es diferente al de los caudales observados, indicando en la mayoría de estos meses, sobreestimación de caudales. Además al tener un período de registro muy corto para la validación, los errores se intensifican.

En orden a mejorar los índices de validación para la subcuenca Canasmoro, se aplicaron los parámetros de calibración de la subcuenca aportante Sella. Y se obtiene que los mejores resultados para la subcuenca Canasmoro, se consiguen con los parámetros elegidos para la subcuenca Sella. Como se observa en el hidrograma de validación de la prueba 7 (figura 5.4).

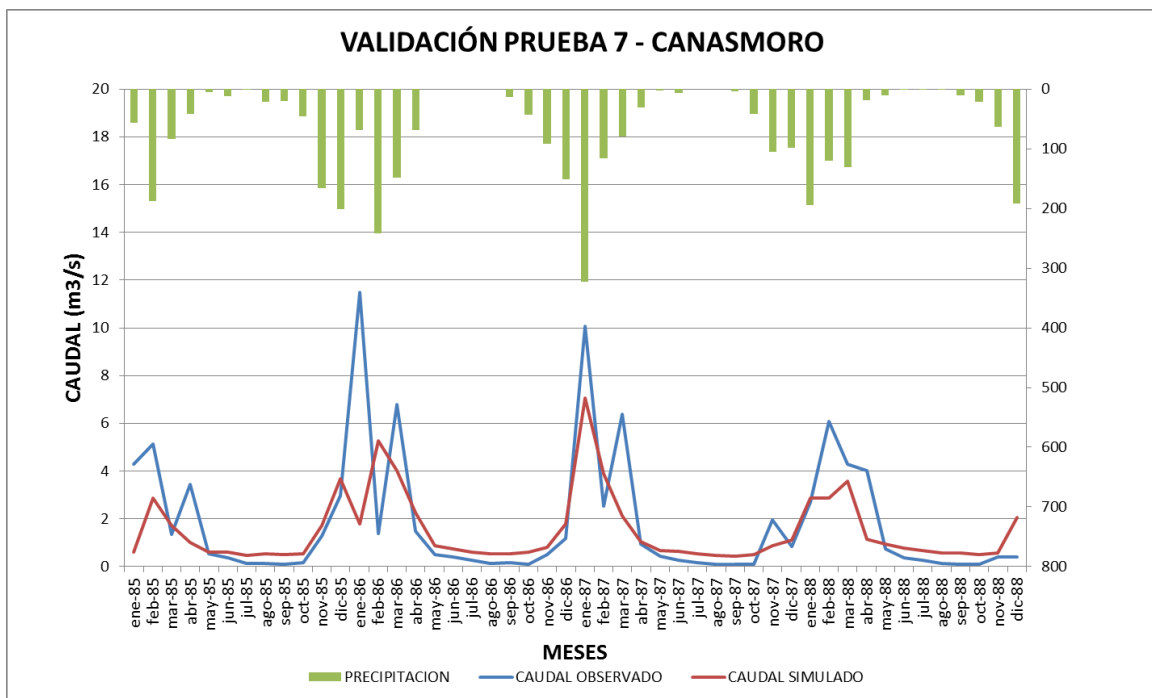


FIGURA 5.4. Hidrograma obtenido en la validación de la prueba 7, subcuenca Canasmoro

Los resultados de la validación se explican a continuación:

- Se obtuvo un R igual a 0,650, que indica un satisfactorio valor de correlación entre los datos observados y los simulados.
- Se alcanzó un RMSE igual a 2,056.
- Se obtuvo un BIAS igual a 4,141, con sobreestimación de caudales.
- Se obtuvo un coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Ef) de 0,394 que según la tabla 4.22 (Cabrera, 2011) significa un ajuste satisfactorio.

A pesar de conseguir mejores índices de ajuste, visualmente se comprueba que los caudales simulados no representan a los caudales picos registrados en la estación Canasmoro.

A continuación se presenta la aplicación de los parámetros de la prueba 7 al total de período de registro de la estación Canasmoro (1980 – 1988).

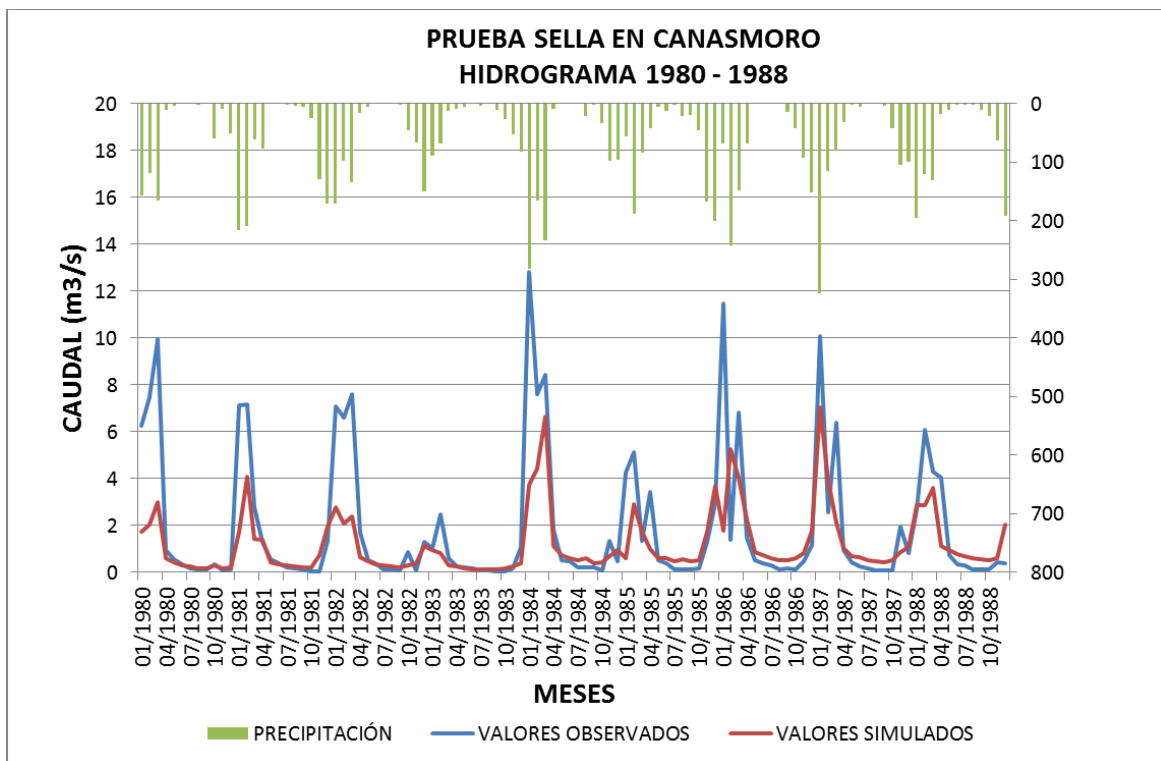


FIGURA 5.5. Hidrograma obtenido en la aplicación de la prueba 7, subcuenca Canasmoro

Los resultados de la aplicación de la prueba 7 (Figura 5.5) se explican a continuación:

- Se obtuvo un R igual a 0,747, que indica un buen valor de correlación entre los datos observados y los simulados.
- Se alcanzó un RMSE igual a 2,175.
- Se obtuvo un BIAS igual a 4,686, con sobreestimación de caudales.
- Se obtuvo un coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Ef) de 0,427 que según la tabla 4.22 (Cabrera, 2011) significa un ajuste bueno.

Estos valores se obtuvieron al aplicar los parámetros de la prueba 7 a todo el período de datos disponible para la subcuenca Canasmoro (1980 – 1988). Se hace notar que si bien los índices de ajuste mejoraron, el hidrograma de caudales simulados no representa el comportamiento de los caudales picos observados en la estación Canasmoro. Hecho importante en el diseño de las obras hidráulicas en la subcuenca.

A continuación se aplicará los valores correspondientes a la prueba 3, al mismo período de datos aplicado para la prueba 7 (1980 – 1988). Así se comparará los resultados.

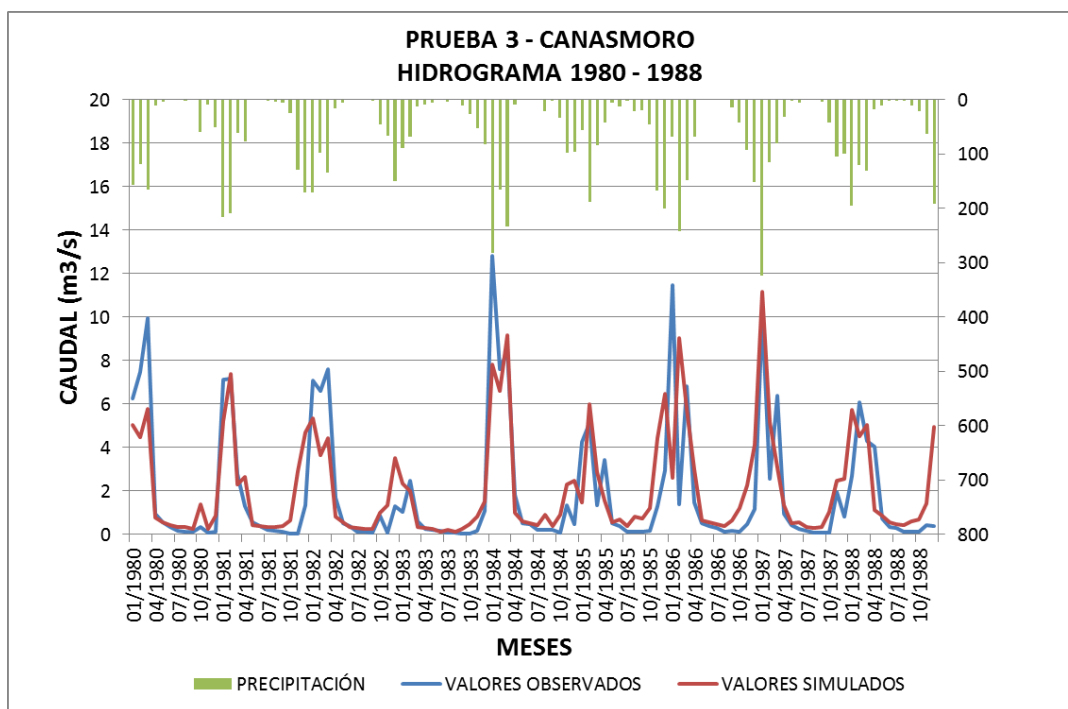


FIGURA 5.6. Hidrograma obtenido en la validación de la prueba 3, subcuenca Canasmoro (1980 – 1988)

Los resultados de la validación de la prueba 3 para el período 1980 - 1988 se muestran a continuación:

- Se obtuvo un R igual a 0,761.
- Se alcanzó un RMSE igual a 1,884.
- Se obtuvo un BIAS igual a 3,516.
- Se obtuvo un coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Ef) de 0,570.

Se hizo notar que los índices de ajuste de la validación de la prueba 7 fueron mejores que los de la validación de la prueba 3, sin embargo al aplicar estos parámetros a un período de registro más extenso (figura 5.5 y 5.6), nuevamente observamos que los parámetros de la prueba 3 son los verdaderos para la subcuenca Canasmoro. Y demostramos también que ante un período menor de datos, mayor sensibilidad y error en cuanto a los índices de ajuste y su representación de los resultados.

Comparando puntualmente los índices obtenidos de la figura 5.5 y 5.6, se concluye que ambas pruebas brindan índices de ajuste satisfactorios. La diferencia se encuentra en que los parámetros de la prueba 3 representan mejor los caudales pico registrados en la estación. Mientras que los parámetros de la prueba 7 representan resultados más sobrios y conservadores, representando mejor los caudales base registrados en la estación Canasmoro.

Para la subcuenca Sella, en la primera calibración se obtuvieron los siguientes índices de ajuste:

- Se obtuvo un R igual a 0,843, que indica un buen valor de correlación entre los datos observados y los simulados.
- Se alcanzó un RMSE igual a 1,069, aceptable considerando un RMSE igual a cero representa un ajuste perfecto.
- Se obtuvo un BIAS igual a 1,111, que indica sobreestimación de caudales, pero no muy alta.
- Se obtuvo un coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Ef) de -0,014 que según la tabla 4.22 (Cabrera, 2011) significa un ajuste insuficiente.

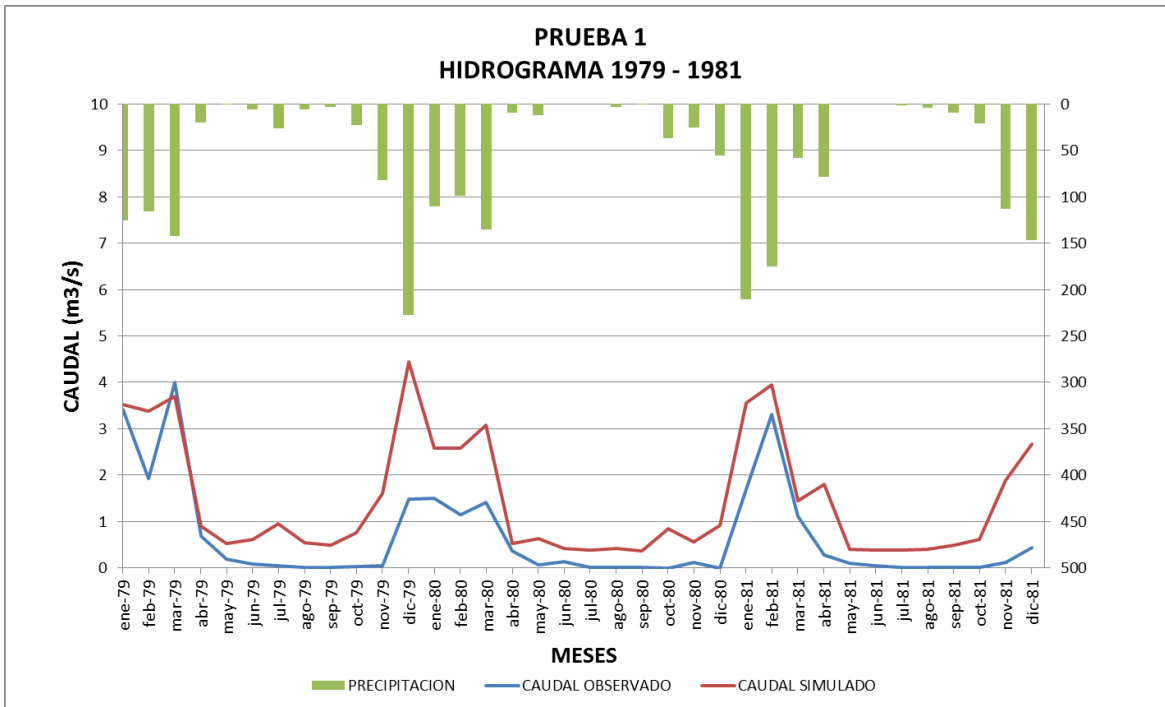


FIGURA 5.7. Hidrograma obtenido en la prueba 1, subcuenca Sella

Observando la figura 5.7 y el coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe obtenido para la primera prueba, se conoce que la simulación es demasiado variable respecto de las observaciones. Por lo tanto el objetivo será de elevar el valor del coeficiente de eficiencia y acercarlo lo más que se pueda a uno.

Con este propósito en las cuatro primeras pruebas de calibración se aplicaron los mismos principios que se aplicaron para la subcuenca Canasmoro, tratando de disminuir los caudales en época de estiaje, llegando a obtener en la prueba 3 un coeficiente de eficiencia de 0,153, todavía muy bajo.

Es así que en lo que respecta a las pruebas de calibración 5 y 6, se disminuye la conductividad en la zona de raíces (K_s), y se disminuye la capacidad de almacenamiento en la zona de raíces (S_w), con el propósito de disminuir los caudales en época de estiaje. Y se modifican el factor de resistencia a la escorrentía (RRF) y la dirección preferencial de flujo (Pfd), sabiendo que estos parámetros, especialmente el factor de resistencia a la escorrentía (RRF) influyen de manera directa en cómo se distribuyen los caudales en época de lluvias.

A continuación se presenta el hidrograma de la prueba 6, para la subcuenca Sella (figura 5.8).

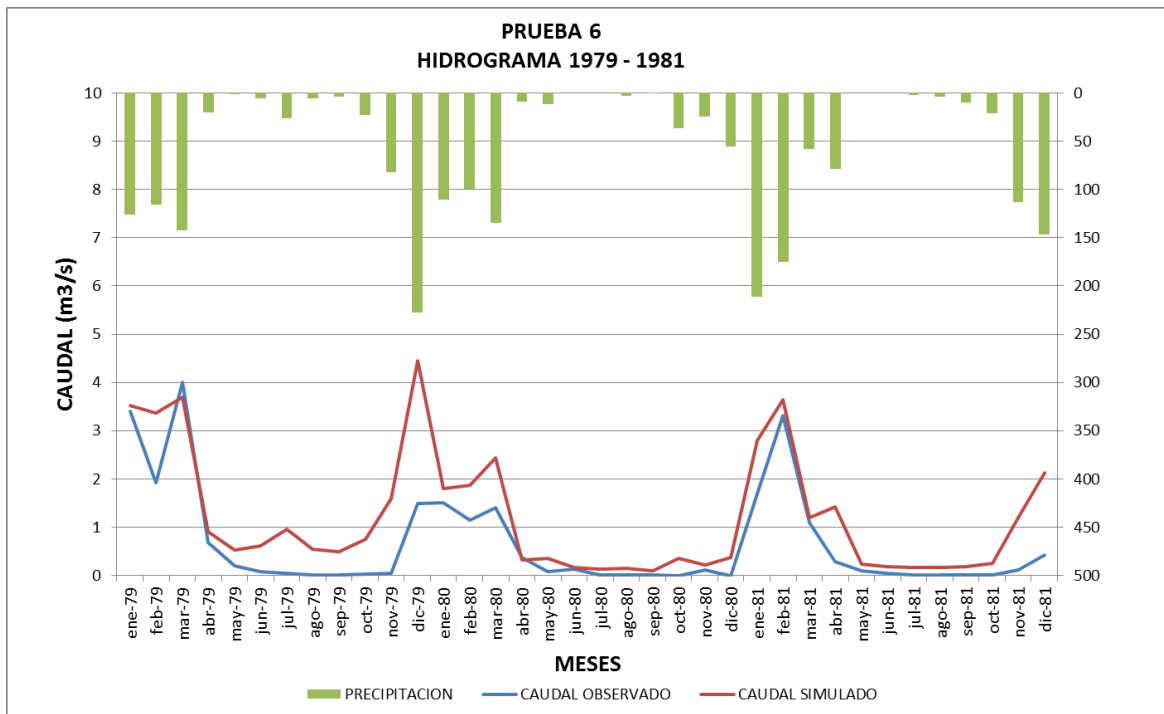


FIGURA 5.8. Hidrograma obtenido en la prueba 6, subcuenca Sella

En la prueba de calibración 6 se obtuvieron los siguientes resultados para la subcuenca Sella:

- Se obtuvo un R igual a 0,863, que significa que correlación entre los datos observados y los simulados es buena.
- Se alcanzó un RMSE igual a 0,839, disminuyendo todavía más los resultados obtenidos en anteriores pruebas.
- Se obtuvo un BIAS igual a 0,685, que indica una leve sobreestimación de caudales.
- Se obtuvo un coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Ef) de 0,374 que según la tabla 4.22 (Cabrera, 2011) significa un satisfactorio ajuste.

Al observar la figura 5.8, notamos que el hidrograma de caudal simulado representa satisfactoriamente los caudales en época de estiaje, logrando así uno de los objetivos, pero no así los caudales en época de lluvias. Por lo que se deberá alterar el factor de resistencia a la escorrentía (RRF), que como se indicó influye de manera directa en el caudal pico.

Se comprueba que la escorrentía tiende a disminuir mientras los valores del factor resistencia a la escorrentía (RRF) aumentan. Siguiendo esta lógica, se aumentaron los valores de RRF para los catchments clasificados con altura media y baja.

Como resultado, en la prueba de calibración 7 se obtuvieron los mejores índices de ajuste para la subcuenca Sella. (Figura 5.9)

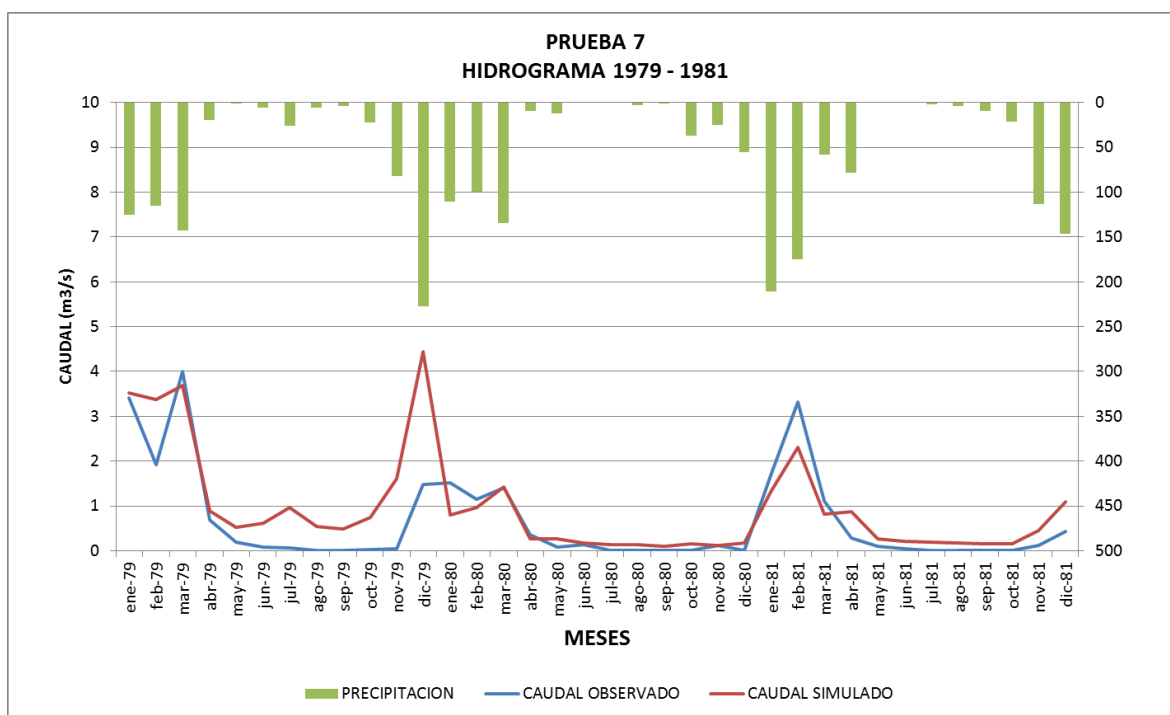


FIGURA 5.9. Hidrograma obtenido en la prueba 7, subcuenca Sella

En la prueba de calibración 7 se obtuvieron los siguientes resultados para la subcuenca Sella:

- Se obtuvo un R igual a 0,815, que significa que correlación entre los datos observados y los simulados es buena.

- Se alcanzó un RMSE igual a 0,732, disminuyendo todavía más los resultados obtenidos en anteriores pruebas.
- Se obtuvo un BIAS igual a 0,520, que indica una leve sobreestimación de caudales, menos que en las anteriores pruebas.
- Se obtuvo un coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Ef) de 0,525 que según la tabla 4.22 (Cabrera, 2011) significa un ajuste bueno.

Los resultados obtenidos en las siguientes pruebas no lograron superar los obtenidos en la prueba 7, sin embargo se destacan los índices obtenidos en la prueba 9.

Para la prueba de calibración 9, se tomó los parámetros de la prueba 4 y se ajustaron sólo la conductividad en la zona profunda (Kd) y el factor de resistencia a la escorrentía (RRF). Con el conocimiento adquirido en previas pruebas, se comprendió que los parámetros que dominan el comportamiento de los caudales en época de lluvia son precisamente el Kd y RRF.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios y se detallan a continuación. (Figura 5.10)

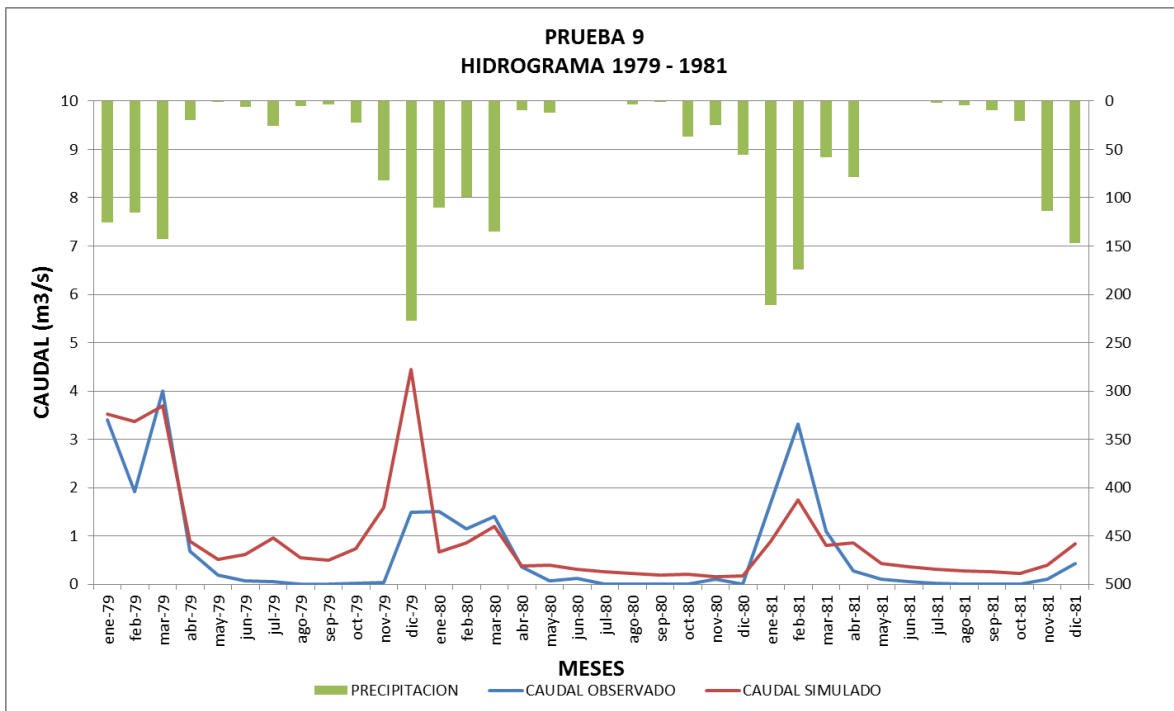


FIGURA 5.10. Hidrograma obtenido en la prueba 9, subcuenca Sella

En la prueba de calibración 9 se obtuvieron los siguientes resultados para la subcuenca Sella:

- Se obtuvo un R igual a 0,773, que significa que correlación entre los datos observados y los simulados es buena, no mejor que la obtenida en la prueba 7.
- Se alcanzó un RMSE igual a 0,778.
- Se obtuvo un BIAS igual a 0,588, que indica una leve sobreestimación de caudales.
- Se obtuvo un coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Ef) de 0,463 que según la tabla 4.22 (Cabrera, 2011) significa un ajuste bueno.

Para la validación de la subcuenca Sella se aplicaron los parámetros de la prueba 7 y de la prueba 9, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación. (Figura 5.11 y 5.12)

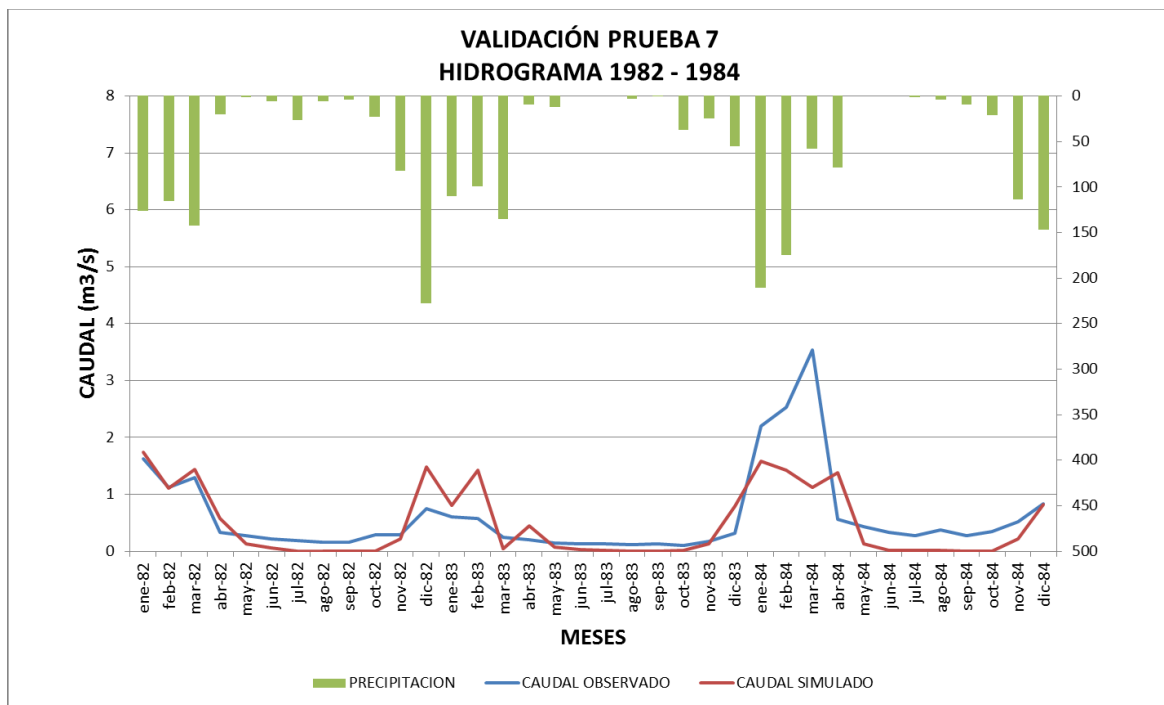


FIGURA 5.11. Hidrograma obtenido en la validación de la prueba 7, subcuenca Sella

En la validación de la prueba 7 se obtuvieron los siguientes resultados para la subcuenca Sella:

- Se obtuvo un R igual a 0,708, que significa que correlación entre los datos observados y los simulados es buena.
- Se alcanzó un RMSE igual a 0,554.
- Se obtuvo un BIAS igual a 0,299, que indica una leve sobreestimación de caudales.
- Se obtuvo un coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Ef) de 0,184 que según la tabla 4.22 (Cabrera, 2011) significa un ajuste insuficiente.

A pesar de que se obtenga un coeficiente de Eficiencia insuficiente, cabe destacar que el período de calibración y validación de la subcuenca Sella es corto, lo que hace sensibles a los índices de ajuste, como se verificó anteriormente.

A continuación se muestran los resultados de la validación de la prueba 9 para la subcuenca Sella:

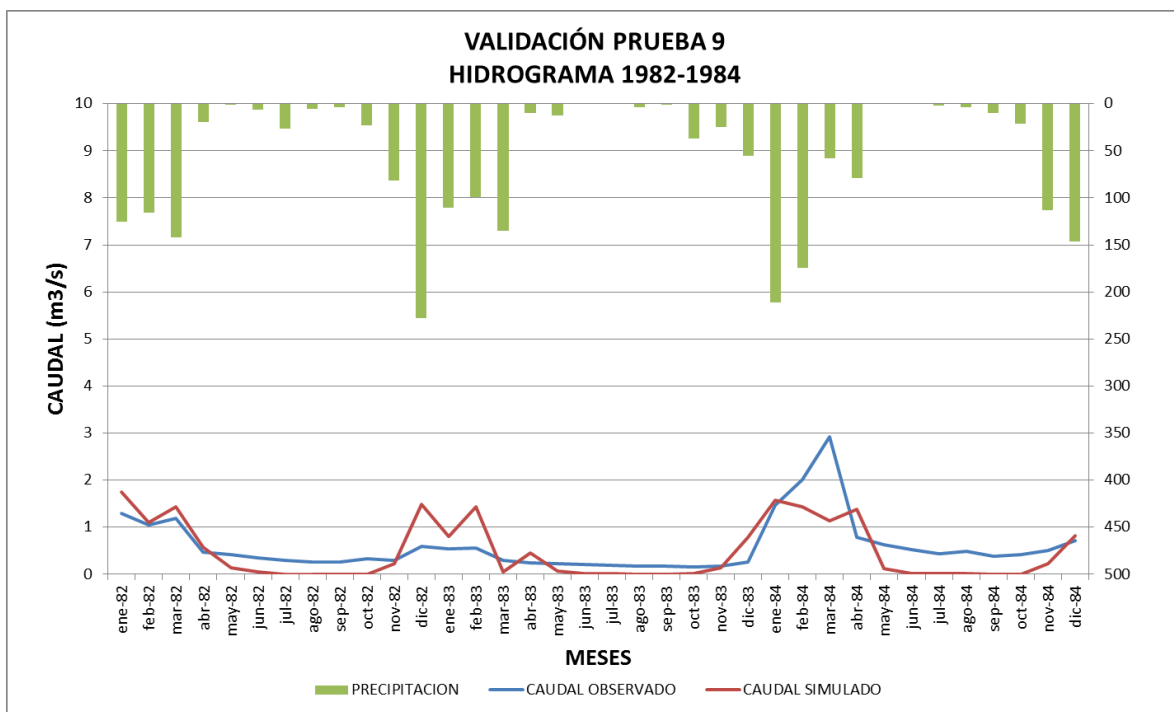


FIGURA 5.12. Hidrograma obtenido en la validación de la prueba 9, subcuenca Sella

- Se obtuvo un R igual a 0,679, que significa que correlación entre los datos observados y los simulados es buena, pero menor a la correlación obtenida en la prueba 7.
- Se alcanzó un RMSE igual a 0,484, disminuyendo la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto los observados.
- Se obtuvo un BIAS igual a 0,228, que indica una leve sobreestimación de caudales.
- Se obtuvo un coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Ef) de 0,372 que según la tabla 4.22 (Cabrera, 2011) significa un ajuste satisfactorio.

Comparando los resultados de las validaciones de las pruebas 7 y 9, para la subcuenca Sella se eligen los parámetros de la prueba de calibración 9. Se observa que los índices de ambas prueba son similares, menos el coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Ef), que fue decisivo en la elección al presentar un valor de 0,372 para la prueba 9 a comparación de los 0,184 obtenidos en la prueba 7.

5.2. Aplicación del modelo WEAP

Una vez calibradas las subcuencas aportantes, se toma los parámetros de las dos subcuencas y se los aplica sobre la cuenca en estudio para analizar los resultados que se obtienen.

Al utilizar los parámetros obtenidos de la subcuenca Canasmoro se obtienen los siguientes resultados: (Figura 5.13)

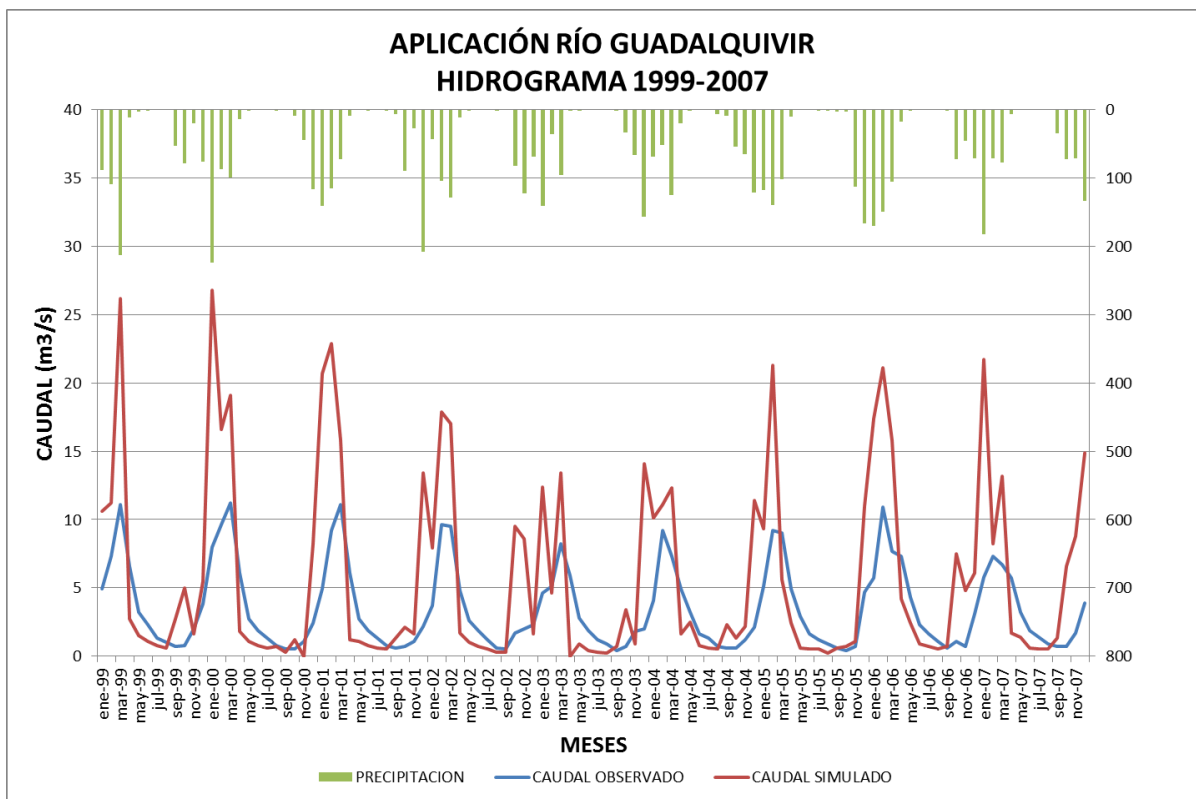


FIGURA 5.13. Hidrograma obtenido en la aplicación de los parámetros de la subcuenca Canasmoro en la cuenca del río Guadalquivir

- Se obtuvo un R igual a 0,745, que significa que correlación entre los datos observados y los simulados es buena.
- Se alcanzó un RMSE igual a 5,568, indicando una desviación de los valores simulados respecto los observados.
- Se obtuvo un BIAS igual a 30,715, que indica una gran sobreestimación de caudales.
- Se obtuvo un coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Ef) de -2,364 que según la tabla 4.22 (Cabrera, 2011) significa un ajuste insuficiente.

Los resultados de la aplicación de los parámetros de la subcuenca Canasmoro a la cuenca en estudio no fueron buenos, sobre todo observando los valores de BIAS y del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe.

Al utilizar los parámetros obtenidos de la subcuenca Sella se obtienen los siguientes resultados: (Figura 5.14)

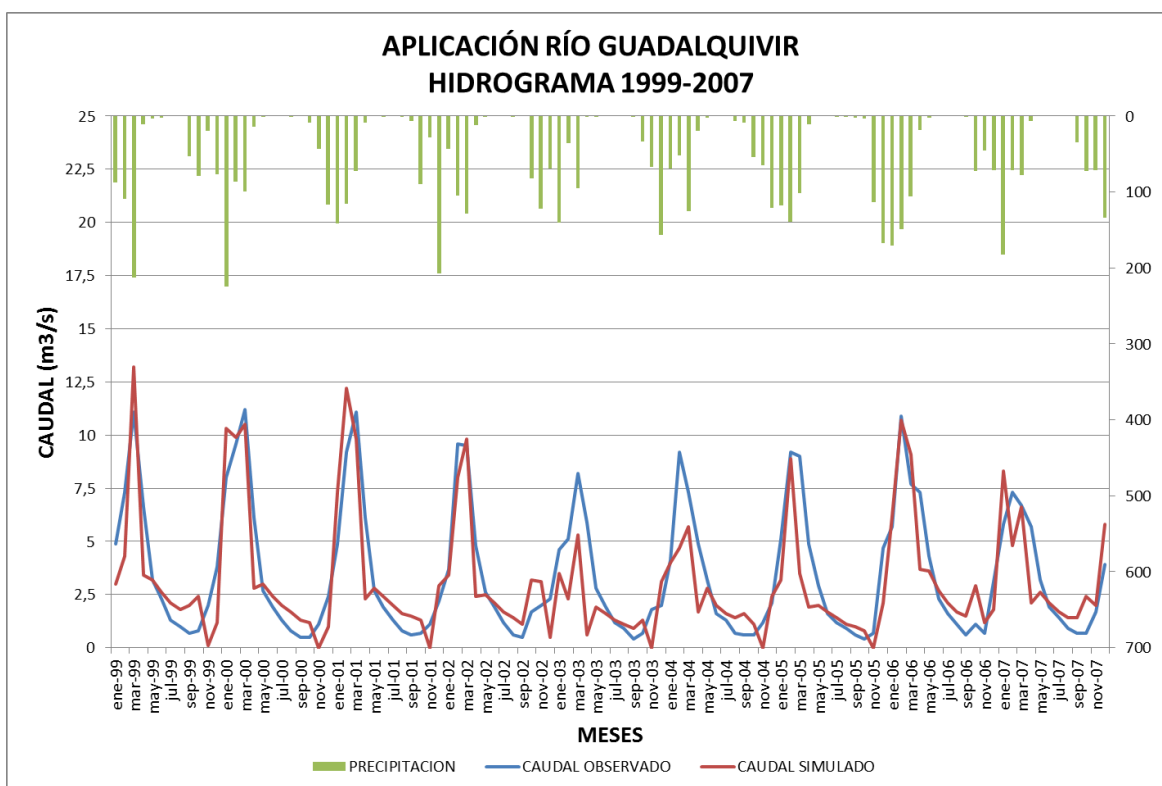


FIGURA 5.14. Hidrograma obtenido en la aplicación de los parámetros de la subcuenca Sella en la cuenca del río Guadalquivir

- Se obtuvo un R igual a 0,839, que significa que correlación entre los datos observados y los simulados es buena.
- Se alcanzó un RMSE igual a 1,711, indicando una leve desviación de los valores simulados respecto los observados.
- Se obtuvo un BIAS igual a 2,899, que indica una sobreestimación de caudales.
- Se obtuvo un coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (Ef) de 0,683 que según la tabla 4.22 (Cabrera, 2011) significa un ajuste muy bueno.

Analizando el hidrograma obtenido, se observa que el caudal simulado tiene similitud con el caudal observado en la estación Obrajes, las diferencias más notables se presentan en el

período de septiembre de 2002 a noviembre de 2004, donde el caudal observado es mayor que el caudal simulado.

También se nota que los caudales simulados para los meses de noviembre tienden a cero, es decir que el río se secaría en este mes, lo cual no refleja la realidad. A pesar de estar observaciones y en base a los buenos índices obtenidos, concluimos que la aplicación de los parámetros de Sella a toda la cuenca en estudio trae resultados satisfactorios.

En síntesis el modelo WEAP se ajusta adecuadamente a las características hidrogeológicas de la cuenca y nos permite simular caudales en (m³/s) que serán utilizados en el proyecto como datos de entrada para establecer la disponibilidad del recurso hídrico. A partir de esta modelación se crearán escenarios para el análisis de distintas suposiciones planteadas en el proyecto.

6. ESCENARIOS

Como escenarios se busca simular los efectos del cambio climático en la cuenca Alta del río Guadalquivir. Entre los efectos más directos que puede haber en la cuenca por el cambio climático está la alteración de los componentes del ciclo hidrológico y la disponibilidad de recursos hídricos.

La variación de la disponibilidad de los recursos hídricos ocasionada por el cambio climático tendrá efectos sobre el desarrollo humano. Aunque no se saben con exactitud los efectos que se verán a nivel local, se espera que haya cambios en la disponibilidad y la calidad del agua, debido a la modificación de la precipitación.

Las variaciones en la evapotranspiración y precipitación modifican el escurrimiento y la recarga de los acuíferos, así como los niveles de los cuerpos de agua. El aumento o reducción de los caudales tiene impacto directo en los sistemas de suministro de agua y en la producción agrícola. Fuera de los cambios en las cantidades anuales, la naturaleza de eventos aislados, en especial de la precipitación, podría ocasionar problemas como:

- Perturbaciones en la intensidad y frecuencias de las inundaciones y sequías, en el control de avenidas, etc.
- Desregulaciones de los caudales en los ríos.
- Incremento de la erosión debido a la modificación de la cobertura vegetal de la cuenca.
- Variación de la evapotranspiración de los cultivos, implicando cambios en la producción agrícola.
- Insatisfacción de la demanda de usuarios directos e indirectos (agricultura, consumo humano e industrial, recreativo, etc.).
- Menor zona regable (cambios en el ciclo fenológico del cultivo, régimen e intensidad de la precipitación en la zona regable).

Para cuantificar el efecto de un cambio climático esperado sobre los recursos hídricos de la cuenca en estudio, se realizaron dos hipótesis:

1. Una expansión lógica de la frontera agrícola en la cuenca. (Escenario 1)

2. Una variación de las temperaturas y de las precipitaciones en la cuenca, como efectos del cambio climático. (Escenario 2)

6.1. Escenario 1 – Cambio de la cobertura vegetal en la cuenca.

Para el escenario de variación de los usos y coberturas del suelo de la cuenca en estudio, se analizó el documento “Plan Departamental de Agua”, publicado por la Gobernación del Departamento de Tarija en el 2013, se determinó que el cambio en la cobertura vegetal se deberá principalmente al crecimiento de las áreas de cultivos, tendiendo a mayores grados de intensificación y de especialización productiva, según cada región, en productos rentables con buenas perspectivas de mercado, bajo el enfoque de seguridad alimentaria con soberanía. En dicho documento, se presenta un resumen de las tierras con mayor potencial agropecuario – poniendo énfasis en lo agrícola – del departamento de Tarija, tanto a nivel general como por regiones (unidades territoriales) y municipios. En el entendido, de que el componente recursos hídricos y su potencial de agua para riego, será fundamental para el desarrollo sostenible del sector productivo primario del territorio tarijeño.

Las categorías consideradas como tierras con potencial agropecuario, son: agrícola intensivo, agropecuario intensivo, agropecuario extensivo, y las áreas agrosilvopastoriles, tomando en cuenta que son áreas donde se puede expandir el riego mediante la construcción o mejoramiento de los sistemas de riego existentes y lograr riego permanente con el objeto de aumentar la producción. (18)

Estas áreas potenciales presentan características similares a las áreas que actualmente se encuentran dentro de la explotación agrícola.

La aptitud del suelo de estas nuevas áreas puede permitir desarrollar cualquier tipo de actividad agropecuaria, de existir alguna limitante se podrá corregir para que estas nuevas áreas se integren a la explotación.

Las nuevas áreas y al igual que las que se encuentran en producción, tienen procesos erosivos en constante avance, la desertificación no es visible, la geología no cambia con

relación a las otras áreas y la presencia de sales no es limitante para el desarrollo de los cultivos, no existe contaminación visible.

Estas nuevas áreas potenciales no cuentan con restricciones.

Es por eso que, para la variación de los usos y coberturas del suelo, propuestas en el Escenario 1, y analizando el mapa de Uso de Suelo Tarija, proporcionado por el ZONISIG en el 2001, se llegó a la conclusión de que las tierras a considerar para un aumento de cultivos en la cuenca, serán: las que presentan un uso Agropecuario extensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos, ovinos y caprinos (código 9 del mapa de uso de suelo Tarija); Agrosilvopastoril en matorrales con caprinos, ovinos y cultivos anuales (código 18 del mapa de uso de suelo Tarija); y las que presentan un uso Agrosilvopastoril en matorrales con cultivos anuales, caprinos, ovinos, vacunos y extracción de leña (código 17 del mapa de uso de suelo Tarija).

Las nuevas áreas de expansión cuentan con pendientes planas o casi planas, estas áreas son regadas porque existe un déficit de agua pero cuentan con cota y pendiente que permite integrar estas áreas a la actividad productiva. Y para garantizar el abastecimiento de agua a estas nuevas áreas de producción agrícola, es que se toma en cuenta para las áreas de expansión, aquellas que se encuentran por debajo de los 2300 msnm, ya que la mayoría de las zonas agrícolas que actualmente se encuentran en producción se encuentran por debajo de dicha cota. (Figura 6.2)

TABLA 6.1. Leyenda de Mapa de Uso de Suelo Tarija

MAPA DE USO DE SUELO TARIJA	
Código mapa	Descripción
	USO AGROPECUARIO INTENSIVO
1	Agrícola intensivo con cultivos anuales
2	Agrícola intensivo con cultivos perennes y anuales
3	Agropecuario intensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos
	USO AGROPECUARIO EXTENSIVO
4	Ganadero extensivo con ovinos
5	Ganadero extensivo con ovinos y vacunos
6	Ganadero extensivo con ovinos. Uso secundario: áreas sin uso (afloramiento rocoso)
7	Ganadero extensivo con ovinos y caprinos
8	Ganadero extensivo con caprinos. Uso secundario: áreas sin uso (afloramientos rocosos)
9	Agropecuario extensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos, ovinos y caprinos
10	Agropecuario extensivo con cultivos anuales, ovinos, caprinos y vacunos. Uso secundario: áreas sin uso (afloramientos rocosos)
11	Agropecuario extensivo con caprinos, ovinos y cultivos anuales. Uso secundario: áreas sin uso (áreas erosionadas)
	USO AGROSILVOPASTORIL
12	Silvopastoril con vacunos y tala selectiva
13	Silvopastoril con vacunos, caprinos y extracción de productos del bosque
14	Silvopastoril con vacunos, caprinos, ovinos y extracción de productos del bosque
15	Silvopastoril con vacunos. Uso secundario: áreas sin uso (áreas erosionadas)
16	Agrosilvopastoril con vacunos, caprinos, cultivos anuales y tala selectiva
17	Agrosilvopastoril en matorrales con cultivos anuales, caprinos, ovinos, vacunos y extracción de leña
18	Agrosilvopastoril en matorrales con caprinos, ovinos y cultivos anuales
	USO FORESTAL
19	Bosque implantado. Uso secundario: ganadero extensivo con vacunos y caprinos

Fuente: ZONISIG, 2001.

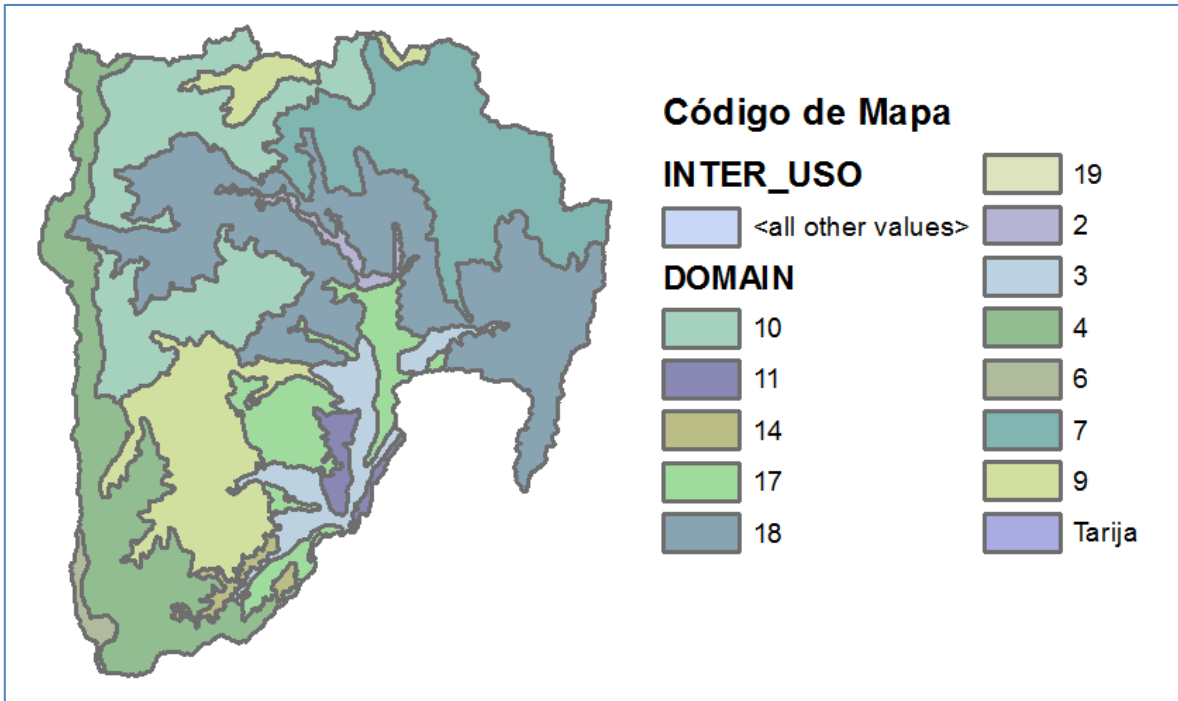


FIGURA 6.1. Mapa de Uso de Suelo Tarija

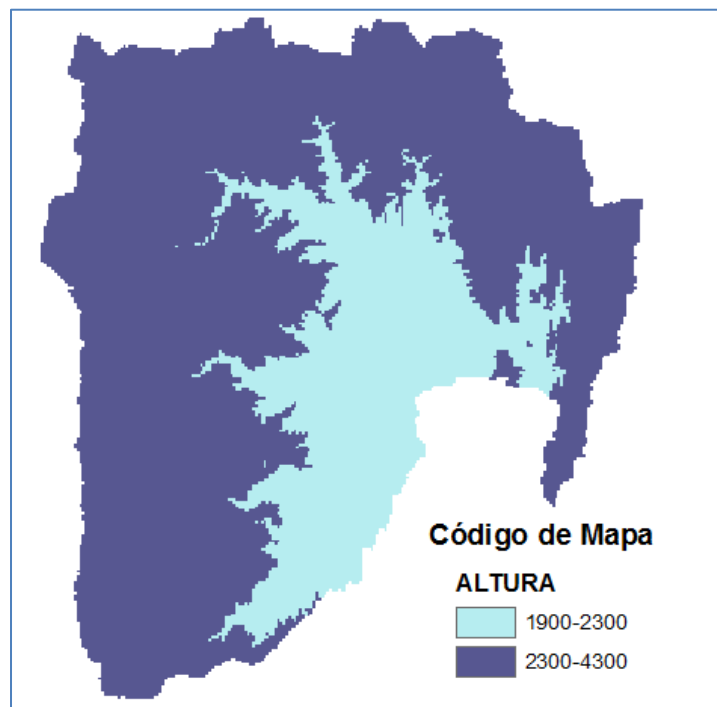


FIGURA 6.2. Mapa de áreas de expansión por debajo de la cota 2300 msnm

Se interseccionaron los mapas de uso de suelo Tarija (Figura 6.1) y el mapa de áreas de expansión por debajo de la cota 2300 msnm (Figura 6.2). Se obtuvo el mapa de expansión agrícola (Figura 6.3), donde se observa de color verde las áreas consideradas por el documento “Plan Departamental de Agua”, como tierras que tienen potencial agropecuario y además cuentan con cota y pendiente suficiente, que permite integrar estas áreas a la actividad productiva. De color naranja se observan las áreas que se encuentran por encima de los 2300 msnm, y de color rosado se aprecian las áreas que si tienen la cota y pendiente suficiente, pero que no son aptas para un adecuado uso agropecuario, como son: áreas erosionadas, áreas con afloramientos rocosos, bosques y otros.

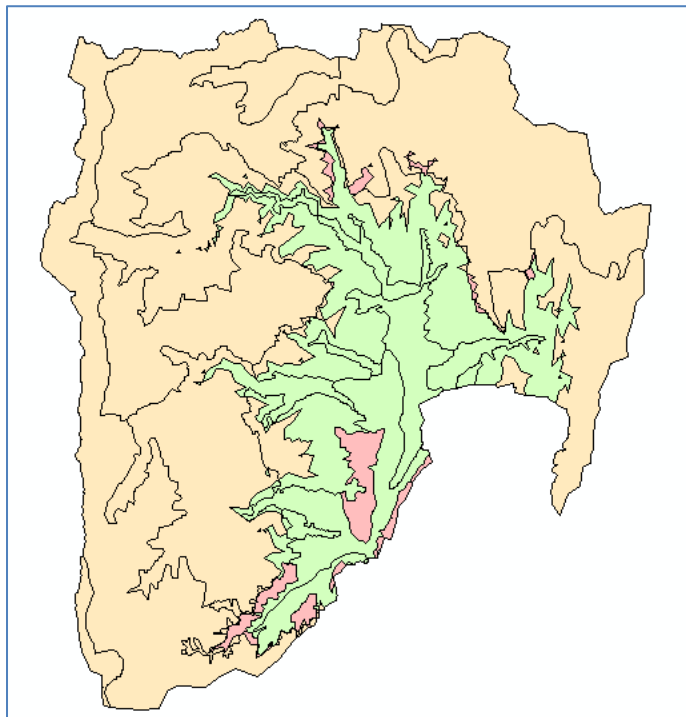


FIGURA 6.3. Mapa de áreas de expansión agrícola

Finalmente se clasifican las áreas para el nuevo mapa de cobertura vegetal de la cuenca (Figura 6.4). La clasificación se realiza comparando las nuevas áreas productivas con las áreas que actualmente se encuentran en producción, buscando características similares entre ambas áreas.

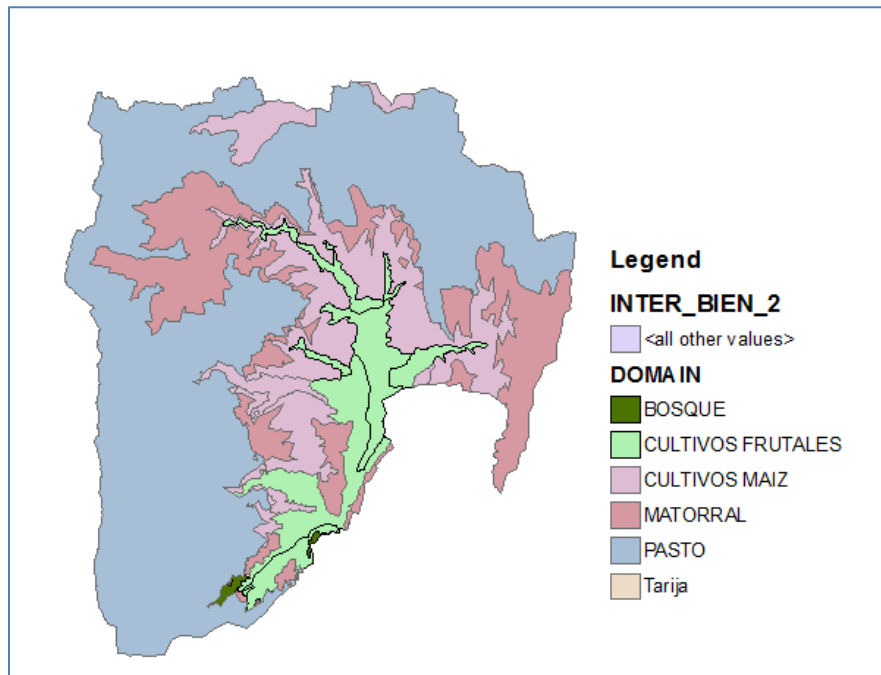


FIGURA 6.4. Nuevo mapa de cobertura vegetal - Escenario 1

El cambio de cobertura propuesto supondrá un aumento del 14,42 % de cultivos en la cuenca, distribuidos entre cultivos de maíz y cultivos frutales, como se observa en la tabla 6.2 y Figura 6.4. Además supone un incremento del 14,42% de la demanda en la cuenca.

TABLA 6.2. Tipos de uso de suelo Escenario 1

	SIN ESCENARIO	ESCENARIO 1	DIFERENCIA
USO	% ÁREA	% DE ÁREA	%
PASTO	63,53	56,42	-7,11
CULTIVO MAIZ	7,09	16,49	9,40
CULTIVO FRUTAL	4,29	9,31	5,02
BOSQUE	0,51	0,22	-0,28
MATORRALES	24,58	17,55	-7,03

Fuente: Elaboración Propia

Se introdujo el mapa de cobertura de vegetación del Escenario 1 al modelo WEAP, se aumentaron las demandas, y luego se simularon los caudales. A continuación se observa la variación de los caudales producto de la hipótesis planteada en el Escenario 1 (Figura 6.5).

Se escogió el período 1999 – 2007 para poder comparar los caudales simulados del Escenario 1, con los caudales observados y los caudales modelados en la calibración del modelo (Obrajesim), para así estimar como afectan los cambios en la cobertura vegetal a la escorrentía de la cuenca.

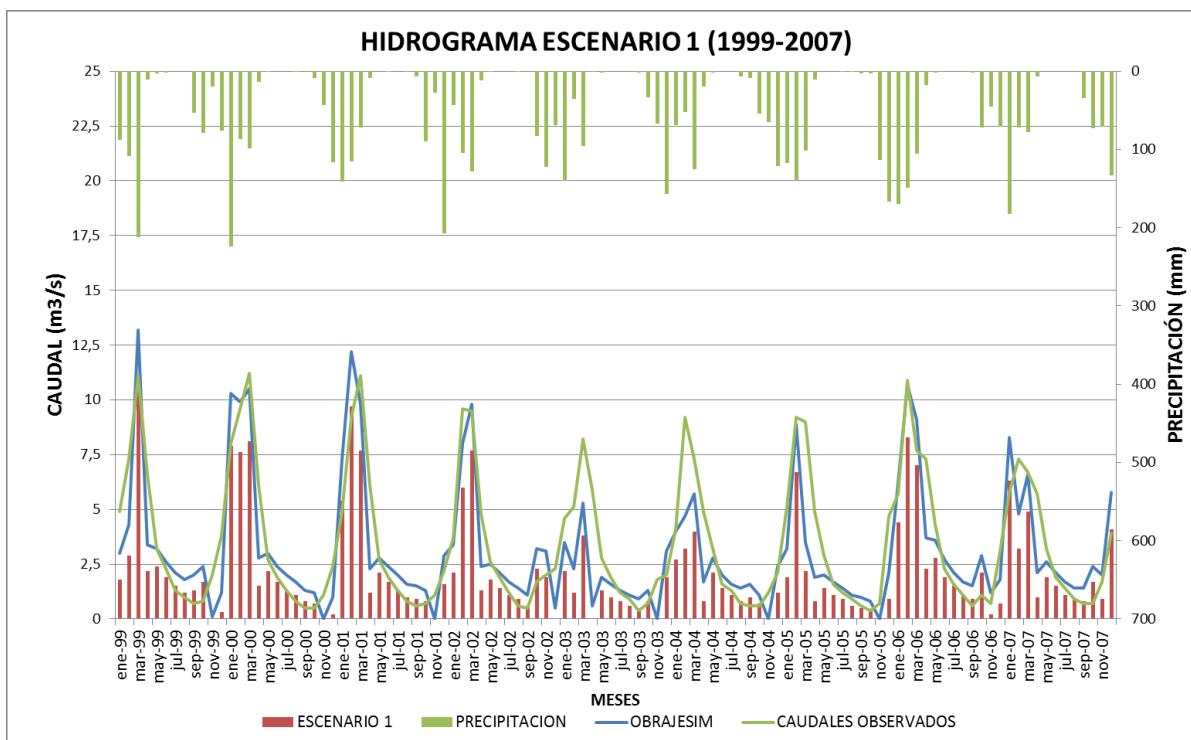


FIGURA 6.5. Variación de caudales Escenario 1

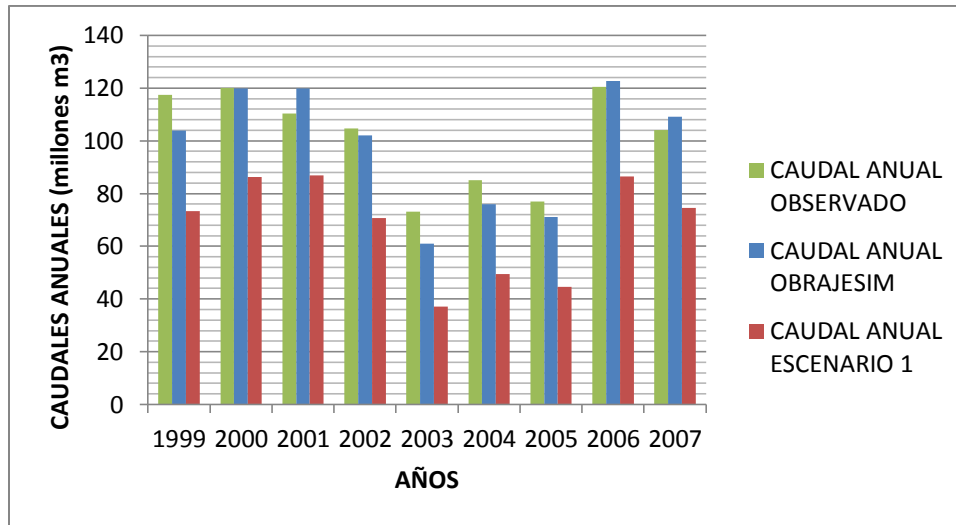


FIGURA 6.6. Comparación de caudales anuales Escenario 1

En las figuras 6.5 y 6.6 se observa como disminuyen los caudales en la cuenca como consecuencia del cambio en la cobertura vegetal de la cuenca y el aumento de las demandas. Se aprecia que anualmente disminuyen los caudales de la cuenca alrededor de 20 millones de metros cúbicos.

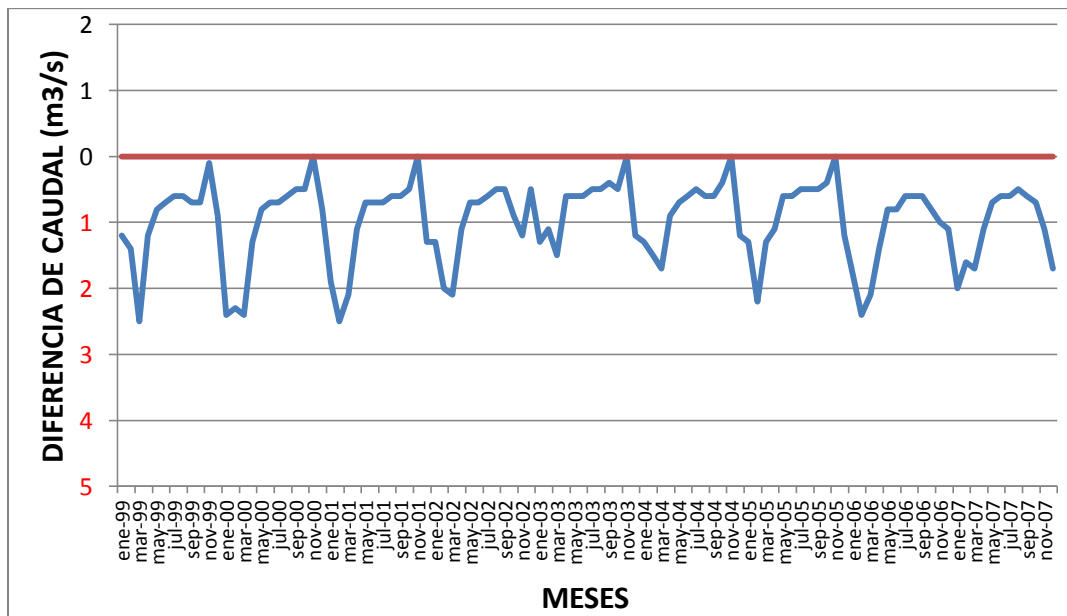


FIGURA 6.7. Diferencia entre caudales medios mensuales Escenario 1

En la Figura 6.7 se observa que los caudales medios mensuales resultantes del Escenario 1, siempre disminuyen en relación a los caudales observados y simulados (Obrajesim). Se aprecia también que el rango en que estos caudales disminuyen, está entre $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ para el mes de Noviembre y $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ para el mes de Marzo.

Además se analizará el porcentaje de satisfacción de demandas, resultante de la aplicación del Escenario 1 en la cuenca.

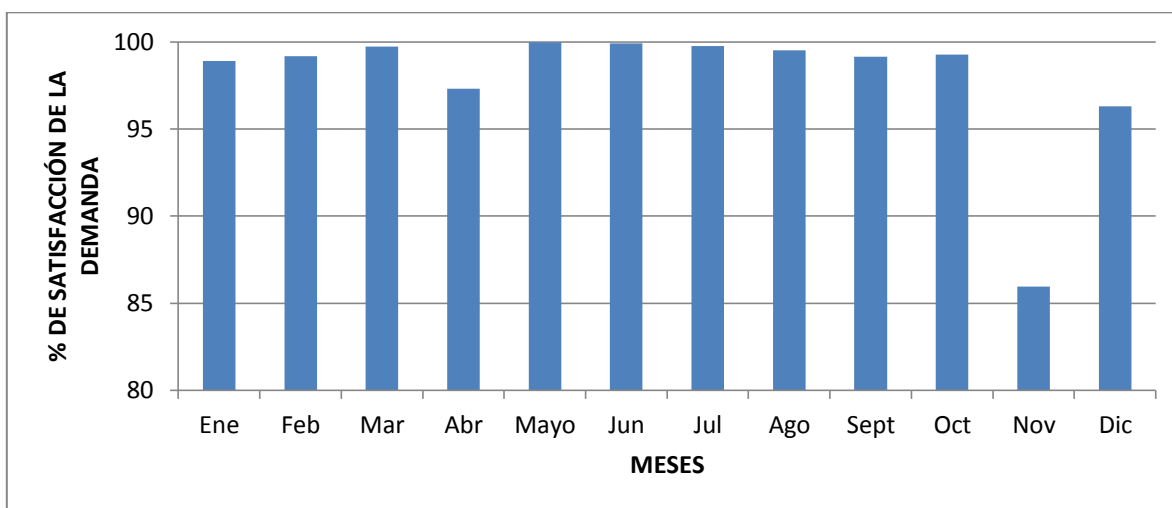


FIGURA 6.8. Porcentaje de satisfacción de la demanda de cultivos en la cuenca (Escenario 1)

La Figura 6.8 representa el porcentaje de satisfacción de la demanda de cultivos en la cuenca, se aprecian dos resultados:

- Que el único mes del año en que las demandas de cultivos se satisfacen es en el mes de mayo.
- Que el mes más crítico será el mes de Noviembre, mes en el cual se satisfacen el 86% de las demandas.

A continuación se analizarán la cobertura de la demanda poblacional para el Escenario 1. (Tabla 6.3)

TABLA 6.3. Cobertura de demanda poblacional - Escenario 1

COBERTURA DE DEMANDA POBLACIONAL (% DE SATISFACCIÓN)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
CIUDAD TARIJA	100	100	100	99,8	100	100	100	99,6	97,2	95,8	78,1	99,6
PUEBLO CALAMA	88	94	99,1	76,3	100	99,8	97,9	94,8	91,5	92,3	48,9	66,2
PUEBLO CANASMORO	100	100	100	99,2	100	100	100	100	100	100	76,9	97,5
PUEBLO CARACHI MAYU	100	100	100	99,2	100	100	100	100	100	100	76,9	97,4
PUEBLO COIMATA	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	89,4	100
PUEBLO ERQUIS	100	100	100	99,6	100	100	100	100	100	100	79,2	100
PUEBLO LA VICTORIA	100	100	100	100	100	100	100	100	98,4	96,9	80,5	100
PUEBLO SAN LORENZO	100	100	100	99,2	100	100	100	100	100	100	76,9	97,4
PUEBLO SELLA MENDEZ	100	98,9	100	96,6	100	100	100	100	100	100	72,4	95,7
PUEBLO TOMATITAS	100	100	100	99,2	100	100	100	100	100	100	77	97,4
PUEBLO TOMATAS GRANDE	100	100	100	99,2	100	100	100	100	100	100	76,9	97,4

En cuanto a la demanda poblacional, se observa que el mes más crítico será el mes de Noviembre, en el que por ejemplo, para la ciudad de Tarija solo se satisface el 78,1 % de su demanda. También se destaca que el sitio de demanda correspondiente al pueblo de Calama, presenta según el Escenario 1, un importante déficit del recurso hídrico.

6.2. Escenario 2 - Variación de las temperaturas y de las precipitaciones en la cuenca, como efectos del cambio climático.

El cambio climático como efecto de las actividades humanas es un hecho reconocido en el ámbito científico. Los estudios indican aumentos de temperatura y debido a ello cambios en el régimen de precipitación y eventos climáticos extremos, que según los pronósticos se profundizarán aún más si no se realizan acciones para frenar este proceso.

Por su parte, la población boliviana también percibe las nuevas tendencias climáticas y cada vez sufre más sus impactos en la forma de desastres que perjudican su sistema productivo y alimenticio, los recursos naturales y el ambiente donde vive. (19)

El PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo) (2013) ha determinado, a través de la sistematización de la información y conocimientos generados en torno al cambio climático, que la sociedad boliviana tiene la necesidad de contar con información acerca de los diferentes aspectos y temas estratégicos acerca del cambio climático.

El cambio climático se manifiesta a escala mundial a través de variaciones de temperatura, que a su vez tienen impactos sobre los regímenes de precipitación y la frecuencia, y el grado de eventos climáticos extremos. (20)

Según cita el PNUD, (2013), el Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) indica que la causa principal del incremento de temperatura está en el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por los seres humanos.

Estos cambios a su vez tienen impactos sobre las reservas hídricas, fenómenos de erosión y salinización, salud, productividad agropecuaria, el desplazamiento de las especies y la biodiversidad en general. (21)

Datos del IPCC a los cuales hace referencia el PNUD, 2013, indican que el aumento de la temperatura para América del Sur será de entre 1,8 a 4,5 °C y se registrarán cambios en las precipitaciones entre -12% a +12% para el 2080. (22)

TABLA 6.4. Proyecciones de temperatura y precipitaciones en América Latina

	Época del año	2020	2050	2080
Cambios en la temperatura (° C)				
Mesoamérica	Estación seca	+0,4 a +1,1	+1,1 a +3,0	+1,0 a +5,0
	Estación húmeda	+0,5 a +1,7	+1,0 a +4,0	+1,3 a +6,6
Amazonía	Estación seca	+0,7 a +1,8	+1,0 a +4,0	+1,8 a +7,5
	Estación húmeda	+0,5 a +1,5	+1,0 a +4,0	+1,6 a +6,0
América del Sur	Invierno (JJA)	+0,6 a +1,1	+1,0 a +2,9	+1,8 a 4,5
	Verano (DEF)	+0,8 a +1,2	+1,0 a +4,5	
Cambios del nivel de precipitaciones				
Mesoamérica	Estación seca	-7 a +7	-12 a +5	-20 a + 8
	Estación húmeda	-10 a +4	- 5 a +3	-30 a + 5
Amazonía	Estación seca	-10 a +4	-20 a +10	-40 a +10
	Estación húmeda	-3 a +6	-5 a +10	-10 a +10
América del Sur	Invierno (JJA)	-5 a +3	-12 a +10	-12 a +12
	Verano (DEF)	-3 a +5	-5 a +10	-10 a +10

Fuente: PNUD, 2013.

TABLA 6.5. Impacto económico y social de episodios El Niño/La Niña en el país

Episodios El Niño/Niña	Población afectada (damnificados directos)	Daños totales (millones de dólares)				Impacto sobre el PIB (%)	Impacto sobre el gasto de gobierno (%)
		Impacto económico total	Daños directos	Pérdida en flujos	Efectos en el sector externo/a		
1982-1983	1.600.000	836,5	521,6	314,9	101	7,15	33,6/92,01
1997-1998	135.000	514,9	207,9	307,0	32	6,2	45,47
2006-2007	562.594	379,9	207,5	172,4	18	4,5	38,37
2007-2008*	618.740	757,5				1	

Fuente: PNUD, 2013.

6.2.1. Cambio climático en Bolivia

Cambios de temperatura. Sobre la base de estudios con la aplicación del modelo PRECIS y a partir de diferentes escenarios, indicados en el documento “El impacto del cambio climático en la biodiversidad en Bolivia”, se estima un aumento en temperatura en Bolivia de 1-2°C hasta 2030 y de 5-6°C hasta 2100, en comparación con los valores promedios

entre 1961-1990 y con incrementos más extremos en el altiplano y la Amazonia. Estos datos coinciden con los de Seiler (2009) citados por PNUD, (2013): un aumento en temperatura de 1,3 a 1,6°C para el año 2030 y entre 4,8 a 6°C para el año 2100, en comparación con la temperatura media de 1961. Según Andersen y Mamani (2009), los cambios previstos a largo plazo por el modelo PRECIS son aumentos en temperatura de 3,7-5,1°C (más en el norte del país y más en el altiplano) y aumentos en la variabilidad de temperaturas y en la variabilidad de precipitación en todos los municipios. Esta información coincide con los datos de PNUD (2013) que cita García et al. (2006), indicando tendencias de claros aumentos de la temperatura máxima y disminución de la temperatura mínima para el año 2050. (23)

Cambios en precipitación. Seth et al. (2010) en PNUD (2013) señala un descenso en la precipitación entre las latitudes 10°S y 20°S (Bolivia se encuentra en las latitudes 19°S, 20°S y 21°S) durante la primavera (septiembre-noviembre) y un aumento de la misma entre diciembre y abril. Esto está confirmado por los datos de PNCC (2000) en PNUD (2013), que muestran una reducción entre los meses de septiembre-octubre y un aumento en el mes de noviembre, lo que determina además un acortamiento en la fase de lluvias. Andersen y Mamani (2009) afirman que, a través del modelo PRECIS, se prevé una reducción de precipitación en áreas actualmente secas y un incremento en áreas que actualmente reciben abundantes cantidades de precipitación. Cambio en patrones actuales de distribución e intensidad de lluvias. Se indica un incremento en precipitación durante la época de lluvia de las tierras bajas y menos precipitación durante la época seca, mientras que el altiplano demuestra un patrón al contrario: menos precipitación durante la época lluviosa y más precipitación durante la temporada seca. (24)

Mayor frecuencia de eventos climáticos extremos como parte de los impactos del cambio climático: deslizamientos e inundaciones en el oriente del país (la región amazónica y brasileño-paranaense), fuertes precipitaciones sobre la Cordillera Oriental, tierras bajas del sur, llanos orientales y el Beni, acompañadas por deslizamientos, aludes torrenciales, desbordes de ríos e inundaciones; heladas, déficit de precipitaciones y granizadas en el altiplano (región andina) y frecuencia de tormentas tropicales y déficit en la precipitación

en gran parte de la región amazónica, lo que ocasiona un aumento en incendios forestales. Estos fenómenos provocan enormes pérdidas económicas para el país. (25)

6.2.2. Escenario propuesto para el proyecto

En base a los datos analizados en la sección anterior, en el presente trabajo se aplicarán cambios en la temperatura y en la precipitación, según lo indica la siguiente tabla:

TABLA 6.6. Cambios en la temperatura y precipitación propuestos en el Escenario 2

Período	Cambios en la temperatura (°C)	Cambios en la precipitación
Seco	(+1)	(-20 %)
Húmedo	(+2)	(+20 %)

Fuente: Elaboración Propia

También se simulará la redistribución del régimen de precipitación, tomando como período húmedo solo los meses de Diciembre a Marzo.

A continuación se observan los resultados de la aplicación del Escenario 2 en la cuenca en estudio.

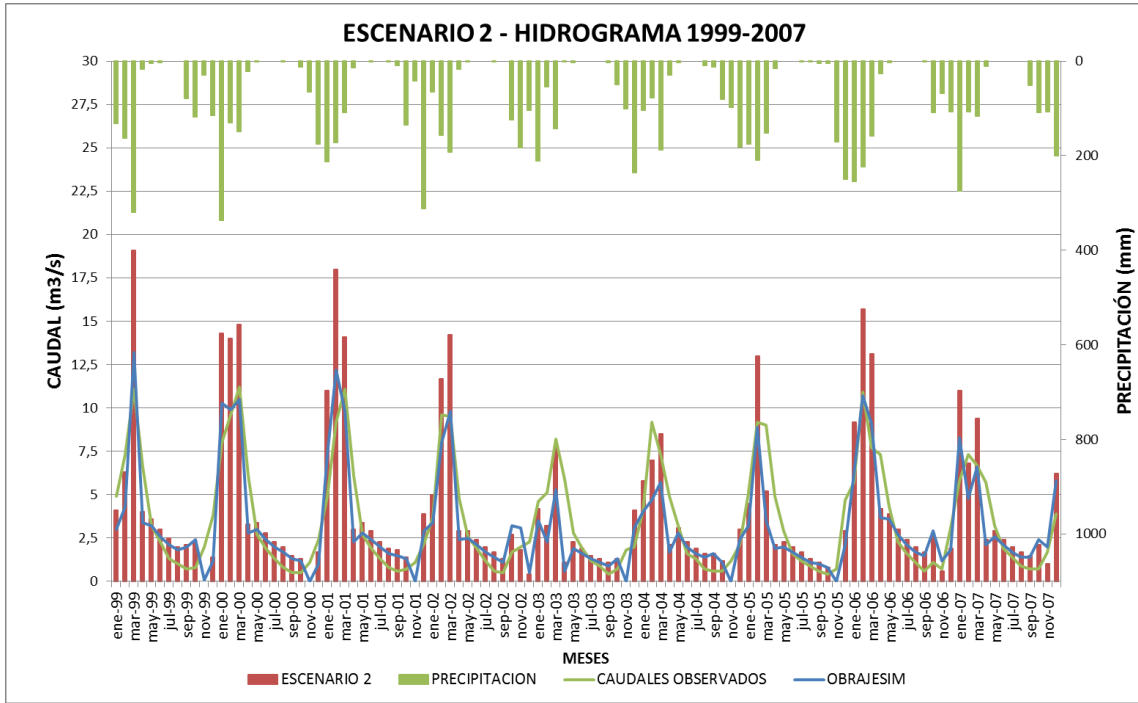


FIGURA 6.9. Variación de caudales Escenario 2

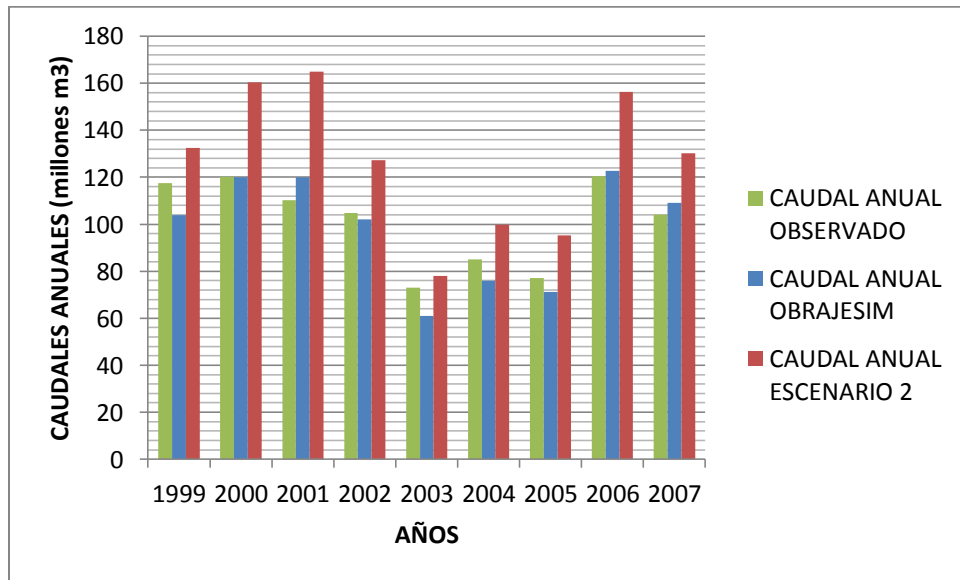


FIGURA 6.10. Comparación de caudales anuales Escenario 2

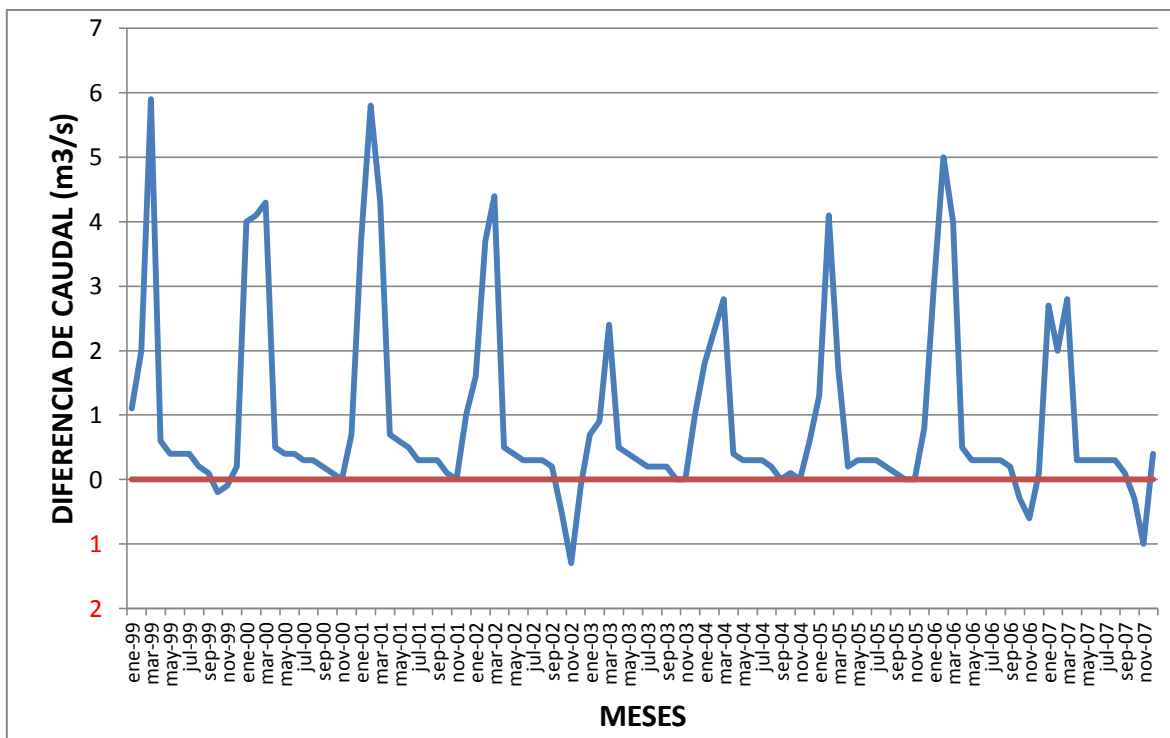


FIGURA 6.11. Diferencia entre caudales medios mensuales Escenario 2

Analizando los resultados obtenidos de la aplicación del Escenario 2 en la cuenca, se aprecian las siguientes observaciones:

- Un aumento de los caudales medios mensuales en los meses de Febrero y Marzo. Era de esperar dicho incremento debido a que, como consecuencia del cambio climático el Escenario 2, prevé que las lluvias se incrementarán pero concentradas en pocos meses.
- En la Figura 6.10 se aprecia un aumento en la disponibilidad de los caudales anuales, sin embargo dicho incremento es engañoso, ya que se debe al cambio de los patrones de distribución e intensidad de lluvias que se concentra en pocos meses.
- Se observa un aumento de los caudales medios mensuales de entre los 4 y los 6 m³/s en el mes de Marzo. Y una disminución de los caudales medios esperados para los meses de Octubre y Noviembre.
- Las observaciones anteriores hacen prever una mayor frecuencia de eventos climáticos extremos como parte de los impactos del cambio climático, especialmente de inundaciones en la cuenca en estudio.

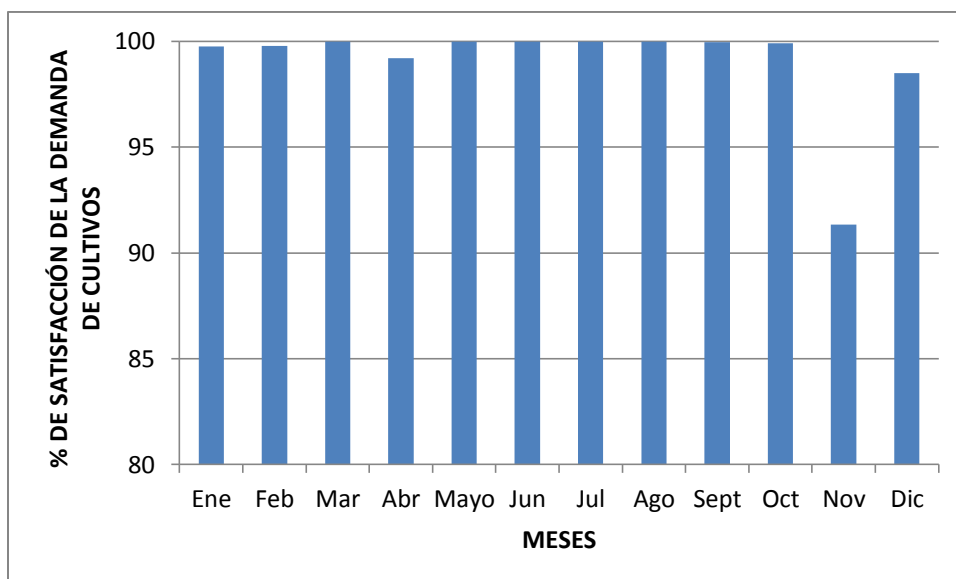


FIGURA 6.12. Porcentaje de satisfacción de la demanda de cultivos en la cuenca (Escenario 2)

TABLA 6.7. Cobertura de demanda poblacional - Escenario 2

COBERTURA DE DEMANDA POBLACIONAL (% DE SATISFACCIÓN)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	Mayo	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
CIUDAD TARIJA	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	84,9	100
PUEBLO CALAMA	98,7	97,9	100	93	100	100	100	100	100	99,3	53,8	82,4
PUEBLO CANASMORO	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90,7	100
PUEBLO CARACHI MAYU	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90,7	100
PUEBLO COIMATA	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	91,1	100
PUEBLO ERQUIS	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	87,4	100
PUEBLO LA VICTORIA	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	87,9	100
PUEBLO SAN LORENZO	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90,2	100
PUEBLO SELLA MENDEZ	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	85,2	100
PUEBLO TOMATITAS	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90,1	100
PUEBLO TOMATAS GRANDE	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	100

En cuanto a la cobertura de demandas en la cuenca, se aprecia que para el Escenario 2 el porcentaje de satisfacción de las demandas, tanto de cultivos, como demandas poblacionales es mejor que el resultante para el Escenario 1.

6. ESCENARIOS

Como escenarios se busca simular los efectos del cambio climático en la cuenca Alta del río Guadalquivir. Entre los efectos más directos que puede haber en la cuenca por el cambio climático está la alteración de los componentes del ciclo hidrológico y la disponibilidad de recursos hídricos.

La variación de la disponibilidad de los recursos hídricos ocasionada por el cambio climático tendrá efectos sobre el desarrollo humano. Aunque no se saben con exactitud los efectos que se verán a nivel local, se espera que haya cambios en la disponibilidad y la calidad del agua, debido a la modificación de la precipitación.

Las variaciones en la evapotranspiración y precipitación modifican el escurrimiento y la recarga de los acuíferos, así como los niveles de los cuerpos de agua. El aumento o reducción de los caudales tiene impacto directo en los sistemas de suministro de agua y en la producción agrícola. Fuera de los cambios en las cantidades anuales, la naturaleza de eventos aislados, en especial de la precipitación, podría ocasionar problemas como:

- Perturbaciones en la intensidad y frecuencias de las inundaciones y sequías, en el control de avenidas, etc.
- Desregulaciones de los caudales en los ríos.
- Incremento de la erosión debido a la modificación de la cobertura vegetal de la cuenca.
- Variación de la evapotranspiración de los cultivos, implicando cambios en la producción agrícola.
- Insatisfacción de la demanda de usuarios directos e indirectos (agricultura, consumo humano e industrial, recreativo, etc.).
- Menor zona regable (cambios en el ciclo fenológico del cultivo, régimen e intensidad de la precipitación en la zona regable).

Para cuantificar el efecto de un cambio climático esperado sobre los recursos hídricos de la cuenca en estudio, se realizaron dos hipótesis:

1. Una expansión lógica de la frontera agrícola en la cuenca. (Escenario 1)

2. Una variación de las temperaturas y de las precipitaciones en la cuenca, como efectos del cambio climático. (Escenario 2)

6.1. Escenario 1 – Cambio de la cobertura vegetal en la cuenca.

Para el escenario de variación de los usos y coberturas del suelo de la cuenca en estudio, se analizó el documento “Plan Departamental de Agua”, publicado por la Gobernación del Departamento de Tarija en el 2013, se determinó que el cambio en la cobertura vegetal se deberá principalmente al crecimiento de las áreas de cultivos, tendiendo a mayores grados de intensificación y de especialización productiva, según cada región, en productos rentables con buenas perspectivas de mercado, bajo el enfoque de seguridad alimentaria con soberanía. En dicho documento, se presenta un resumen de las tierras con mayor potencial agropecuario – poniendo énfasis en lo agrícola – del departamento de Tarija, tanto a nivel general como por regiones (unidades territoriales) y municipios. En el entendido, de que el componente recursos hídricos y su potencial de agua para riego, será fundamental para el desarrollo sostenible del sector productivo primario del territorio tarijeño.

Las categorías consideradas como tierras con potencial agropecuario, son: agrícola intensivo, agropecuario intensivo, agropecuario extensivo, y las áreas agrosilvopastoriles, tomando en cuenta que son áreas donde se puede expandir el riego mediante la construcción o mejoramiento de los sistemas de riego existentes y lograr riego permanente con el objeto de aumentar la producción. (18)

Estas áreas potenciales presentan características similares a las áreas que actualmente se encuentran dentro de la explotación agrícola.

La aptitud del suelo de estas nuevas áreas puede permitir desarrollar cualquier tipo de actividad agropecuaria, de existir alguna limitante se podrá corregir para que estas nuevas áreas se integren a la explotación.

Las nuevas áreas y al igual que las que se encuentran en producción, tienen procesos erosivos en constante avance, la desertificación no es visible, la geología no cambia con

relación a las otras áreas y la presencia de sales no es limitante para el desarrollo de los cultivos, no existe contaminación visible.

Estas nuevas áreas potenciales no cuentan con restricciones.

Es por eso que, para la variación de los usos y coberturas del suelo, propuestas en el Escenario 1, y analizando el mapa de Uso de Suelo Tarija, proporcionado por el ZONISIG en el 2001, se llegó a la conclusión de que las tierras a considerar para un aumento de cultivos en la cuenca, serán: las que presentan un uso Agropecuario extensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos, ovinos y caprinos (código 9 del mapa de uso de suelo Tarija); Agrosilvopastoril en matorrales con caprinos, ovinos y cultivos anuales (código 18 del mapa de uso de suelo Tarija); y las que presentan un uso Agrosilvopastoril en matorrales con cultivos anuales, caprinos, ovinos, vacunos y extracción de leña (código 17 del mapa de uso de suelo Tarija).

Las nuevas áreas de expansión cuentan con pendientes planas o casi planas, estas áreas son regadas porque existe un déficit de agua pero cuentan con cota y pendiente que permite integrar estas áreas a la actividad productiva. Y para garantizar el abastecimiento de agua a estas nuevas áreas de producción agrícola, es que se toma en cuenta para las áreas de expansión, aquellas que se encuentran por debajo de los 2300 msnm, ya que la mayoría de las zonas agrícolas que actualmente se encuentran en producción se encuentran por debajo de dicha cota. (Figura 6.2)

TABLA 6.1. Leyenda de Mapa de Uso de Suelo Tarija

MAPA DE USO DE SUELO TARIJA	
Código mapa	Descripción
	USO AGROPECUARIO INTENSIVO
1	Agrícola intensivo con cultivos anuales
2	Agrícola intensivo con cultivos perennes y anuales
3	Agropecuario intensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos
	USO AGROPECUARIO EXTENSIVO
4	Ganadero extensivo con ovinos
5	Ganadero extensivo con ovinos y vacunos
6	Ganadero extensivo con ovinos. Uso secundario: áreas sin uso (afloramiento rocoso)
7	Ganadero extensivo con ovinos y caprinos
8	Ganadero extensivo con caprinos. Uso secundario: áreas sin uso (afloramientos rocosos)
9	Agropecuario extensivo con cultivos anuales y perennes y vacunos, ovinos y caprinos
10	Agropecuario extensivo con cultivos anuales, ovinos, caprinos y vacunos. Uso secundario: áreas sin uso (afloramientos rocosos)
11	Agropecuario extensivo con caprinos, ovinos y cultivos anuales. Uso secundario: áreas sin uso (áreas erosionadas)
	USO AGROSILVOPASTORIL
12	Silvopastoril con vacunos y tala selectiva
13	Silvopastoril con vacunos, caprinos y extracción de productos del bosque
14	Silvopastoril con vacunos, caprinos, ovinos y extracción de productos del bosque
15	Silvopastoril con vacunos. Uso secundario: áreas sin uso (áreas erosionadas)
16	Agrosilvopastoril con vacunos, caprinos, cultivos anuales y tala selectiva
17	Agrosilvopastoril en matorrales con cultivos anuales, caprinos, ovinos, vacunos y extracción de leña
18	Agrosilvopastoril en matorrales con caprinos, ovinos y cultivos anuales
	USO FORESTAL
19	Bosque implantado. Uso secundario: ganadero extensivo con vacunos y caprinos

Fuente: ZONISIG, 2001.

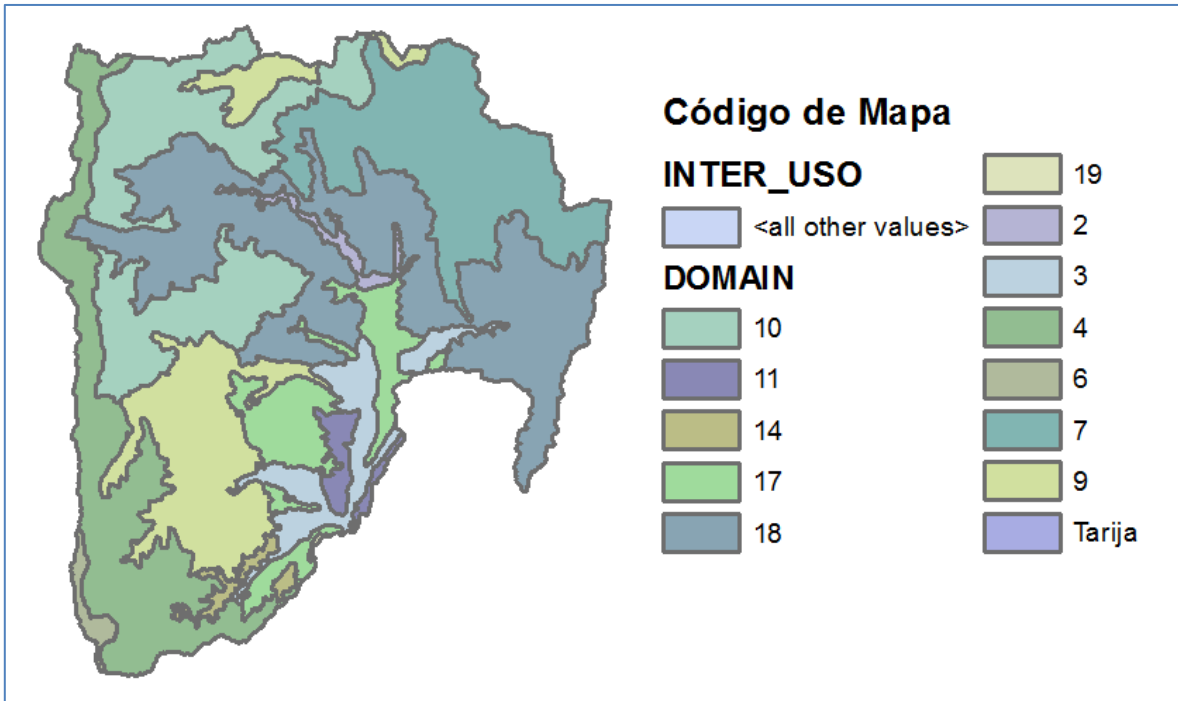


FIGURA 6.1. Mapa de Uso de Suelo Tarija

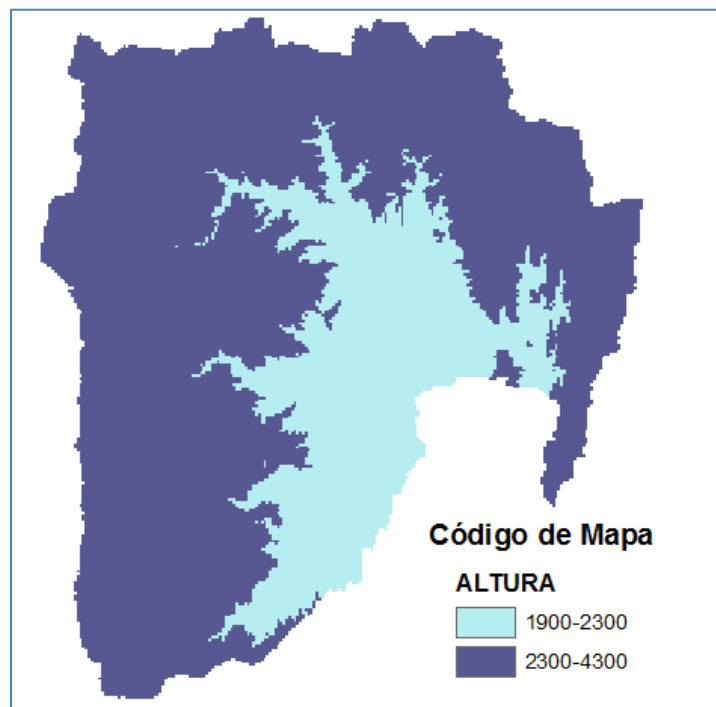


FIGURA 6.2. Mapa de áreas de expansión por debajo de la cota 2300 msnm

Se intersecaron los mapas de uso de suelo Tarija (Figura 6.1) y el mapa de áreas de expansión por debajo de la cota 2300 msnm (Figura 6.2). Se obtuvo el mapa de expansión agrícola (Figura 6.3), donde se observa de color verde las áreas consideradas por el documento “Plan Departamental de Agua”, como tierras que tienen potencial agropecuario y además cuentan con cota y pendiente suficiente, que permite integrar estas áreas a la actividad productiva. De color naranja se observan las áreas que se encuentran por encima de los 2300 msnm, y de color rosado se aprecian las áreas que si tienen la cota y pendiente suficiente, pero que no son aptas para un adecuado uso agropecuario, como son: áreas erosionadas, áreas con afloramientos rocosos, bosques y otros.

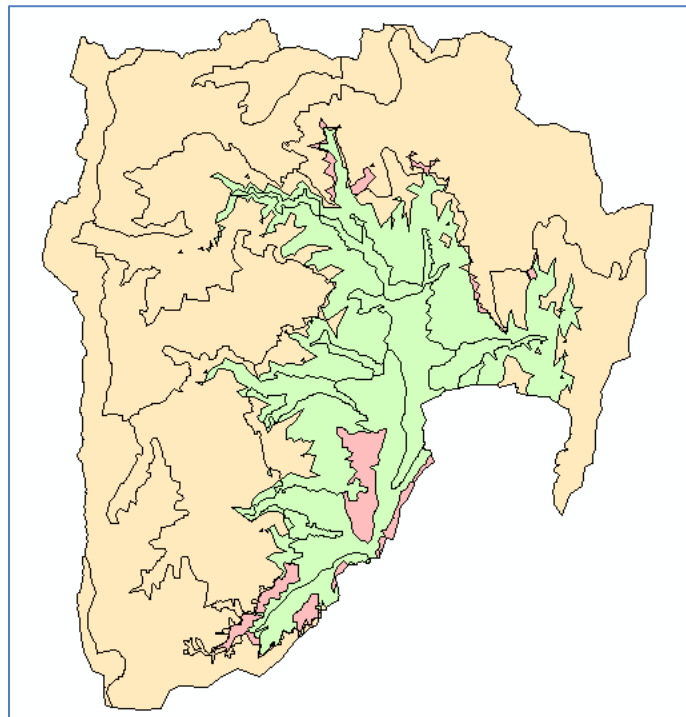


FIGURA 6.3. Mapa de áreas de expansión agrícola

Finalmente se clasifican las áreas para el nuevo mapa de cobertura vegetal de la cuenca (Figura 6.4). La clasificación se realiza comparando las nuevas áreas productivas con las áreas que actualmente se encuentran en producción, buscando características similares entre ambas áreas.

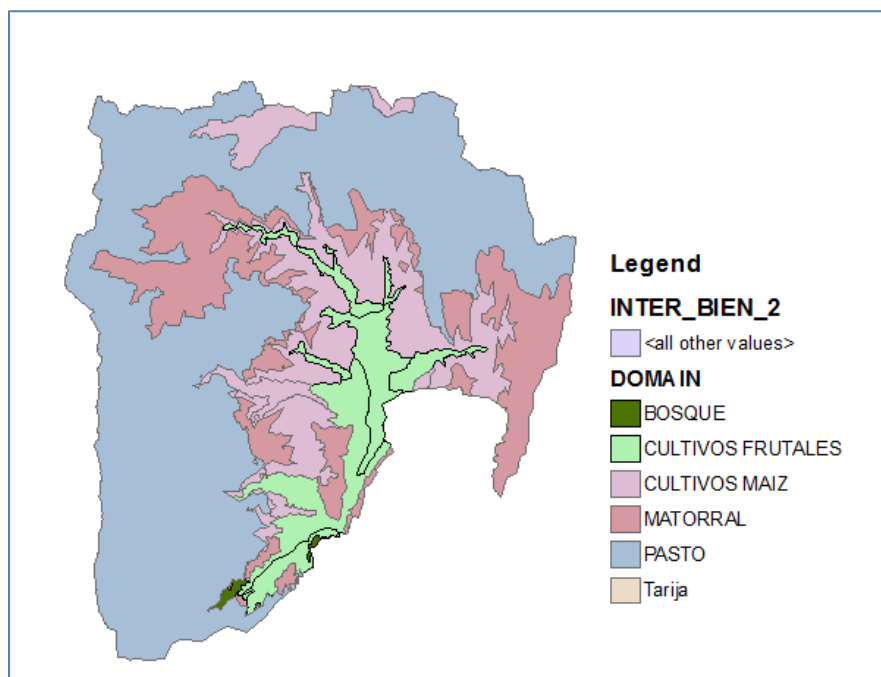


FIGURA 6.4. Nuevo mapa de cobertura vegetal - Escenario 1

El cambio de cobertura propuesto supondrá un aumento del 14,42 % de cultivos en la cuenca, distribuidos entre cultivos de maíz y cultivos frutales, como se observa en la tabla 6.2 y Figura 6.4. Además supone un incremento del 14,42% de la demanda en la cuenca.

TABLA 6.2. Tipos de uso de suelo Escenario 1

	SIN ESCENARIO	ESCENARIO 1	DIFERENCIA
USO	% ÁREA	% DE ÁREA	%
PASTO	63,53	56,42	-7,11
CULTIVO MAIZ	7,09	16,49	9,40
CULTIVO FRUTAL	4,29	9,31	5,02
BOSQUE	0,51	0,22	-0,28
MATORRALES	24,58	17,55	-7,03

Fuente: Elaboración Propia

Se introdujo el mapa de cobertura de vegetación del Escenario 1 al modelo WEAP, se aumentaron las demandas, y luego se simularon los caudales. A continuación se observa la variación de los caudales producto de la hipótesis planteada en el Escenario 1 (Figura 6.5).

Se escogió el período 1999 – 2007 para poder comparar los caudales simulados del Escenario 1, con los caudales observados y los caudales modelados en la calibración del modelo (Obrajesim), para así estimar como afectan los cambios en la cobertura vegetal a la escorrentía de la cuenca.

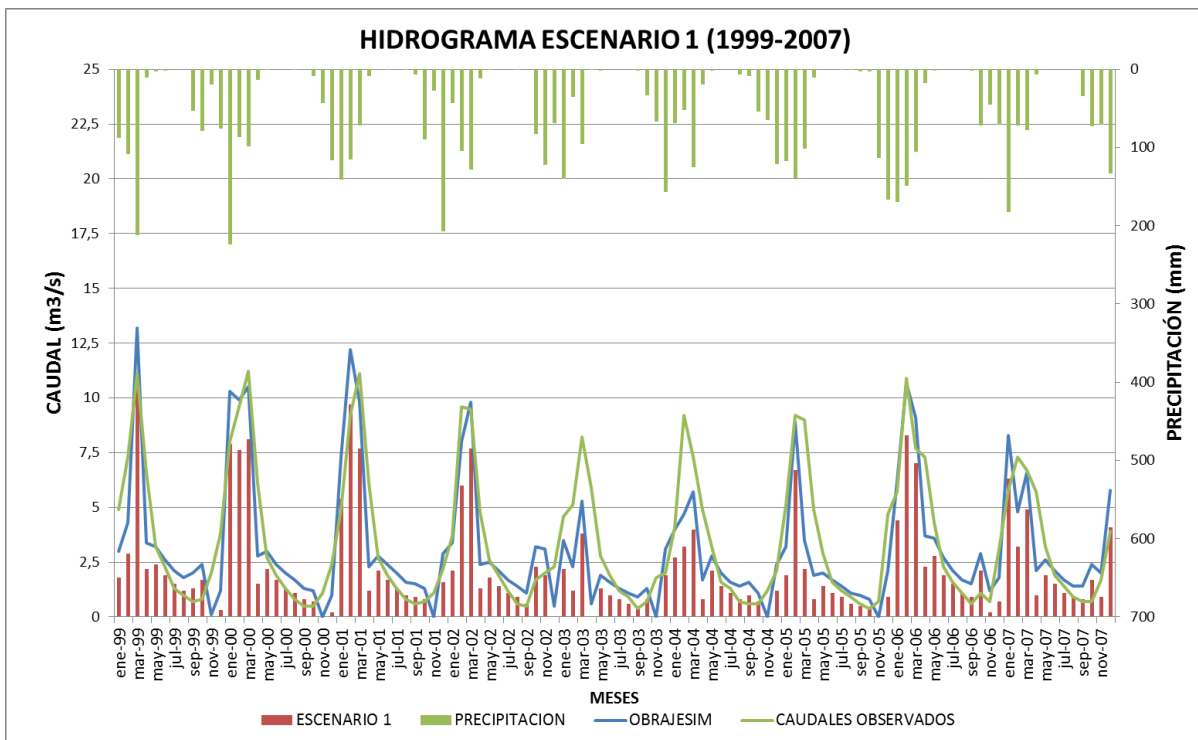


FIGURA 6.5. Variación de caudales Escenario 1

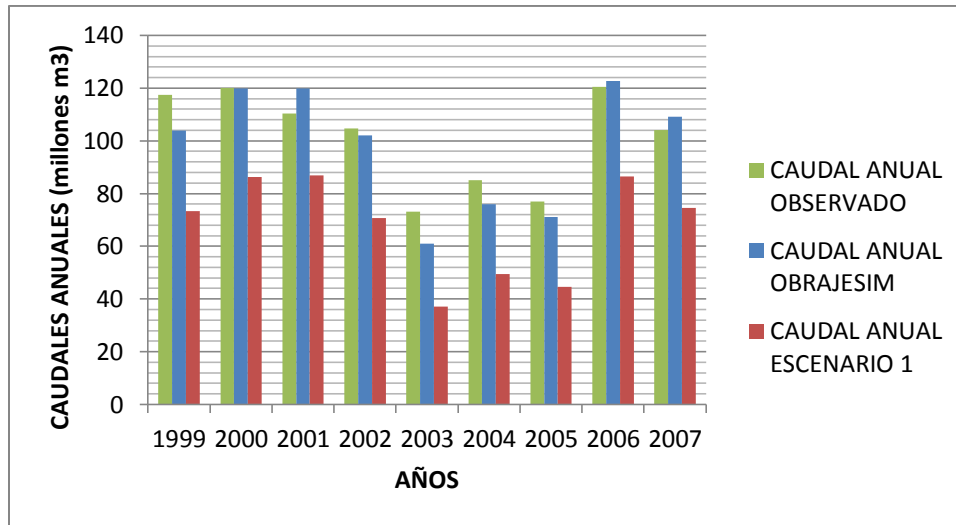


FIGURA 6.6. Comparación de caudales anuales Escenario 1

En las figuras 6.5 y 6.6 se observa como disminuyen los caudales en la cuenca como consecuencia del cambio en la cobertura vegetal de la cuenca y el aumento de las demandas. Se aprecia que anualmente disminuyen los caudales de la cuenca alrededor de 20 millones de metros cúbicos.

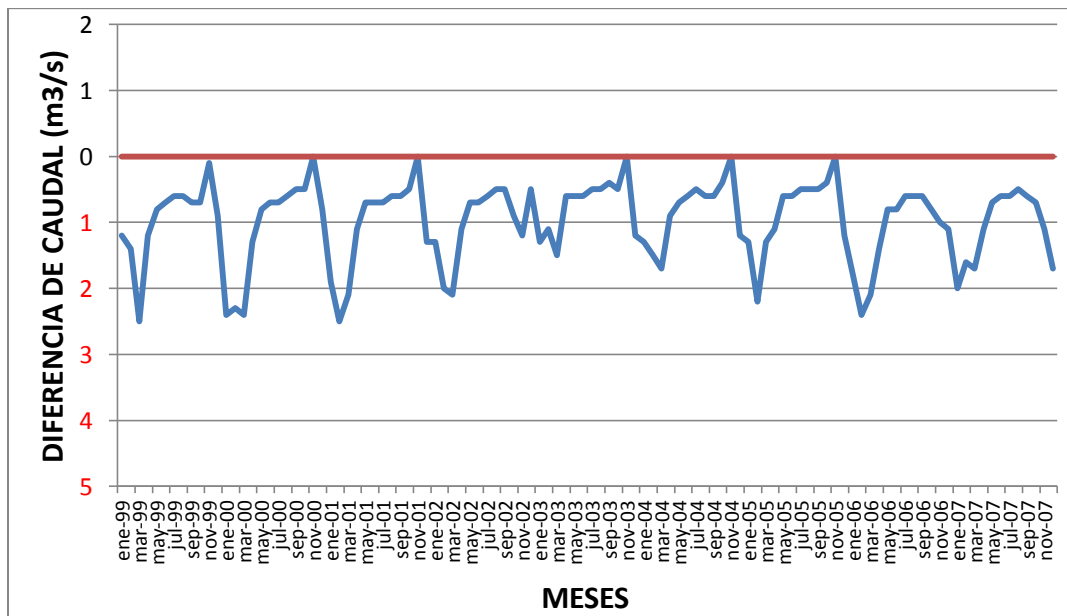


FIGURA 6.7. Diferencia entre caudales medios mensuales Escenario 1

En la Figura 6.7 se observa que los caudales medios mensuales resultantes del Escenario 1, siempre disminuyen en relación a los caudales observados y simulados (Obrajesim). Se aprecia también que el rango en que estos caudales disminuyen, está entre $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ para el mes de Noviembre y $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ para el mes de Marzo.

Además se analizará el porcentaje de satisfacción de demandas, resultante de la aplicación del Escenario 1 en la cuenca.

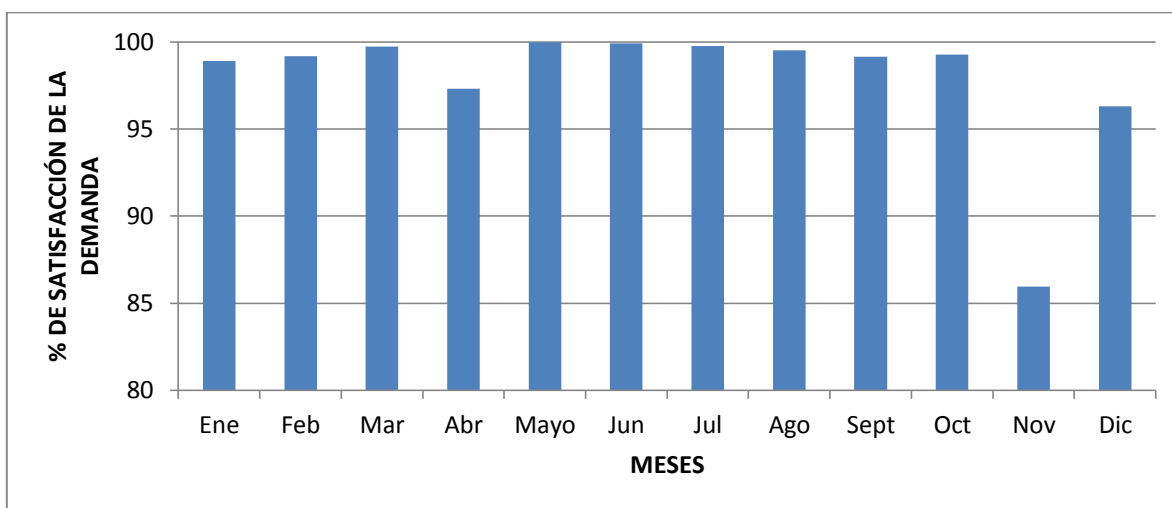


FIGURA 6.8. Porcentaje de satisfacción de la demanda de cultivos en la cuenca (Escenario 1)

La Figura 6.8 representa el porcentaje de satisfacción de la demanda de cultivos en la cuenca, se aprecian dos resultados:

- Que el único mes del año en que las demandas de cultivos se satisfacen es en el mes de mayo.
- Que el mes más crítico será el mes de Noviembre, mes en el cual se satisfacen el 86% de las demandas.

A continuación se analizarán la cobertura de la demanda poblacional para el Escenario 1. (Tabla 6.3)

TABLA 6.3. Cobertura de demanda poblacional - Escenario 1

COBERTURA DE DEMANDA POBLACIONAL (% DE SATISFACCIÓN)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
CIUDAD TARIJA	100	100	100	99,8	100	100	100	99,6	97,2	95,8	78,1	99,6
PUEBLO CALAMA	88	94	99,1	76,3	100	99,8	97,9	94,8	91,5	92,3	48,9	66,2
PUEBLO CANASMORO	100	100	100	99,2	100	100	100	100	100	100	76,9	97,5
PUEBLO CARACHI MAYU	100	100	100	99,2	100	100	100	100	100	100	76,9	97,4
PUEBLO COIMATA	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	89,4	100
PUEBLO ERQUIS	100	100	100	99,6	100	100	100	100	100	100	79,2	100
PUEBLO LA VICTORIA	100	100	100	100	100	100	100	100	98,4	96,9	80,5	100
PUEBLO SAN LORENZO	100	100	100	99,2	100	100	100	100	100	100	76,9	97,4
PUEBLO SELLA MENDEZ	100	98,9	100	96,6	100	100	100	100	100	100	72,4	95,7
PUEBLO TOMATITAS	100	100	100	99,2	100	100	100	100	100	100	77	97,4
PUEBLO TOMATAS GRANDE	100	100	100	99,2	100	100	100	100	100	100	76,9	97,4

En cuanto a la demanda poblacional, se observa que el mes más crítico será el mes de Noviembre, en el que por ejemplo, para la ciudad de Tarija solo se satisface el 78,1 % de su demanda. También se destaca que el sitio de demanda correspondiente al pueblo de Calama, presenta según el Escenario 1, un importante déficit del recurso hídrico.

6.2. Escenario 2 - Variación de las temperaturas y de las precipitaciones en la cuenca, como efectos del cambio climático.

El cambio climático como efecto de las actividades humanas es un hecho reconocido en el ámbito científico. Los estudios indican aumentos de temperatura y debido a ello cambios en el régimen de precipitación y eventos climáticos extremos, que según los pronósticos se profundizarán aún más si no se realizan acciones para frenar este proceso.

Por su parte, la población boliviana también percibe las nuevas tendencias climáticas y cada vez sufre más sus impactos en la forma de desastres que perjudican su sistema productivo y alimenticio, los recursos naturales y el ambiente donde vive. (19)

El PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo) (2013) ha determinado, a través de la sistematización de la información y conocimientos generados en torno al cambio climático, que la sociedad boliviana tiene la necesidad de contar con información acerca de los diferentes aspectos y temas estratégicos acerca del cambio climático.

El cambio climático se manifiesta a escala mundial a través de variaciones de temperatura, que a su vez tienen impactos sobre los regímenes de precipitación y la frecuencia, y el grado de eventos climáticos extremos. (20)

Según cita el PNUD, (2013), el Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) indica que la causa principal del incremento de temperatura está en el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por los seres humanos.

Estos cambios a su vez tienen impactos sobre las reservas hídricas, fenómenos de erosión y salinización, salud, productividad agropecuaria, el desplazamiento de las especies y la biodiversidad en general. (21)

Datos del IPCC a los cuales hace referencia el PNUD, 2013, indican que el aumento de la temperatura para América del Sur será de entre 1,8 a 4,5 °C y se registrarán cambios en las precipitaciones entre -12% a +12% para el 2080. (22)

TABLA 6.4. Proyecciones de temperatura y precipitaciones en América Latina

	Época del año	2020	2050	2080
Cambios en la temperatura (° C)				
Mesoamérica	Estación seca	+0,4 a +1,1	+1,1 a +3,0	+1,0 a +5,0
	Estación húmeda	+0,5 a +1,7	+1,0 a +4,0	+1,3 a +6,6
Amazonía	Estación seca	+0,7 a +1,8	+1,0 a +4,0	+1,8 a +7,5
	Estación húmeda	+0,5 a +1,5	+1,0 a +4,0	+1,6 a +6,0
América del Sur	Invierno (JJA)	+0,6 a +1,1	+1,0 a +2,9	+1,8 a 4,5
	Verano (DEF)	+0,8 a +1,2	+1,0 a +4,5	
Cambios del nivel de precipitaciones				
Mesoamérica	Estación seca	-7 a +7	-12 a +5	-20 a + 8
	Estación húmeda	-10 a +4	- 5 a +3	-30 a + 5
Amazonía	Estación seca	-10 a +4	-20 a +10	-40 a +10
	Estación húmeda	-3 a +6	-5 a +10	-10 a +10
América del Sur	Invierno (JJA)	-5 a +3	-12 a +10	-12 a +12
	Verano (DEF)	-3 a +5	-5 a +10	-10 a +10

Fuente: PNUD, 2013.

TABLA 6.5. Impacto económico y social de episodios El Niño/La Niña en el país

Episodios El Niño/Niña	Población afectada (damnificados directos)	Daños totales (millones de dólares)				Impacto sobre el PIB (%)	Impacto sobre el gasto de gobierno (%)
		Impacto económico total	Daños directos	Pérdida en flujos	Efectos en el sector externo/a		
1982-1983	1.600.000	836,5	521,6	314,9	101	7,15	33,6/92,01
1997-1998	135.000	514,9	207,9	307,0	32	6,2	45,47
2006-2007	562.594	379,9	207,5	172,4	18	4,5	38,37
2007-2008*	618.740	757,5				1	

Fuente: PNUD, 2013.

6.2.1. Cambio climático en Bolivia

Cambios de temperatura. Sobre la base de estudios con la aplicación del modelo PRECIS y a partir de diferentes escenarios, indicados en el documento “El impacto del cambio climático en la biodiversidad en Bolivia”, se estima un aumento en temperatura en Bolivia de 1-2°C hasta 2030 y de 5-6°C hasta 2100, en comparación con los valores promedios

entre 1961-1990 y con incrementos más extremos en el altiplano y la Amazonia. Estos datos coinciden con los de Seiler (2009) citados por PNUD, (2013): un aumento en temperatura de 1,3 a 1,6°C para el año 2030 y entre 4,8 a 6°C para el año 2100, en comparación con la temperatura media de 1961. Según Andersen y Mamani (2009), los cambios previstos a largo plazo por el modelo PRECIS son aumentos en temperatura de 3,7-5,1°C (más en el norte del país y más en el altiplano) y aumentos en la variabilidad de temperaturas y en la variabilidad de precipitación en todos los municipios. Esta información coincide con los datos de PNUD (2013) que cita García et al. (2006), indicando tendencias de claros aumentos de la temperatura máxima y disminución de la temperatura mínima para el año 2050. (23)

Cambios en precipitación. Seth et al. (2010) en PNUD (2013) señala un descenso en la precipitación entre las latitudes 10°S y 20°S (Bolivia se encuentra en las latitudes 19°S, 20°S y 21°S) durante la primavera (septiembre-noviembre) y un aumento de la misma entre diciembre y abril. Esto está confirmado por los datos de PNCC (2000) en PNUD (2013), que muestran una reducción entre los meses de septiembre-octubre y un aumento en el mes de noviembre, lo que determina además un acortamiento en la fase de lluvias. Andersen y Mamani (2009) afirman que, a través del modelo PRECIS, se prevé una reducción de precipitación en áreas actualmente secas y un incremento en áreas que actualmente reciben abundantes cantidades de precipitación. Cambio en patrones actuales de distribución e intensidad de lluvias. Se indica un incremento en precipitación durante la época de lluvia de las tierras bajas y menos precipitación durante la época seca, mientras que el altiplano demuestra un patrón al contrario: menos precipitación durante la época lluviosa y más precipitación durante la temporada seca. (24)

Mayor frecuencia de eventos climáticos extremos como parte de los impactos del cambio climático: deslizamientos e inundaciones en el oriente del país (la región amazónica y brasileño-paranaense), fuertes precipitaciones sobre la Cordillera Oriental, tierras bajas del sur, llanos orientales y el Beni, acompañadas por deslizamientos, aludes torrenciales, desbordes de ríos e inundaciones; heladas, déficit de precipitaciones y granizadas en el altiplano (región andina) y frecuencia de tormentas tropicales y déficit en la precipitación

en gran parte de la región amazónica, lo que ocasiona un aumento en incendios forestales. Estos fenómenos provocan enormes pérdidas económicas para el país. (25)

6.2.2. Escenario propuesto para el proyecto

En base a los datos analizados en la sección anterior, en el presente trabajo se aplicarán cambios en la temperatura y en la precipitación, según lo indica la siguiente tabla:

TABLA 6.6. Cambios en la temperatura y precipitación propuestos en el Escenario 2

Período	Cambios en la temperatura (°C)	Cambios en la precipitación
Seco	(+1)	(-20 %)
Húmedo	(+2)	(+20 %)

Fuente: Elaboración Propia

También se simulará la redistribución del régimen de precipitación, tomando como período húmedo solo los meses de Diciembre a Marzo.

A continuación se observan los resultados de la aplicación del Escenario 2 en la cuenca en estudio.

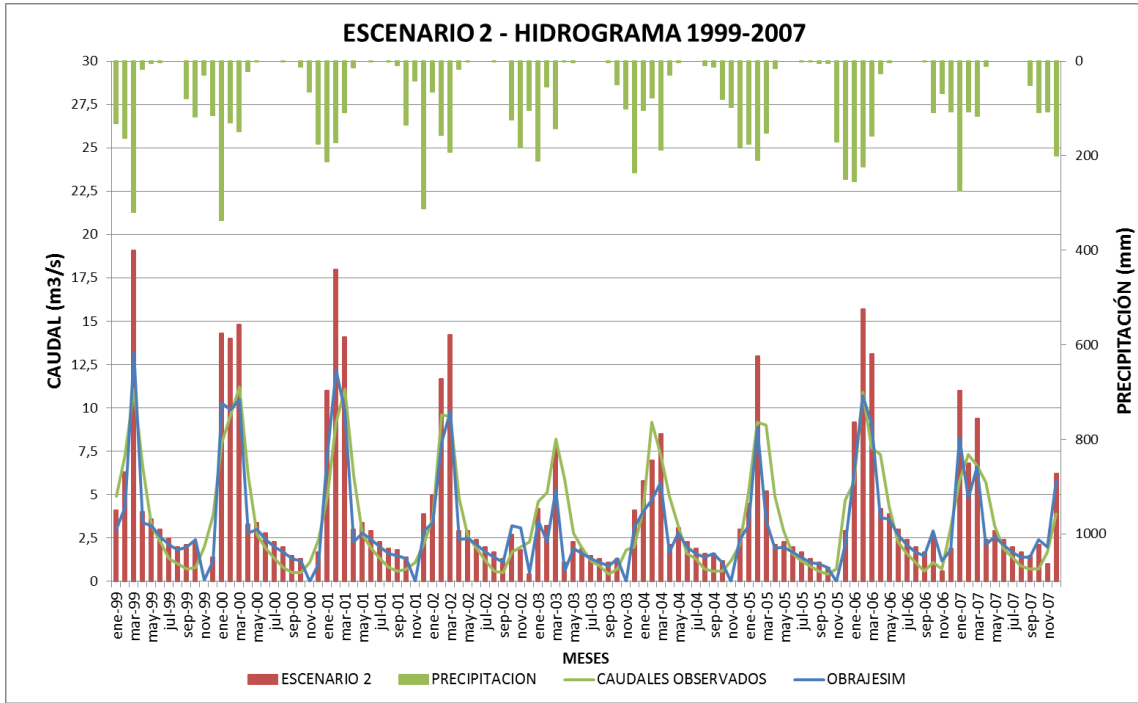


FIGURA 6.9. Variación de caudales Escenario 2

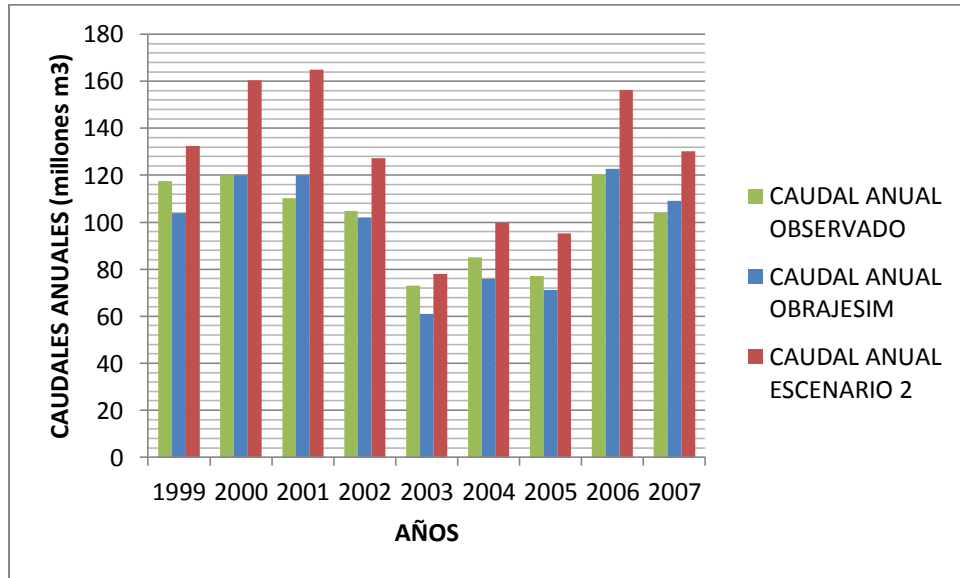


FIGURA 6.10. Comparación de caudales anuales Escenario 2

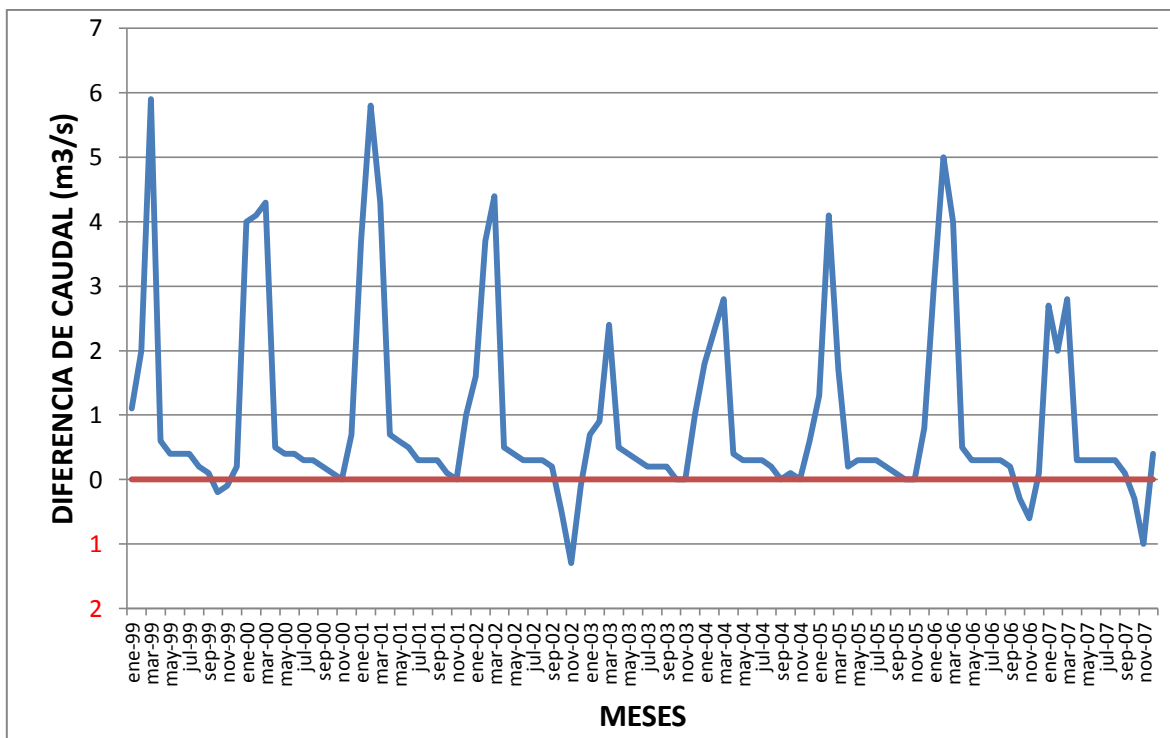


FIGURA 6.11. Diferencia entre caudales medios mensuales Escenario 2

Analizando los resultados obtenidos de la aplicación del Escenario 2 en la cuenca, se aprecian las siguientes observaciones:

- Un aumento de los caudales medios mensuales en los meses de Febrero y Marzo. Era de esperar dicho incremento debido a que, como consecuencia del cambio climático el Escenario 2, prevé que las lluvias se incrementarán pero concentradas en pocos meses.
- En la Figura 6.10 se aprecia un aumento en la disponibilidad de los caudales anuales, sin embargo dicho incremento es engañoso, ya que se debe al cambio de los patrones de distribución e intensidad de lluvias que se concentra en pocos meses.
- Se observa un aumento de los caudales medios mensuales de entre los 4 y los 6 m³/s en el mes de Marzo. Y una disminución de los caudales medios esperados para los meses de Octubre y Noviembre.
- Las observaciones anteriores hacen prever una mayor frecuencia de eventos climáticos extremos como parte de los impactos del cambio climático, especialmente de inundaciones en la cuenca en estudio.

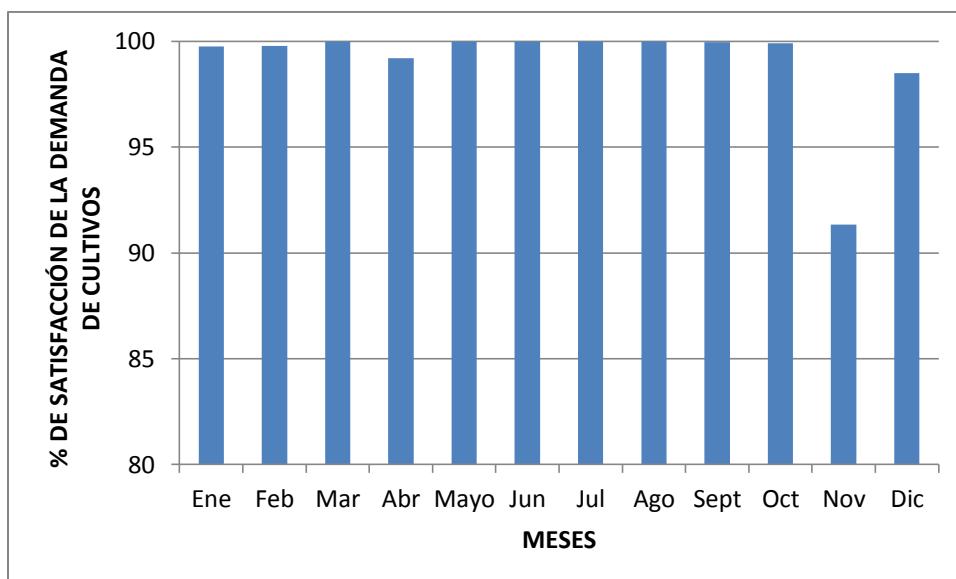


FIGURA 6.12. Porcentaje de satisfacción de la demanda de cultivos en la cuenca (Escenario 2)

TABLA 6.7. Cobertura de demanda poblacional - Escenario 2

COBERTURA DE DEMANDA POBLACIONAL (% DE SATISFACCIÓN)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	Mayo	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
CIUDAD TARIJA	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	84,9	100
PUEBLO CALAMA	98,7	97,9	100	93	100	100	100	100	100	99,3	53,8	82,4
PUEBLO CANASMORO	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90,7	100
PUEBLO CARACHI MAYU	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90,7	100
PUEBLO COIMATA	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	91,1	100
PUEBLO ERQUIS	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	87,4	100
PUEBLO LA VICTORIA	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	87,9	100
PUEBLO SAN LORENZO	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90,2	100
PUEBLO SELLA MENDEZ	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	85,2	100
PUEBLO TOMATITAS	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90,1	100
PUEBLO TOMATAS GRANDE	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90	100

En cuanto a la cobertura de demandas en la cuenca, se aprecia que para el Escenario 2 el porcentaje de satisfacción de las demandas, tanto de cultivos, como demandas poblacionales es mejor que el resultante para el Escenario 1.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Sin olvidarnos que la Hidrología es una rama del saber que se basa en estimaciones, donde no existen los absolutos, se pueden llegar a resultados distintos considerando una u otra configuración de los parámetros y series involucradas en el modelo hidrológico. Y tomando en cuenta que los valores de los parámetros deben tener sentido físico, existe un sinnúmero de componentes que se pueden modificar para calibrar un modelo.

Al momento de comenzar cualquier tarea de modelación hidrológica se requiere recopilar toda la información disponible para construir la relación que mejor represente lo que efectivamente está sucediendo en la cuenca definida. Sin embargo, existe una limitante, no se tiene una cobertura de estaciones meteorológicas apropiadas en territorio nacional.

En cuanto al modelo utilizado, WEAP es una herramienta que permite flexibilidad en la modelación hidrológica, teniendo la capacidad implementar modelos que guarden relación con lo que está sucediendo en la cuenca en estudio, obviando la incertidumbre que se genera en los resultados, se calibró y validó un modelo con índices de ajuste aceptables según valores encontrados en la literatura. Sin embargo, no existe un modelo hidrológico perfecto y como todo modelo, éste también tiene deficiencias.

Conclusiones del proyecto:

- El modelo WEAP fue implementado satisfactoriamente, alcanzando un coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe de 0,5 para la subcuenca de aportación Sella y 0,43 para la subcuenca aportante Canasmoro, valores considerados buenos para este tipo de prueba. Mientras que para los valores obtenidos en la estación de Obarjes se alcanzó un coeficiente de eficiencia de 0,68, considerado muy bueno para esta prueba.
- El modelo fue calibrado utilizando un set de parámetros uniforme en las subcuencas de Canasmoro y Sella. El set de parámetros obtenidos permitió obtener resultados aceptables en ambas subcuencas a pesar de que presentan una marcada diferencia en extensión espacial. Estos parámetros de uso de suelo serán aplicados a todas las subcuencas del modelo. Sin embargo, queda abierta la posibilidad de revisar los parámetros en cada subcuenca en función de los suelos si se obtiene información

específica respecto a suelos y geología, o en función de la geometría de la subcuenca si se observan patrones que sugieran que otras características como tamaño y forma inciden en los resultados.

- Los parámetros obtenidos en la prueba 9 de calibración de la subcuenca aportante Sella, son los considerados óptimos para la modelación de la cuenca en estudio.
- Para efectuar un estudio de la subcuenca aportante Canasmoro, se recomiendan utilizar los parámetros obtenidos en la prueba 3 de calibración para dicha subcuenca, que representan mejor los caudales pico en dicha subcuenca aportante.
- El modelo WEAP se ajusta adecuadamente a las características hidrogeológicas de la cuenca y nos permite obtener resultados aceptables para estudiar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca. A partir de esta modelación se podrán crear escenarios para el análisis de distintas suposiciones en la cuenca.
- El buen desempeño de un modelo hidrológico está condicionado a la calidad de los datos requeridos como datos de entrada, este es el principal problema en los modelos semidistribuidos y distribuidos.
- El cambio en la cobertura vegetal de la cuenca, propuesta en el Escenario 1, que supone que un crecimiento del 14% de las áreas de cultivo y consecuentemente de las demandas en la cuenca, refleja una disminución de alrededor del 20% de la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca en todos los años simulados. Además supone que no se satisfacen las demandas de cultivos para casi ningún mes del año.
- El Escenario 2, que supone cambios en la temperatura y en la precipitación en la cuenca, se simuló en el modelo WEAP, obteniendo un aumento de los caudales medios mensuales en los meses de Febrero y Marzo, y una disminución de los caudales para los meses de Octubre y Noviembre, esto se debe al cambio de la distribución e intensidad de lluvias que se concentran en pocos meses.
- Los resultados obtenidos en el Escenario 2, hacen prever una mayor frecuencia de eventos climáticos extremos en la cuenca, como parte de los impactos del cambio climático.

- Ante una posible Expansión de la frontera agrícola (Escenario 1), se observa como principal riesgo la disminución del recurso hídrico en la cuenca y consecuentemente la disminución de la satisfacción de las demandas en la cuenca.
- Ante las variaciones de temperatura, que a su vez tienen impactos sobre los regímenes de precipitación y su frecuencia (Escenario 2), como principales riesgos se observan:
 - Riesgos incrementados de deslaves, mazamorras y otros relacionados.
 - Aumento de los procesos de erosión y desertificación de suelos que afecta seriamente las condiciones de vida y las actividades agropecuarias de la población local y la biodiversidad.
 - El retraso en las lluvias, que implica también un retraso en la siembra de cultivos, presenta un mayor riesgo en la producción por efecto de las heladas y generalmente implica una menor duración de la época de lluvias, cuya consecuencia es menos agua disponible para los cultivos.
- A pesar de la alta incertidumbre en las proyecciones de los modelos podemos afirmar que los resultados del presente trabajo no contradicen estudios previos basados en datos históricos. Sin embargo producto de las modificaciones que sufre el clima día a día, se propone actualizar los datos del modelo de forma permanente, ya que no existe certeza absoluta de cómo evolucionará el cambio climático, lo que repercutirá de forma directa en la disponibilidad de los recursos hídricos.
- El modelo de la cuenca Alta del río Guadalquivir presentado en este documento constituye una herramienta para analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca dentro del contexto del cambio climático. Sin duda la principal ventaja de la utilización del modelo WEAP es la facilidad para desarrollar escenarios que exploran posibilidades en el manejo de los recursos hídricos, permitiendo la elección del nivel de complejidad según la habilidad del modelador o la accesibilidad a los datos requeridos. Una vez el modelo sea finalizado podrá ser utilizado también para otros objetivos como por ejemplo:
 - simulación de agua superficial y subterránea mediante el acoplamiento con otros modelos como MODFLOW y QUAL2K,

- operación de reservorios,
- generación hidroeléctrica,
- modelación de polución, el análisis de calidad de agua que ofrece WEAP es amplio y variado permitiéndonos modelar con buena precisión las condiciones de un río y los efluentes a ser tratados, así como nos permitirán apreciar un método efectivo de tratamiento de aguas.
- requerimientos del ecosistema,
- asignación del recurso hídrico según derechos y prioridad, etc.
- En dichos casos, el modelo puede ser revisado para reducir las incertidumbres por datos de entrada y para refinar la calibración a nivel de subcuenca.

Recomendaciones:

- Como solución a la escasez de agua manifiesta producto de la aplicación del Escenario 1 en el proyecto, se recomiendan las siguientes soluciones:
 - Esta situación demanda la ejecución de proyectos de obras hidráulicas como por ejemplo, la construcción de las presas programadas en el Valle Central del Departamento de Tarija, como son: la presa Marquiri, la presa Carachimayo, la presa Chamata, la presa Rincón de la Victoria, y otros. (VER ANEXOS).
 - Que el riego de las áreas agrícolas localizadas en la zona del proyecto sea realizado con un uso racional del agua, implementando sistemas de riego más eficientes.
- Como medidas de adaptación al cambio climático propuesto en el Escenario 2, se proponen las siguientes:
 - La correcta planificación territorial que puede evitar asentamientos humanos en los lugares más vulnerables.

- Control de deforestación y reforestación puede reducir la severidad de las inundaciones.
- La implementación de sistemas de riego, pueden reducir los impactos sobre la agricultura en áreas con precipitación, escasez y/o irregular.
- Se recomienda el uso de WEAP como una herramienta para proyectos de planificación por los gobiernos municipales y departamentales.
- Finalmente, es posible agregar que se requiere de forma inmediata mejorar la calidad de la información hidrometeorológica en la zona de estudio, ya que corrigiendo este déficit se pueden mejorar ostensiblemente las estimaciones hidrológicas en la cuenca.
- Se debe promover la obtención de información actualizada y detallada de los diferentes tipos y usos del suelo (características físicas y químicas) que existen en el país y que son necesarios en los modelos hidrológicos como es el caso del WEAP.