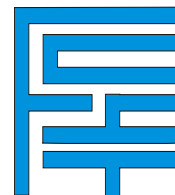


UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



DIMENSIONAMIENTO HIDROLÓGICO DE PRESAS EN CASCADA MEDIANTE EL USO DEL MODELO WEAP

Proyecto de Grado, Presentado Para Optar al Diploma Académico
de Licenciatura en Ingeniería Civil.

Presentado por: DAISON TORRICO FERNANDEZ

Tutor: M.Sc. LUIS EDGAR MONTENEGRO TERRAZAS

Tutor de Taller: PhD. M.Sc. MAURICIO FLORENCIO VILLAZÓN GÓMEZ

COCHABAMBA-BOLIVIA

Octubre, 2019

DEDICATORIA:

A Dios, a mis padres, Edwin y Wilma, por todo el apoyo, las enseñanzas y el amor recibido en todo momento, a mis hermanos, abuelos, tíos y amigos por brindarme todo su apoyo.

AGRADECIMIENTOS:

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mis padres Edwin y Wilma, por haberme apoyado en todo momento, en mis estudios, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien.

Al Ing. Edgar Montenegro por su apoyo incondicional brindado en todo momento en la elaboración de este trabajo.

Al PhD. MsC Mauricio Villazon por guiarme a lo largo de este trabajo aportando con su conocimiento.

Al Ing. Roberto Méndez por su amistad y recomendaciones por fortalecer este trabajo

Al laboratorio de Hidráulica de la Universidad Mayor de San Simón y todo su personal por haberme recibido con sus brazos abiertos.

A mis amigos que estuvieron conmigo en las buenas y en las malas durante todo nuestro periodo de estudio.

A todos los docentes que me formaron en la carrera, por sus consejos y enseñanzas.

Todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.

FICHA RESUMEN

En nuestro país, debido a las características del ciclo hidrológico se tiene una temporada húmeda con mayor disponibilidad de agua proveniente de las precipitaciones y una época seca, en la que prácticamente no se cuenta con lluvias, en el entendido de que la demanda para riego, consumo humano o generación de energía eléctrica es marcadamente independiente de la disponibilidad de lluvias, se plantea con mucho énfasis la construcción de embalses que regulan el escurrimiento, guardando el agua que se tiene disponible en época de lluvias para ser usada en época de estiaje.

En Bolivia se cuenta con una cantidad importante de pequeñas presas y cada vez es más frecuente el surgimiento de proyectos que plantean embalses adicionales en el mismo río, surgiendo la necesidad de contar con metodologías y herramientas para el dimensionamiento de embalses en cascada.

El presente trabajo presenta el dimensionamiento hidrológico de embalses en cascada, que permite determinar la altura hidrológica óptima en función de la oferta y la demanda, considerando la interacción de dos presas situados en el mismo río. La herramienta computacional utilizada es el Water Evaluation And Planning, ampliamente conocido como WEAP. El caso de estudio es desarrollado en la provincia Tiraque del departamento de Cochabamba, sobre el río Sallu Mayu, donde se encuentra construida la presa Khaspi Kancha y se plantea el proyecto para el diseño de la presa Muyo Qhochá, situada aguas arriba del embalse existente.

Como es habitual para este tipo de proyectos, no se cuenta con mediciones de lluvia y caudal simultáneos, que permitan calibrar un modelo hidrológico de transformación de lluvia en caudal, requerido para obtener la oferta de agua en las cuencas de interés. Por este motivo la alternativa usada es recurrir a una cuenca adyacente que cuente con este tipo de datos que permitan la calibración de los parámetros del modelo hidrológico y su posterior transferencia a las cuencas de interés.

La cuenca Málaga aforada adyacente, fue elegida para el propósito anteriormente mencionado, sin embargo, los parámetros de calibración del modelo hidrológico obtenidos, solo fueron usados como referencia o guía, en la obtención de caudales para las cuencas del proyecto. En la cuenca aforada, se probó la calibración de los modelos WEAP, CHAC y Crawford, verificando que el mejor desempeño fue de los dos primeros, con coeficientes de Nash de 0.95 y 0.98, para Crawford se obtiene un coeficiente de Nash de 0.78.

El modelo hidrológico adoptado para la transformación de lluvia en caudal en las cuencas de Muyo Qhochá y Khaspi Kancha es el WEAP, primero por su buen desempeño en la cuenca Málaga y segundo porque cuenta con un módulo para representar la operación de embalses, que facilita el dimensionamiento de las presas en cascada. Con el propósito de determinar la altura hidrológica de la presa de Muyo Qhochá, se realizó la simulación de la operación de los dos embalses en cascada, para distintos escenarios de demanda y alturas de presa, con lo que se determinó que la altura hidrológica óptima para la presa de Muyo Qhochá es de 17 m.

ÍNDICE

Contenido	Pág.
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 Justificación	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
2 Marco Teórico	3
2.1 Introducción	3
2.2 Clasificación de modelos hidrológicos	3
2.2.1 De acuerdo a la conceptualización de los procesos básicos	4
2.2.2 De acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos	5
2.2.3 De acuerdo a su representación espacial	5
2.3 Descripción del modelo Water Evaluation And Planning (WEAP)	6
2.3.1 Estimación de parámetros del modelo hidrológico	8
2.3.2 El Proceso de Aplicación de un Modelo WEAP	12
2.4 Modelo hidrológico Crawford	14
2.5 Dimensionamiento hidrológico de la altura de presas en cascada; Error! Marcador no definido.	
2.6 Modelo Hidrológico CHAC “Calculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas”	15
2.6.1 Parámetro C	17
2.6.2 Hmax	18
2.6.3 Imax	18
2.6.4 Coeficiente de descarga del acuífero α	18
2.7 Dimensionamiento hidrológico de la altura de embalses en cascada	18
2.7.1 Métodos determinísticos	19
2.7.2 Métodos probabilísticos	22
2.7.3 Métodos estocásticos	23
2.8 Programas computacionales para el dimensionamiento de embalses	24

2.8.1	ResSim.....	24
2.8.2	WEAP.....	25
3	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	26
3.1	Localización del proyecto.....	26
3.2	Características físicas de interés hidrológico.....	27
3.2.1	Curvas Hipsométricas.....	27
3.2.2	Curvas hipsométricas adimensionales de similitud entre las tres cuencas.....	28
3.3	Disponibilidad espacial y temporal de datos Hidrometeorológicos.....	29
3.3.1	Disponibilidad espacial de datos hidrometereológicos.....	29
3.3.2	Disponibilidad Temporal de las estaciones hidrometeorologicas.....	31
3.4	Análisis de calidad de datos hidrometereológicos.....	35
3.5	Mapas temáticos.....	37
3.5.1	Mapa de uso de suelo, cuencas Málaga, Muyo Qhocha y Khaspi Kancha.....	37
3.5.2	Mapa de tipo de suelo, cuencas Málaga, Muyo Qhocha y Khaspi Kancha.....	40
4	MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA LA DETERMINACIÓN DEL APOORTE DE AGUA A LAS PRESAS MUYU QHOCHA Y KHASPI KANCHA.....	43
4.1	Estrategia adoptada para simular la transformación de lluvia en caudal, en una cuenca sin datos de descarga.....	43
4.1.1	Uso de la cuenca Málaga con datos de lluvia y caudal.....	43
4.1.2	Calibración del modelo WEAP.....	45
1.1.1	Adopción de parámetros en las cuencas Muyo Qhocha y Khaspi Kancha.....	46
4.1.3	Uso de datos de tipo y uso de suelo para adoptar parámetros.....	48
4.2	Calibración del WEAP en la cuenca Málaga.....	49
4.2.1	Resultados de la Calibración.....	50
4.3	Adopción de parámetros y cálculo del caudal de aporte con WEAP.....	54
4.3.1	Obtención de caudales de aporte al embalse Muyo Qhocha.....	58
5	CALIBRACIÓN Y USO DEL MODELO CRAWFORD y CHAC PARA OBTENCIÓN DEL CAUDAL DE APOORTE DE LA CUENCA MÁLAGA.....	61
5.1	Introducción.....	61
5.2	Calibración del Modelo Hidrológico de CRAWFORD.....	61
5.2.1	Estimación Inicial de los Parámetros.....	61
5.2.2	Análisis de sensibilidad de los parámetros.....	62

5.2.3	Resultados de la Calibración	66
5.3	Calibración del modelo hidrológico CHAC	68
5.3.1	Análisis de sensibilidad de los Parámetros.....	68
5.3.2	Resultados de la calibración del Modelo CHAC.....	70
5.4	Evaluación de resultados y comparación con el WEAP	72
6	DIMENSIONAMIENTO HIDROLÓGICO DE LOS EMBALSE DE MUYO QHOCHA Y KHASPI KANCHA.....	74
6.1	Introducción	74
6.2	Demanda de agua para fines de riego	74
6.3	Resultados simulación de los embalses en cascada	75
6.4	Altura presa Vs porcentaje de atención demanda.....	76
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
7.1	CONCLUSIONES	78
7.2	RECOMENDACIONES.....	79
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
9	ANEXOS.....	81
	ANEXO A.....	81
	ANEXO B.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Relación entre las características espacio-temporales de modelos hidrológicos y su conceptualización de procesos básicos.....	4
Figura 2.2	Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos.	5
Figura 2.3	Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial. a) Modelo agregado. b) Modelo Semidistribuido. c) Modelo Distribuido	6
Figura 2.4	Esquema del modelo hidrológico WEAP para dos reservorios.	7
Figura 2.5	Esquema del modelo Hidrológico de Crawford.....	14
Figura 2.6:	Principio de continuidad en el modelo Temez.....	15
Figura 2.6	Esquema grafico del método de la Curva Masa.....	20

Figura 3.1 Similitud entre las cuencas Málaga, Muyo Qhochá y Khaspi Kancha	28
Figura 3.2 Análisis de calidad de los datos de la estación Málaga por el método de Doble Masa.....	35
Figura 3.3: Análisis de calidad de los datos de Precipitación de la estación Tiraque por el método de Doble Masa	36
Figura 3.3 Relación altura estación – Precipitación media anual.....	36
Figura 4.1 Datos de Precipitación mensual de la cuenca Málaga	44
Figura 4.2 Datos de Caudal mensual de la cuenca Málaga	44
Figura 4.3 Datos de Temperatura mensual de la cuenca Málaga	45
Figura 4.4 Resultado final de la calibración de WEAP en la cuenca Málaga de todos los años.....	50
Figura 4.5 Resultado final de la calibración de WEAP en la cuenca Málaga, Promedio multimensual.	51
Figura 5.1 Análisis de Sensibilidad del parámetro “CS” en la cuenca Málaga con el modelo Crawford.....	63
Figura 5.2 Análisis de Sensibilidad del parámetro “PSUB” en la cuenca Málaga con el modelo Crawford.....	63
Figura 5.3 Análisis de Sensibilidad del parámetro “GAS” en la cuenca Málaga con el modelo Crawford.....	64
Figura 5.4 Análisis de Sensibilidad del parámetro “HI” en la cuenca Málaga con el modelo de Crawford.....	65
Figura 5.5 Análisis de Sensibilidad del parámetro “AI” en la cuenca Málaga con el modelo de Crawford.....	65
Figura 5.6 Resultado final de la calibración del modelo Crawford en la cuenca Málaga de todos los años.....	67
Figura 5.7 Resultado final de la calibración del modelo Crawford en la cuenca Málaga, Promedio multimensual.....	67
Figura 5.8: Análisis de sensibilidad del coeficiente ETP del modelo CHAC.	68
Figura 5.9: Análisis de sensibilidad del parámetro “C” de Excedencia del modelo CHAC	69
Figura 5.10: Análisis de sensibilidad del parámetro de Humedad Máxima del modelo CHAC.....	69
Figura 5.11: Análisis de sensibilidad del parámetro Infiltración Máxima en el modelo CHAC.....	70
Figura 5.12: Resultado final de la calibración del modelo CHAC en la cuenca Málaga de todos los años.	71

Figura 5.13: Resultado final de la calibración del modelo Crawford en la cuenca Málaga, Promedio multimensual.....	71
Figura 5.14 Comparación de los caudales promedio multimensual del modelo WEAP, Crawford y el caudal medido de la cuenca.....	72
Figura 6.1: Grafica de Porcentaje de atención a la demanda vs Altura del embalse.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.5 Localización de las estaciones meteorológicas	29
Tabla 3.6 Precipitación mensual para las cuencas Muyo Qhochá y Khaspi kancha.....	37
Tabla 3.7: Área de Coberturas de las cuencas Málaga, Muyo Quocha y Khaspi Kancha	39
Tabla 3.8: Área de Texturas de las cuencas Málaga, Muyo Qhochá y Khaspi Kancha.....	42
Tabla 4.1: Tabla comparativo de valores iniciales adoptados y los valores finales de los parámetros calibrados.....	51
Tabla 4.2 Parámetros adoptados en la calibración de la cuenca Málaga.....	52
Tabla 4.3: Tabla comparativo de valores iniciales adoptados de la cuenca Málaga y los valores finales adoptados para las cuencas Muyo Qhochá y Khaspi Kancha.....	55
Tabla 4.4 Parámetros adoptados en la cuenca Muyo Qhochá.	56
Tabla 4.5 Parámetros adoptados en la cuenca Khaspi Kancha.....	57
Tabla 4.6 Caudales de aporte (l/s) de la cuenca Muyo Qhochá al embalse.	58
Tabla 6.1 Distribucion mensual de la demanda de riego del proyecto Muyo Qhochá yKhaspi Kancha	74
Tabla 6.2: Resultados de las Áreas de demanda simuladas para distintas alturas del embalse Muyo Quocha y para distintas probabilidades de falla.....	75
Tabla 6.3: Porcentaje de atención a la demanda vs Altura del embalse para distintas probabilidades de falla en el Embalse de Muyo Quocha.....	77
Tabla 6.4: Verificación de las probabilidades de falla del embalse de Khaspi Kancha	77

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 3.1 Ubicación de las cuencas Málaga, Muyo Qhocha y Khaspi Kancha	26
Mapa 3.3 Ubicación de las estaciones Hidrometereológicas más próximas a la cuenca del proyecto	30
Mapa 3.3 Mapa de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	39
Mapa 3.4 Mapa de tipo de Suelo en las cuencas de estudio	41
Mapa 4.1 Coeficiente de escurrimiento para la zona de estudio	47

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Debido a las características del clima en Bolivia, con una gran parte de la lluvia anual precipitando prácticamente en solo cuatro meses del año, se hace indispensable recurrir a proyectos de almacenamiento de agua mediante represas, que regulan el caudal efluente en los ríos y permiten contar con agua inclusive en los meses de estiaje.

Si bien en el país ya se cuenta con más de 290 presas construidas, la necesidad de este tipo de obras con fines de riego es mucho mayor.

Para el caso de estudio que es tratado en el presente trabajo, se tiene una represa construida hace más de 20 años sin embargo durante este tiempo se observó que la misma tenía vertidos frecuentes que no eran aprovechados por lo que surgió la necesidad de plantear un proyecto que busque incrementar la capacidad de embalsar agua, generando un aprovechamiento en cascada ya que ambas presas se encontrarían en el mismo río.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La demanda de agua para distintas actividades a llevado a la necesidad de construcción de represas para aprovechar mejor el líquido elemento, ya sea para la agricultura o para el consumo.

En muchos casos es necesario la construcción de presas en cascada debido a que el recurso hídrico es limitado y la demanda va en aumento.

En el presente proyecto se debe tomar en cuenta que aguas abajo ya se encuentra construido otra presa Khaspi Kancha que atiende una demanda de 500 ha y se observa en el sitio que por el vertedero salen agua de sobra, sobre todo en los meses de crecidas y además se lo verificó con una corrida.

La finalidad de la construcción de la presa es aprovechar el agua de sobra existente en la presa aguas abajo para atender otra demanda aguas arriba, sin interferir en la demanda de la presa Khaspi Kancha ya que implicaría problemas con los beneficiarios del embalse.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es realizar el dimensionamiento hidrológico de embalses en cascada.

1.3.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son:

- Vincular características físicas de la cuenca con parámetros de los modelos hidrológicos WEAP, CHAC y Crawford, a fin de usarlos en cuencas sin mediciones de caudal.
- Determinar el aporte de agua a los embalses
- Simular la operación de dos embalses en cascada para determinar su altura hidrológica

2 MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

La hidrología es el estudio del movimiento, distribución y calidad del agua en todas las zonas de la Tierra, y se dedica tanto al ciclo hidrológico como a los recursos de agua.

Un modelo hidrológico es un grupo de representaciones matemáticas que describen fases importantes del ciclo hidrológico, con el objetivo de simular la conversión de la precipitación en escurrimiento. En principio, las técnicas de modelación de cuencas son aplicables a cuencas de cualquier tamaño, ya sean pequeñas (pocas hectáreas), de tamaño medio (cientos de kilómetros cuadrados) o grandes (miles de kilómetros cuadrados).

En un modelo hidrológico, el sistema físico real que generalmente se presenta es la 'cuenca hidrográfica' y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera un modelo matemático ayudará a tomar decisiones en materia de hidrología, por lo que es necesario tener conocimiento de entradas (inputs) al sistema y salidas (outputs).

La salida de los modelos hidrológicos varía, dependiendo de las metas y objetivos del modelo. Algunos modelos se utilizan para predecir los totales mensuales de escurrimiento, mientras que otros están diseñados para ver a las tormentas individuales. El resultado más común es el hidrograma o hidrograma de escurrimiento.

Ciertas aplicaciones de la ingeniería hidrológica pueden requerir análisis complejos que involucran variaciones temporales y/o espaciales de precipitación, abstracciones hidrológicas y escurrimiento. Típicamente, estos análisis encierran un gran número de cálculos y por ello pueden realizarse con una computadora digital. El uso de computadoras en todos los aspectos de la ingeniería hidrológica ha llevado a incrementar el énfasis en la modelación de cuencas. La modelación de cuencas comprende la integración de los procesos hidrológicos en un ente modelo, por ejemplo, un modelo de cuenca, con propósitos ya sea de análisis, diseño, escurrimiento a largo plazo, predicción de volumen, predicción o pronóstico de flujo en tiempo real.

2.2 CLASIFICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS

La literatura está repleta de modelos y de diferentes formas de clasificarlos, sin embargo, podemos enfocarnos en el análisis de tres características básicas útiles para la modelización hidrológica de cuencas:

- De acuerdo a la conceptualización de los procesos básicos; pueden ser empíricos, conceptuales o basados en procesos.
- De acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos; pueden ser determinísticos o estocásticos.

- De acuerdo a su representación espacial; pueden ser agrupados o distribuidos.

2.2.1 De acuerdo a la conceptualización de los procesos básicos

Si el modelo funciona como una relación calibrada entre entradas y salidas, recibe el nombre de modelo "de caja negra", empírico o de regresión. Estos modelos se basan en relaciones entrada-salida, sin ningún intento de describir el comportamiento causado por procesos individuales. Dentro de éstos podemos mencionar al método Kostiakov y Green Ampt (para estimación de infiltración), método racional y método de la curva número (generación de caudales), y, especialmente, los modelos estocásticos de series de tiempo.

En el extremo opuesto se encuentran los modelos "de caja blanca" (también llamados "de base física" o "teóricos"), en los cuales se conocen todos los procesos involucrados en la transformación. Estos modelos se apoyan en ecuaciones físicas que representan todos los procesos involucrados en el fenómeno a simular y haciendo innecesario el proceso de calibración; sin embargo, la falta de suficiente información relativa a los procesos que se desarrollan en el suelo, en el subsuelo y en la vegetación (entre otros), genera incertidumbre y la calibración se hace necesaria. Algunos ejemplos son TOPMODEL, TOPKAPI, SHE, etc.

Asimismo, suele hablarse de modelos "conceptuales" o "de caja gris" cuando se trabaja con modelos en los cuales se conocen algunos de los procesos internos del modelo. En general, los modelos conceptuales consideran leyes físicas en forma simplificada. Entre estos podemos mencionar al modelo abc y el modelo HBV.

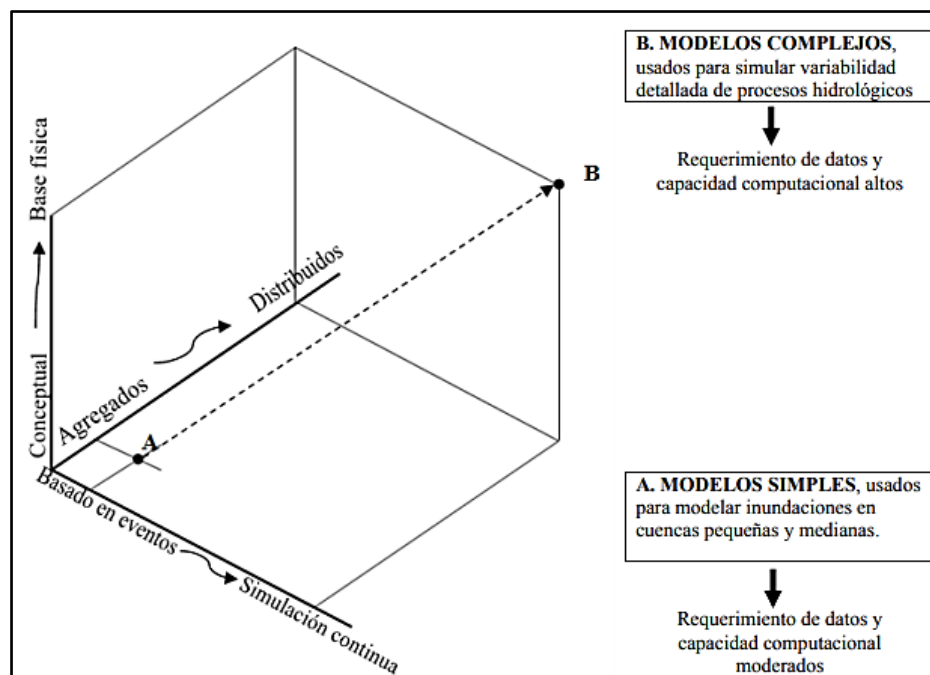


Figura 2.1: Relación entre las características espacio-temporales de modelos hidrológicos y su conceptualización de procesos básicos (Molnar, 2011).

2.2.2 De acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos

Un modelo formal puede escribirse como una expresión simbólica en términos lógicos de una situación idealizada, compartiendo las propiedades estructurales del sistema original. Éstos expresan el comportamiento del sistema por un conjunto de ecuaciones, como

$$y_t = f^*(x_t, x_{t-1}, x_{t-2}, \dots; y_{t-1}, y_{t-2}, \dots; a_1, a_2, \dots) + \varepsilon_t$$

donde x_t es la variable de entrada, $f^*(\cdot)$ es una función de forma específica y a_i , $i = 1, 2, \dots$, son parámetros medidos o estimados, y ε_t es una expresión de la falta de ajuste entre la salida observada y_t y la salida ajustada $f^*(\cdot)$.

Si alguna de las variables x_t , y_t , ε_t es considerada como variable aleatoria (con una distribución de probabilidad), entonces el modelo es llamado “estocástico”: este término enfatiza la dependencia temporal de las variables hidrológicas relacionadas por el modelo. Si todas las variables se consideran libres de la variación aleatoria tal que ninguna tiene una distribución probabilística, entonces el modelo es considerado como determinístico.

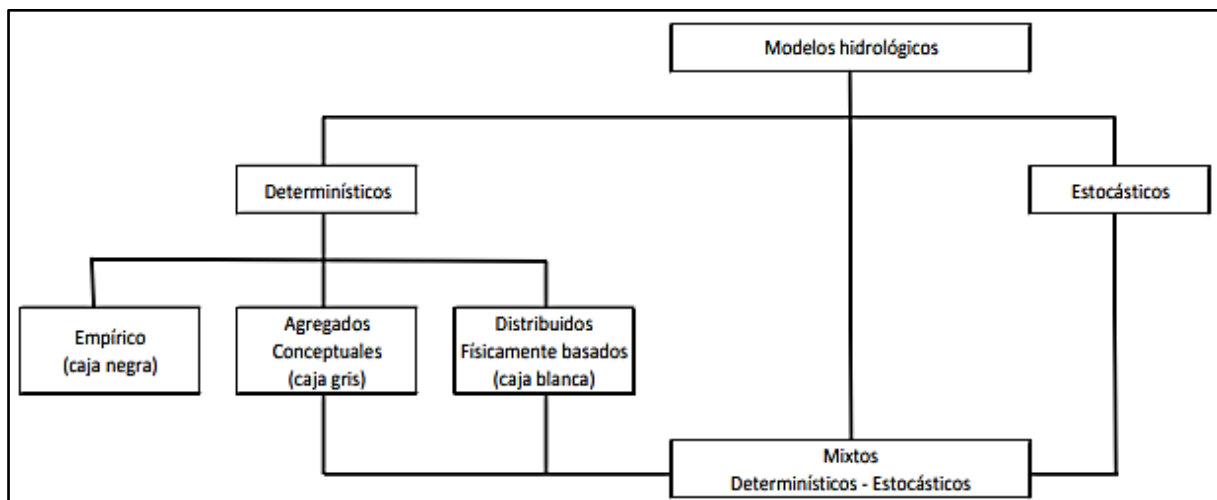


Figura 2.2: Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos. (Refsgaard y Abbott, 1996).

2.2.3 De acuerdo a su representación espacial

Una de las principales limitaciones en la modelación de cuencas es el desconocimiento de las propiedades del suelo y de los procesos involucrados en los flujos sub superficial y subterráneo. Esta limitación es superada si se asume que la cuenca es homogénea, tanto en sus procesos superficiales, sub superficiales y subterráneos, afirmación que es válida para cuencas

muy pequeñas. Siendo la cuenca homogénea, se puede representar como un único elemento de características constantes, dando lugar a los llamados “modelos agregados” o “agrupados”.

A medida que el tamaño de la cuenca se incrementa, es más probable que los tipos de suelo y sus características varíen a lo largo y ancho de la cuenca y el uso de éste tipo de modelo va perdiendo representatividad. Es así que, a mayores áreas, se puede discriminar zonas de similar comportamiento hidrológico (HRU) y analizar cada una de ellas de forma independiente para luego combinar y/o superponer sus efectos. Éstos son los llamados modelos “semi distribuidos”.

A pesar que los modelos semi distribuidos representan mejor las posibles variaciones de las características del suelo, efectos de pendiente, entre otros, aun así, representa una simplificación. Con el fin de alcanzar la mayor representatividad, la cuenca se divide en elementos mucho más pequeños, de geometría usualmente uniforme, llamados “grillas”. Estos modelos son llamados “modelos distribuidos” y realizan un balance hídrico en cada grilla, transmitiendo su efecto a las grillas adyacentes.

La siguiente figura muestra un esquema de la representación espacial de cuenca bajo estos tres tipos de modelo.

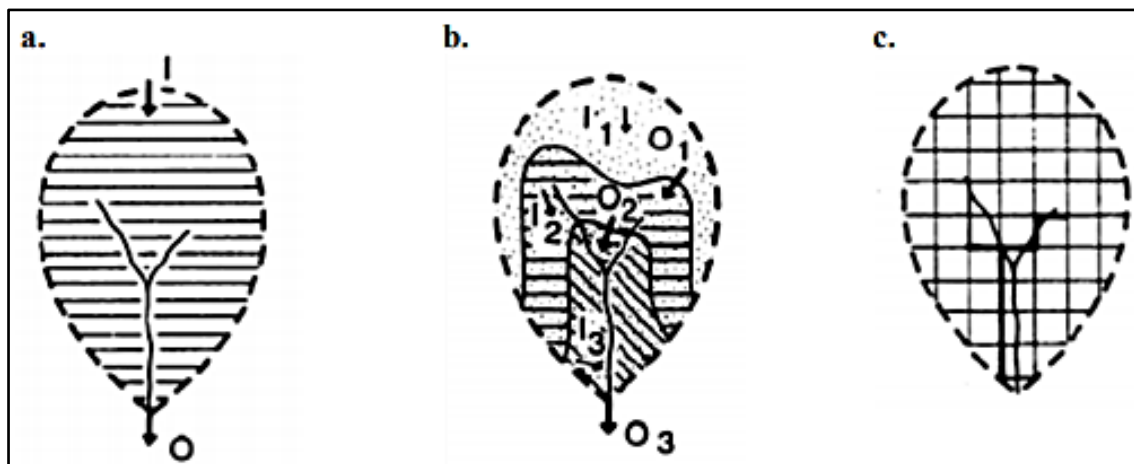


Figura 2.3: Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial. a) Modelo agregado. b) Modelo semi distribuido. c) Modelo Distribuido (Chong-yu Xu, 2002).

2.3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO WATER EVALUATION AND PLANNING (WEAP)

El modelo hidrológico Water Evaluation And Planning (WEAP) es espacialmente continuo con un área de estudio configurado como un set de subcuencas contiguas que cubren toda la extensión de la cuenca de análisis. Un set homogéneo de datos climáticos (precipitación,

temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) es utilizado en cada una de estas subcuencas, que se encuentran divididas en diferentes tipos de cobertura/uso de suelo.

El modelo comprende dos reservorios verticales, a través de los cuales el flujo total es el resultante de la suma de las estimaciones de flujo superficial, pérdidas por evaporación, infiltración, percolación y flujo base. El esquema del modelo permite que la percolación profunda pueda ser transmitida hacia un cuerpo de agua superficial o directamente hacia el acuífero subterráneo, de acuerdo a las características del sistema observado. La influencia de embalses, la red de distribución de riego y otras condiciones de operación, se asignan a los puntos de extracción de agua y se incorporan a los cálculos a través de criterios que maximizan la satisfacción de la demanda (CCGUC-SEI, 2009). La representación de los procesos hidrológicos tiene un nivel de agrupamiento que hace válida la aplicación dentro de una escala temporal semanal y mensual (CCGUC-SEI, 2009).

La respuesta física del modelo tiene dos premisas. La primera sugiere que, en cuencas con topografía accidentada, los reservorios subterráneos están alimentados por los aportes de la precipitación en las subcuencas situadas aguas arriba. La segunda premisa sugiere que los aportes de la precipitación en las subcuencas aguas abajo, en las zonas con relieve suave, contribuyen a la recarga de los reservorios aluviales, aprovechables para fines de irrigación y directamente relacionados con el flujo de los ríos principales. Esquemáticamente, este tipo de respuesta sugiere una configuración con dos reservorios verticales aguas arriba de la cuenca y un solo reservorio vertical en la zona con reservorios aluviales (Yates, Sieber, Purkey, & Huber-Lee, 2005; SEI, 2015).

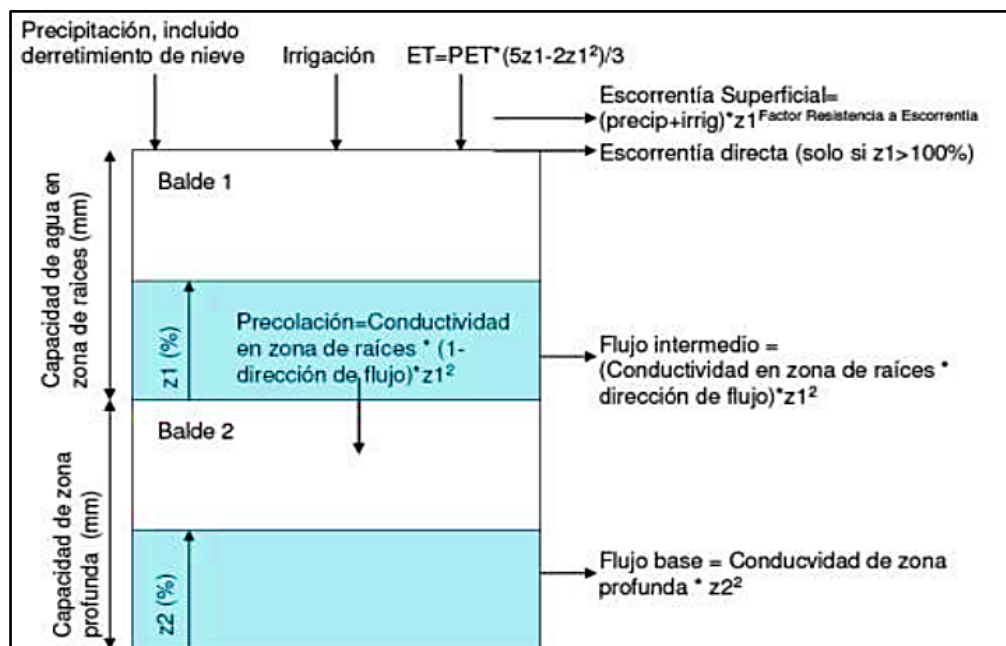


Figura 2.4: Esquema del modelo hidrológico WEAP para dos reservorios. (Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales, MMayA, VRHR, 2016)

2.3.1 Estimación de parámetros del modelo hidrológico

Para implementar el modelo se debe tomar en cuenta características híbridas, con consideraciones basadas en la estimación física de los parámetros y consideraciones desarrolladas a partir de los resultados de un proceso de calibración (SEI, 2015b; Fernandez, 2013; Marisa, Lima, Purkey, Yates, & Fomi, 2013).

Dos enfoques se recomiendan para su estimación. El primero asume que existe una relación entre la elevación (geografía) y el clima; a partir de aquello se definen rangos de elevación, dentro de los cuales se agregará los parámetros del suelo, escorrentía, infiltración (percolación) y factores meteorológicos (e.g., (Soria, 2016)). Un segundo enfoque sugiere dividir las subcuencas en función a unidades de cobertura y uso de suelo (e.g., (Yates, Purkey, Sieber, Huber-Lee, & Galbraith, 2005; Gonzáles, 2016)).

2.3.1.1 Coeficiente de cultivo Kc

Se consideran coeficientes distintos para las coberturas y para los cultivos. Para las primeras, los valores se obtienen de la literatura (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006), sin realizar trabajo de campo para su determinación (ver alcances del estudio). Los Kc de los cultivos tienen variabilidad mensual; se estimaron a través de técnicas de teledetección, siguiendo la metodología explicada en subtítulos precedentes.

Unidad de cobertura y uso de suelo	Kc	
	(Gonzales, 2016) en base a (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006)	(Espejo A. 2016)
<i>Bosque denso (amazónico, andino, chiquitano)</i>	1.05	
<i>Bosque denso esclerófilo, bosque denso nublado</i>		0.80
<i>Bosque o monte ralo</i>	0.90	
<i>Bosque ralo esclerófilo</i>		0.80
<i>Matorral, pajonal andino monta montano semiárido</i>	0.90	
<i>Matorral chiquitano sobre ondulaciones y llanuras, semiárido</i>	0.90	
<i>Herbazal graminoide, llanura inundada estacionalmente o por periodos cortos</i>	1.00	
<i>Herbazal graminoide, puna alto andino árida</i>	1.00	
<i>Herbácea graminoide</i>		0.75
<i>Vegetación dispersa en pedregales. Puna alto andina semiárida</i>	0.70	
<i>Arbustos dispersos</i>		0.75
<i>Estructura urbana y rural, ciudades y pueblos</i>	0.70	0.50
<i>Depósitos de arena playas y dunas</i>	0.70	
<i>Superficie descubierta cárcavas, arena</i>		0.60
<i>Cuerpos y curso de agua</i>	1.05	0.40

<i>Agricultura múltiple. Agricultura comercial</i>	0.70	
<i>Cultivos plurianuales</i>		0.80
<i>Cultivos en rotación extensiva</i>		0.70
<i>Cultivos en rotación intensiva</i>		0.85

Tabla 2.1: Valores de K_c por unidad de cobertura y uso de suelo (Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales, MMAyA, VRHR, 2016)

2.3.1.2 Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces S_w (mm)

Se estima directamente a partir de la profundidad máxima en la zona de raíces (Yates, Purkey, Sieber, Huber- Lee, & Galbraith, 2005). Alternativamente, valores menos optimistas se obtienen al asociar el parámetro con el almacenamiento potencial de agua en el suelo o agua disponible en la zona radicular del suelo [mm] (Soria, 2016). En el último caso, S_w se calcula como el producto entre la profundidad radicular [m] y la capacidad de retención de humedad del suelo CRH ; estos factores se estiman a partir de valores referenciales de la literatura o mediciones en campo.

Tabla 2.2: Valores referenciales de CRH en mm/m A partir de (Soria, 2016), en base a información de (MDSP, 2001)

Textura del suelo	CRH (Contenido de piedra y grava entre 5-15%)
<i>Arcilla</i>	120
<i>Franco</i>	140
<i>Limo</i>	120
<i>Arena</i>	70
<i>Arena francosa</i>	90
<i>Arcilla arenosa</i>	90
<i>Franco arcillo arenoso</i>	130
<i>Franco arenoso</i>	120
<i>Arcilla limosa</i>	130
<i>Franco arcillo limoso</i>	140
<i>Franco limoso</i>	150
<i>Franco arcilloso</i>	120

Fuente: Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales

Tabla 2.3: Valores referenciales de profundidad radicular a partir de (Soria, 2016), en función de información de (MDSP, 2001)

Tipo de utilización de la tierra	Profundidad máxima de raíces en cm
<i>Agricultura anual</i>	100
<i>Agricultura perenne</i>	150
<i>Pastos sembrados</i>	100
<i>Pasturas Naturales</i>	100
<i>Bosques</i>	150

Fuente: Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales

2.3.1.3 Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda Dw (mm)

Se estima como un valor único para toda la cuenca, asumiendo un solo reservorio horizontal subterráneo. El valor se ignora cuando el sitio de la demanda recarga el acuífero local (SEI, 2015). Se infiere por calibración del modelo, debido a que su estimación es compleja a través de información física (Yates, Purkey, Sieber, Huber-Lee, & Galbraith, 2005).

2.3.1.4 Factor de resistencia a la escorrentía RRF

Controla la respuesta de la escorrentía superficial. Valores altos implican tasas bajas de escorrentía y viceversa. Valores estimados en base a calibración del modelo varían en el rango de 0.1 a 10 (Ingol-Blanco, 2009; Yalcinkaya, 2011; SEI, 2015b; SEI, 2015). El *RRF* se lo relaciona teóricamente con el *LAI* (Yates, Sieber, Purkey, & Huber-Lee, 2005), a su vez estimado a partir de técnicas de teledetección o a partir de referencias en la literatura (Scurlock, Asner, & Gower, 2001; Amato, McKinney, Ingol-Blanco, & Teasley, 2006).

Cobertura	LAI		
	Promedio	Mínimo	Máximo
<i>Desiertos (sin cobertura vegetal)</i>	1.31	0.59	2.84
<i>Pasturas (zonas templadas y tropicales)</i>	1.71	0.29	5.00
<i>Pastizales altos, arbustos</i>	2.08		
<i>Otra vegetación</i>	2.08		
<i>Pastizales para actividades ganaderas</i>	2.50		
<i>Pastizales</i>	2.50		
<i>Cultivos (zonas templadas y tropicales)</i>	3.62	0.20	8.70
<i>Cultivos (agricultura intensiva; extensiva)</i>	4.22		
<i>Humedales</i>	6.34	2.50	8.40
<i>Áreas urbanas</i>	8.00		
<i>Plantación Forestal</i>	8.72	1.55	18.00

Tabla 2.4: Índice de área foliar (LAI) para distintos tipos de cobertura. Valores descritos en (Soria, 2016), en base a (Scurlock, Asner, & Gower, 2001; Amato, McKinney, Ingol-Blanco, & Teasley, 2006)

2.3.1.5 Conductividad en la zona de raíces RZC

Es el máximo flujo posible cuando el reservorio "1" está a capacidad de campo. Al referirse en teoría a un parámetro físico, estos valores se estiman a través de referencias generales de la literatura (*e.g.*, (DHI, 2009)), reduciendo de esta manera los parámetros a calibrar, en cuyo caso las unidades del parámetro deberían ser [$\text{mm día}^{-1} \text{mes}^{-1}$] (*e.g.*, (Soria, 2016)).

Textura del suelo	Ks (mm/día)		
	Promedio	Máximo	Mínimo
<i>Arena</i>	727.2	1520.64	403.2
<i>Arena Francosa</i>	1025.28	1897.92	25.92
<i>Franco arenosa</i>	239.04	430.56	16.56
<i>Franco</i>	70.56	60.48	5.04
<i>Franco Limoso</i>	27.36	61.92	6.48
<i>Franco arcillo arenoso</i>	64.8	118.08	23.472
<i>Franco arcilloso</i>	38.88	92.16	1.008
<i>Franco arcillo limoso</i>	18.72	28.8	1.44
<i>Arcilla arenosa</i>	30.24	61.92	7.2
<i>Arcilla limosa</i>	21.6	56.16	1.296
<i>Arcilla</i>	14.4	28.8	3.456

Tabla 2.5: Estimaciones de ks para diferentes clases texturales. A partir de (Soria, 2016), en base a información de (DHI, 2009)

2.3.1.6 Conductividad en la zona profunda ks₂

Representa el flujo máximo posible cuando $h_2=1$. Es un valor único para toda la cuenca y no se considera cuando el nodo de demanda recarga el acuífero local. Controla el flujo subterráneo a través de una relación directamente proporcional. Una posibilidad para estimar valores iniciales es a través de la geología local. La tabla siguiente muestra algunos ejemplos (*e.g.*, (Soria, 2016)).

Litología	Ks (cm/min)		
	Promedio	Máximo	mínimo
Pizarra	2.5E-06	5.0E-09	5.0E-06
Roca cristalina densa	5.0E-06	5.0E-08	1.0E-05
Esquisto	5.0E-05	5.0E-08	1.0E-04
Basalto denso	5.0E-04	1.0E-06	1.0E-03
Arcilla	2.5E-03	5.0E-07	5.0E-03
Arena	7.5E-02	1.0E-01	5.0E-02
Till	2.5E-01	1.0E-07	5.0E-01
Piedra caliza	5.0E-01	5.0E-06	1.0E+00
Basalto fracturado	5.0E-01	1.0E-0.4	1.0E+00
Franco	5.1E-01	1.0E-0.2	1.0E+00

Roca volcánica	1.0E+00	2.0E-0.2	2.0E+00
Roca cristalina fracturada	5.0E+00	1.0E-0.3	1.0E+01
Piedra arenisca	1.0E+01	5.0E-0.5	2.0E+01
Yeso	5.0E+01		5.0E+01
Arena y grava	5.3E+01	5.0E+0.0	1.0E+02
Grava	2.5E+04	5.0E-0.1	5.0E+04

Tabla 2.6: Estimaciones de ks para diversos tipos de unidades litológicas. A partir de (Soria, 2016), en función a información de (Lewis, Cheney, & ÓDochartaigh, 2006)

2.3.1.7 Dirección preferencial de flujo f

Depende de la cobertura del suelo. Varía desde 1 para flujo 100% horizontal, a 0 para flujo 100% vertical. Los valores se estiman al inicio de las simulaciones. Los valores finales se definen por calibración.

Para rangos de elevación menores a 3000 msnm, con excepción de sitios con cobertura de uso agrícola, donde se asume pendientes topográficas menores que coadyuvan a la mayor escorrentía en sentido vertical, se aconseja adoptar valores de 0.15.

Para rangos de elevación mayores a 3000 msnm, asumiendo que las mayores pendientes topográficas coadyuvan a la mayor escorrentía superficial (menor aporte a los reservorios subsuperficiales, se aconseja adoptar valores de 0.3.

2.3.2 El Proceso de Aplicación de un Modelo WEAP

La estructura del modelo describe a través de representaciones empíricas los procesos de evapotranspiración, escorrentía superficial y subsuperficial, infiltración y percolación profunda, en una conceptualización basada en las ideas del modelo Water Balance (Yates S., 1994). El balance hídrico es calculado en cada porción j de las N áreas fraccionales parte de cada subcuenca. Las variables climáticas se asumen homogéneas en cada j definiendo la ecuación de balance de masa (Yates, Sieber, Purkey, & Huber-Lee, 2005):

$$Sw_j \frac{dh_{1,j}}{dt} = P_e(t) - ET(t) - Q_s(t) - Q_{ss}(t) - Q_p(t)$$

donde Sw_j [L] representa un estimado de la capacidad efectiva de almacenamiento de agua en el suelo para cada fracción de uso o cobertura j . El almacenamiento relativo de agua en el suelo $h_{1,j}$, representa una fracción del total de almacenamiento efectivo y varía entre 0 (punto de marchitez permanente) y 1 (capacidad de campo). P_e es la precipitación efectiva en el paso de tiempo t ; ET representa la evapotranspiración; Q_s es la escorrentía superficial; Q_{ss} es la escorrentía subsuperficial; Q_p es la percolación profunda.

La ecuación siguiente presenta la expresión desarrollada (Yates, Sieber, Purkey, & Huber-Lee, 2005), donde RRF [adimensional] es el factor de resistencia al escurrimiento, con los

valores más bajos relacionados a las tasas más altas de escorrentía superficial (suelos sin cobertura vegetal); en la formulación original, este factor era el índice de área foliar LAI . ks_j [L T⁻¹] es un estimado de la conductividad saturada en el reservorio superficial. f_j [adimensional] es un parámetro de calibración relacionado al tipo de suelo, cobertura y topografía, que define la proporción que escurre horizontalmente (f_j) o verticalmente ($1 - f_j$).

$$Sw_j \frac{dh_{1,j}}{dt} = Pe(t) - ETo(t)K_{c,j}(t) \left(\frac{5h_{1,j} - 2h_{1,j}^2}{3} \right) - Pe(t)h_{1,j}^{RRFj} - f_j ks_j h_{1,j}^2 - (1 - f_j) ks_j h_{1,j}^2$$

Para cuantificar la suma de los aportes de Q_s y Q_{ss} desde el reservorio "1" en cada subcuenca de área A_j , la expresión para la variable resultante Q_1 es:

$$Q_1(t) = \sum_{j=1}^N A_j [Pe(t)h_{1,j}^{RRFj} + f_j ks_j h_{1,j}^2]$$

En aplicaciones donde se asume que no existe recarga hacia el nodo del acuífero), con ks_2 [L T⁻¹] representando la conductividad en el reservorio "2" (valor constante para toda la cuenca, por lo que no incluye el subíndice j), el caudal del reservorio subterráneo es (SEI, 2015):

$$Dw \frac{dh_2}{dt} = \sum_{j=1}^N (1 - f_j) ks_j h_{1,j}^2 - ks_2 h_2^2$$

donde Dw [L] es la percolación profunda desde el reservorio superficial.

La aproximación a la descripción del flujo base Q_G se expresa:

$$Q_G(t) = \sum_{j=1}^N A_j (ks_2 h_2^2)$$

Para el caso de la cuenca situada aguas abajo, con recarga hacia el reservorio aluvial (nodo del acuífero), se omite el flujo desde el reservorio subterráneo ($ks_2 h_2^2$) y la recarga expresada por la percolación $Perc$ [L³ T⁻¹] es (Yates, Sieber, Purkey, & Huber-Lee, 2005):

$$Perc = \sum_{j=1}^N A_j (1 - f_j) ks_j z_{1j}^2$$

2.4 MODELO HIDROLÓGICO CRAWFORD

Norman H. Crawford presentó en 1984 un modelo matemático conceptual paramétrico muy simple, el cual permite estimar el volumen escurrido mensual en cuencas pequeñas, a partir de la precipitación y la evapotranspiración potencial mensuales. El modelo consiste en un balance hídrico en la cuenca, teniendo dos almacenamientos, uno limitado para la humedad del suelo y otro para el agua subterránea. El modelo tiene tres parámetros de ajuste: la capacidad de almacenamiento del suelo (CS) en milímetros, la proporción que del exceso de humedad recarga al agua subterránea (PSUB) y el porcentaje que del volumen de agua subterránea origina gasto base (GAS).

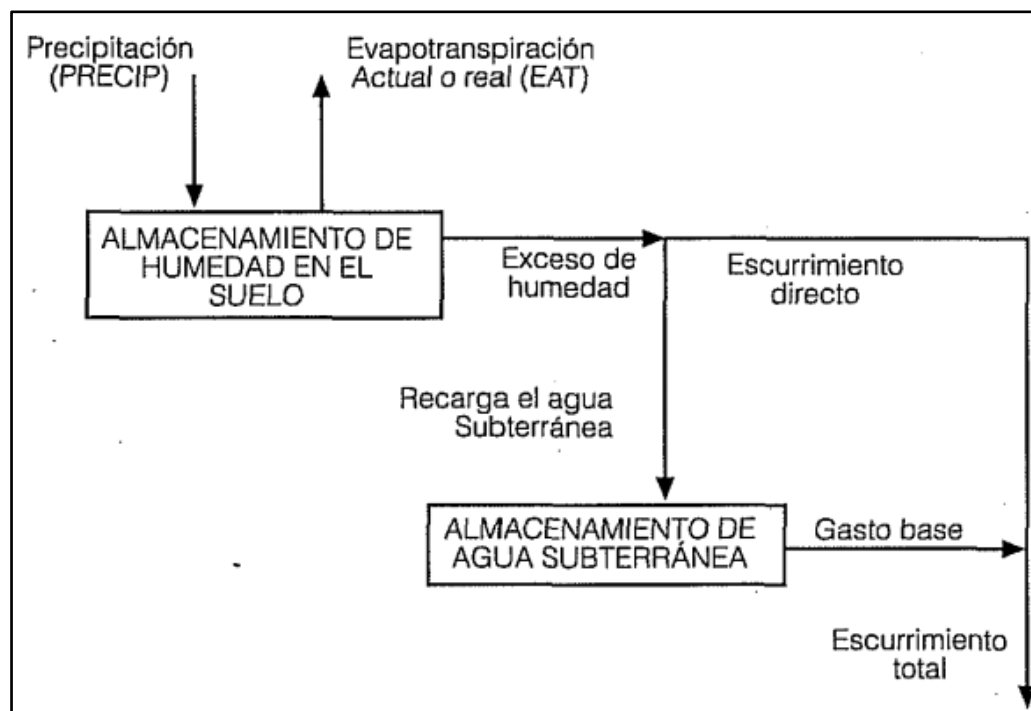


Figura 2.5: Esquema del modelo Hidrológico de Crawford (Hargreaves – Samani, 1982)

El modelo original de Crawford se simplificó al utilizar 12 valores de evapotranspiración potencial promedio mensuales (ETP) en todos los años, estimados por medio de una fórmula de ETP para pasto o cultivo de referencia, la de Hargreaves-Samani (1982); al realizar lo anterior, se incluyó un cuarto parámetro de ajuste (FC), el cual multiplica las magnitudes de ETP para adecuarlas, teóricamente, a las condiciones de la vegetación existente en la cuenca (Campos, 1991a, b). Además de las modificaciones anteriores, se empleó el algoritmo de Rosenbrock de múltiples variables no restringidas (Rosenbrock, 1960; Kuester y Mize 1973).

2.5 MODELO HIDROLÓGICO CHAC “CALCULO HIDROMETEOROLÓGICO DE APORTACIONES Y CRECIDAS”

El modelo matemático de balance de cuenca CHAC-Simula aplica el modelo de Témez (Témez, 1977 citado en CEDEX, 2004). Se trata de un modelo conceptual, agregado, de simulación continua, de pocos parámetros, de paso mensual, que aplica el principio de continuidad y simula los principales procesos de transferencia de agua en el ciclo hidrológico considerando dos almacenamientos: suelo/zona no saturada y acuífero/zona saturada. (Figura 2.6).

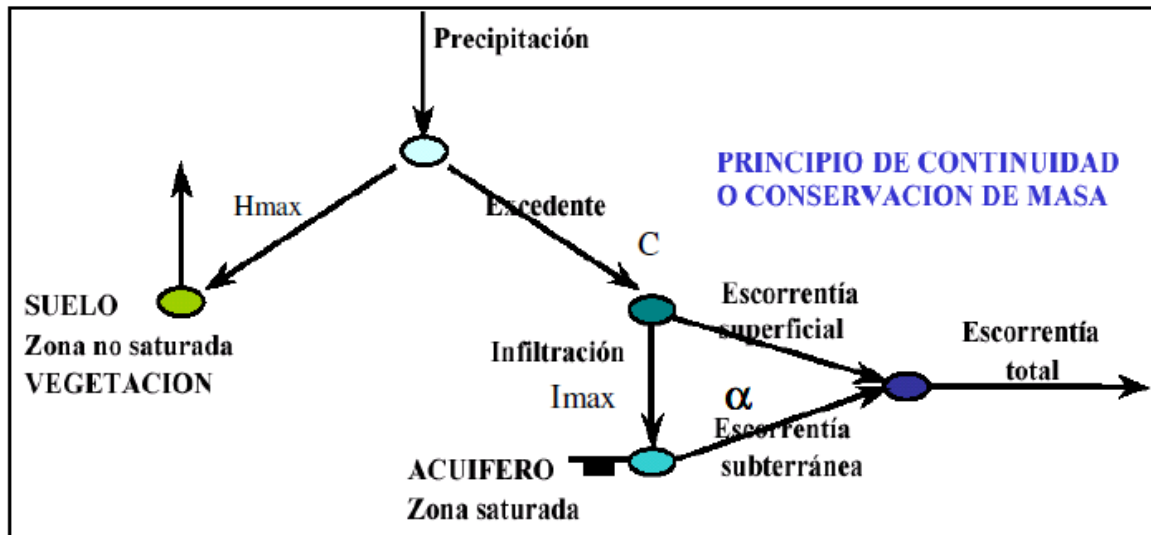


Figura 2.6: Principio de continuidad en el modelo Témez (Cedex, 2004)

Siendo:	P_0 : Umbral de escorrentía. mm
	$H_{\max}$: Parámetro de humedad máxima. mm/mes
	C : Parámetro de excedente.
	$I_{\max}$: Parámetro de infiltración máxima. mm/mes
	α : Parámetro coeficiente de descarga del acuífero. días ⁻¹
	K : Parámetro coeficiente de uso de suelo medio sobre ETP
	P_i : Precipitación; mes (i). mm
	H_{i-1} : Humedad antecedente; mes (i-1). mm
	EP_i : Evapotranspiración potencial, afectada por el coeficiente de usos de suelo; mes (i). mm
	ER_i : Evapotranspiración real; mes (i). mm
	T_i : Excedente; mes (i). mm
	V_i : Volumen almacenado; mes (i). mm
	I_i : Infiltración; mes (i). mm
	A_{SUP_i} : Escorrentía superficial; mes (i). mm
	A_{SUB_i} : Escorrentía subterránea; mes (i). mm
	Q_i : Caudal subterráneo; mes (i). m ³ /s
	A_{TOT_i} : Escorrentía total; mes (i). mm
Umbral de escorrentía, P_0	$P_0 = C \cdot (H_{\max} - H_{i-1})$
Excedente, T_i	$P_i \leq P_0 \Rightarrow T_i = 0$
	$P_i > P_0 \Rightarrow T_i = \frac{(P_i - P_0)^2}{P_i + \delta - 2P_0}$ siendo
	$\delta = H_{\max} - H_{i-1} + EP_i$
Balance de agua en el suelo, H_i	$H_i = \max(0, H_{i-1} + P_i - T_i - EP_i)$
Evapotranspiración real, ER_i	$ER_i = \min(H_{i-1} + P_i - T_i, EP_i)$
Infiltración, I_i	$I_i = I_{\max} \cdot \frac{T_i}{T_i + I_{\max}}$
Aportación superficial, A_{SUP_i}	$A_{SUP_i} = T_i - I_i$
Caudal drenado por el acuífero, Q_i	$Q_i = \alpha \cdot V_i$ $Q_i = Q_{i-1} \cdot e^{-\alpha \cdot t} + \alpha \cdot R_i \cdot e^{-\alpha \cdot \frac{t}{2}}$
Aportación subterránea, A_{SUB_i}	$A_{SUB_i} = V_{i-1} - V_i + R_i \cdot t$
Aportación total, A_{TOT_i}	$A_{TOT_i} = A_{SUP_i} + A_{SUB_i}$
VARIANTES DEL MODELO	
Siendo	Parámetro número de días con precipitación
	Dos ramas de descarga del acuífero:
	$\alpha 1$: Coeficiente de descarga del acuífero. días ⁻¹
	$\alpha 2$: Coeficiente de descarga del acuífero. días ⁻¹
Parámetro de reparto de recarga: tanto por uno	

Tabla 2.7: Síntesis de variables y ecuaciones del modelo Temez (Cedex, 2004)

La tabla 2.7 resume las variables utilizadas por el modelo, sus unidades y las ecuaciones que rigen los diferentes subprocesos. La información de entrada que requiere el modelo puede clasificarse en cuatro tipos: Series mensuales, datos generales, valores iniciales y parámetros de calibración. La precipitación, evapotranspiración potencial (ETP) y escorrentía (caudal) se deben introducir como series mensuales. Cada subcuenca tiene una sola serie de cada variable, lo que corresponde a un modelo agregado. Esto significa que los valores de precipitación y ETP han resultado de un cálculo espacial de ambas variables, en base a métodos como el de polígonos de Thiessen, distancia inversa o Krigging.

Los datos generales son: el área de la cuenca, el número de días de lluvia tipo por mes y el coeficiente ETP o de uso del suelo. El número de días lluvias tipo es el valor promedio del número de días del mes que presentan precipitación en la cuenca. En la forma actual del modelo, es un valor constante para todos los meses del año. Se recomienda usar el promedio de días de lluvia por mes de la estación húmeda. El coeficiente ETP es un coeficiente de corrección de la evapotranspiración potencial. El valor por defecto es 1, si los valores ingresados en la serie correspondiente a dicha variable climatológica fueron calculados mediante el método que mejor se ajuste a la región y uso del suelo.

Los datos iniciales son el caudal subterráneo y la humedad del suelo (contenido de agua) correspondientes al primer mes del periodo de simulación. Si no existen valores medidos, deberán asumirse valores sujetos a corrección posterior. El uso del año hidrológico en la modelación presenta una ventaja importante relacionada a este aspecto, ya que en cuencas subhúmedas o semiáridas es muy razonable asumir el valor 0 para la humedad inicial.

Los cuatro parámetros de calibración son el parámetro C de excedencia, la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo Hmax, la capacidad máxima de infiltración Imax y el coeficiente de descarga del acuífero α . La ubicación de estos parámetros en la figura 2.6 indica en que subproceso tiene más influencia cada uno de ellos. Se los describe a continuación por separado.

2.5.1 Parámetro C

Se usa para calcular el valor límite P_o de la precipitación por encima del cual habrá excedente de agua para la escorrentía e infiltración. Si C es 0 el valor de $P_o=0$, por lo que toda lluvia, aún de pequeña magnitud, producirá escorrentía a la salida de la cuenca. Como se puede observar en la tabla 2.1, P_o depende tanto de C como del contenido de agua en el suelo en el mes anterior. Este parámetro es adimensional y su rango usual es de 0 a 1. Valores típicos están en el rango de 0.1 a 0.4.

2.5.2 Hmax

Es la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo y zona no saturada en mm, incluyendo el almacenamiento superficial (charcos y depresiones) y en la vegetación. El agua almacenada en el suelo estará disponible para la evapotranspiración, por lo que un valor más grande de Hmax implica en principio una disminución del volumen de escorrentía.

2.5.3 I_{max}

Se define como la infiltración máxima posible o capacidad de infiltración en el mes, en mm. Este parámetro determina la división del excedente T en escorrentía superficial y recarga al acuífero, por lo que un nombre más adecuado sería el de percolación máxima. Varios autores proponen estimar I_{max} a partir de las características hidrogeológicas de la cuenca. Se ha asociado también con el Número de Curva (CN) del Soil Conservation Service, pero con la limitación de que el CN está asociado a la infiltración en el suelo superficial, por lo que el uso del CN para estimar I_{max} sólo puede tomarse como referencia preliminar.

2.5.4 Coeficiente de descarga del acuífero α

Es la inversa de la constante de recesión k ($\alpha=1/k$) expresada en (1/días). Se puede obtener de los registros hidrométricos de la época de estiaje o por calibración. α es más grande en cuencas pequeñas o con acuíferos poco importantes. La bibliografía (DHI, 2000) indica valores α en el rango de 0.005 a 0.1.

2.6 DIMENSIONAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA ALTURA DE EMBALSES EN CASCADA

De acuerdo con una clasificación de McMahon y Mein (1978), existen tres tipos principales de procedimientos para calcular la capacidad de un embalse: determinísticos, en los que se hace uso de registros de escurrimiento en periodos críticos; los métodos tipo Moran (Moran, 1960) y los basados en la generación sintética de información: estocásticos.

En forma breve, los métodos determinísticos son una serie de técnicas en las que no se hace uso de la probabilidad. Se emplean registros históricos de escurrimiento sin considerar la generación estocástica. Entre los más importantes se pueden mencionar la curva masa o diagrama de Rippl, los modelos de simulación y el método de la secuencia de picos.

Dentro del segundo grupo se consideran aquellos métodos que se derivan del trabajo de Moran (1956, 1960), que da una distribución permanente o estacionaria de contenidos en embalse cuando se define una demanda, dado el régimen de escurrimiento del río. En general, estos procedimientos derivan, por diferentes medios, una matriz de probabilidades de transición.

Los métodos estocásticos son los que se basan en el uso de registros sintéticos o -generados estocásticamente. En esencia, estos métodos son los mismos que los descritos anteriormente. La diferencia está en la longitud del registro de escurrimientos, el cual se obtiene de un modelo de generación estocástica que permite conservar las mismas propiedades estadísticas del registro histórico del que se parte.

2.6.1 Métodos determinísticos

2.6.1.1 Método de la curva masa

Este es uno de los métodos determinísticos más conocidos; se debe al ingeniero irlandés Rippl (1883), por lo que a menudo se le refiere como diagrama de Rippl. Para su aplicación se construye una gráfica que muestre el escurrimiento acumulativo del río contra el tiempo, de preferencia en una escala mensual. Si los escurrimientos mensuales correspondientes a varios años de registro se grafican de esta manera, se observará un comportamiento oscilatorio alrededor de una recta que unirá los puntos medios. Así, se observarán variaciones de pendiente que van cambiando según la magnitud de los escurrimientos y que corresponden a una disminución cuando el escurrimiento en un mes es menor al del mes anterior y a un aumento cuando existe una tendencia al alza entre dos meses consecutivos. A esta curva de escurrimientos acumulados se le superpone una línea de extracciones acumuladas, uniendo dos puntos de inflexión en cuyo intervalo existe un tramo cóncavo de curva. Esto significa, en términos del mecanismo de entrada-almacenamiento-extracción, que el comportamiento del río se modifica al imponer un almacenamiento que forzará a que el régimen del río siga la tendencia de la recta de demanda en vez de seguir la que sufre el río aguas arriba del embalse.

Una vez hecho lo anterior, se mide la ordenada mayor entre ambas curvas, es decir, el punto en el que la curva masa está más distante de la recta de demandas. Esta longitud representa el volumen necesario para satisfacer la diferencia entre la demanda y el escurrimiento natural del río, posterior al tiempo en que se igualan, que es el primer punto en que la recta de demanda y la curva masa se unen en el diagrama.

Este método permite calcular de la capacidad necesaria de embalse y el potencial de aprovechamiento de un río. En el primer caso, para evaluar la capacidad de embalse, se puede emplear un registro histórico crítico, en el que se presenten las condiciones más severas de escurrimiento, considerando una demanda anual preestablecida. Para el segundo, se puede emplear un registro histórico de escurrimientos bajo y alto y establecer, de acuerdo con algún criterio normativo, por ejemplo, porcentaje anual de satisfacción de demanda, la extracción potencial que la fuente permita.

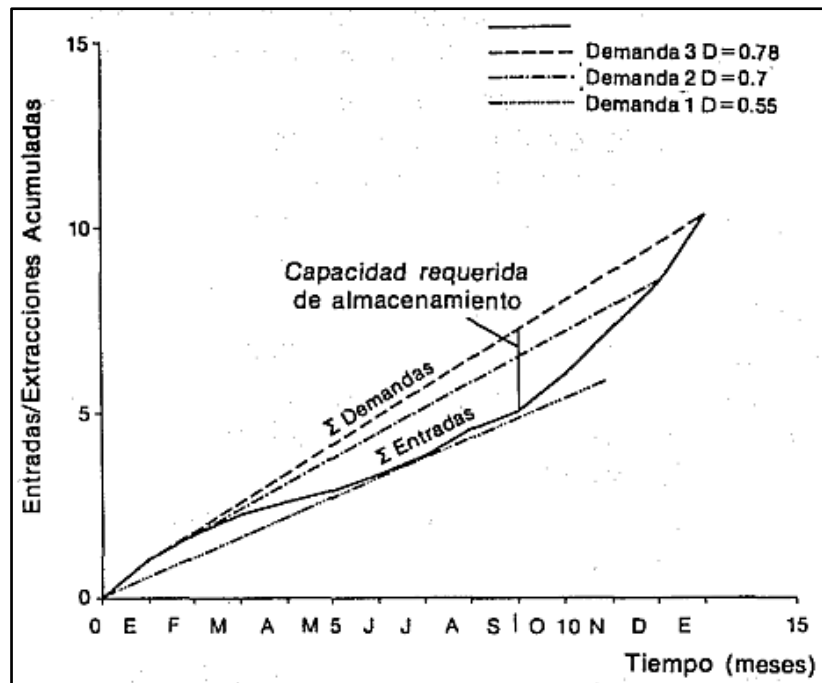


Figura 2.7: Esquema grafico del método de la Curva Masa (Rippl, 1883)

2.6.1.1 Modelo de simulación

Este método de análisis es quizá el más empleado en la actualidad; por lo general, para su aplicación se elabora un programa de computadora, aunque también puede hacerse manualmente en forma tabular, y se basa en la ecuación de continuidad

$$Z_{t+1} = Z_t + Q_t - D_t - E_t - L_t$$

Con la restricción

$$0 \leq Z_{t+1} \leq C$$

Donde

Z_{t+1}	es el volumen almacenado al final del mes t
Z_t	es el volumen almacenado al inicio del mes t
Q_t	es la entrada al vaso durante el mes t-ésimo
D_t	es extracción del vaso durante el mes t
E_t	evaporación neta durante el mes t
L_t	otras pérdidas en el mes t
C	capacidad útil del embalse (variable cuando el embalse sirve para control de avenidas)

En forma secuencial es como sigue:

- Se establece una capacidad inicial C y se toma $Z_0=C$ (vaso lleno). De esta forma se está probando una capacidad de almacenamiento C .
- La ecuación de continuidad, usando el registro histórico de escurrimientos disponible. La demanda puede ser constante o variar estacionalmente.
- Se va elaborando un registro de los valores Z_t y D_t para un análisis posterior.
- Se analiza el registro de valores de Z y D y se compara el número de veces en que no se cumplió total o parcialmente con la demanda, el nivel de satisfacción, etc., referidos a una norma establecida. En caso de no cumplir con la norma, se repite el procedimiento en el paso 1 con una nueva capacidad de almacenamiento.

Este procedimiento es a menudo muy laborioso porque requiere del ajuste de diversas variables, por lo que es necesario un proceso de ensayo y error hasta lograr los resultados esperados.

2.6.1.2 Algoritmo de la sucesión de picos

Este es un método propuesto por Thomas y Burden (1963) y referido en diversos trabajos (Fiering, 1967; Wallis y Matalas, 1972). Este algoritmo permite calcular la capacidad de un embalse, dado un registro de escurrimientos y su posible demanda, de tal forma que ésta pueda ser satisfecha siempre, si los escurrimientos y las extracciones se repiten. El método se aplica procediendo como sigue:

- Se calcula Q_i-D_i (escurrimiento-demanda) para toda $j = 1, 2, \dots, 12 N$ meses (N , número de años de registro) y se calcula la entrada neta (escurrimiento-demanda) acumulada.
- Se localiza el primer pico (P_1 , valor máximo) de estos valores acumulados, ya sea en una tabla de cálculo o en una gráfica de esas diferencias acumulativas (Q_i-D_i) contra el tiempo en meses.
- Se busca el Siguiente pico (P_2) que es mayor en magnitud que el primero (P_1) y que es posterior en el tiempo. Esto asegura que el embalse se ha vuelto a llenar y se ha completado un ciclo.
- Entre este par de picos, se encuentra la mayor depresión (T_1 , valor mínimo), y se calcula ($P_1 - T_1$) que es la capacidad de almacenamiento requerida en ese intervalo de tiempo, i.e. este volumen debe estar almacenado al final del mes correspondiente al P_1 para poder satisfacer la demanda completamente y llegar al final del mes correspondiente al T_1 con almacenamiento cero.
- Se localiza un pico posterior (P_3) mayor que P_2
- Se encuentra una depresión entre P_2 y P_3 (T_2) y se calcula P_2-T_2 .

- Se continúa el mismo procedimiento para el resto de la serie y se encuentra la mayor diferencia $P_i - T_i$ que es la capacidad de almacenamiento requerida.

2.6.1.3 Método de la curva masa a la inversa

El método de la curva masa puede hacerse en forma aritmética. De esta manera, el resultado es inmediato y no se tendría la limitación de un registro de escurrimiento muy largo. El método que se propone es en cierta forma una modificación al algoritmo de la sucesión de picos, pero que tiene su origen en el método de la curva masa.

El procedimiento de aplicación es el siguiente:

- Se calculan las diferencias entre el escurrimiento Q_i y la demanda D_i , para los 12N meses del periodo de registro, que se anotan en un registro de Exceso/Deficiencia.
- En otra columna se calculan las diferencias acumuladas, empezando con el ultimo valor negativo (deficiencia) y procediendo hacia atrás, hasta que uno de estos valores resulte positivo.
- Se elige la menor de estas cantidades negativas que es la capacidad requerida del embalse.

2.6.2 Métodos probabilísticos

Método de la matriz de transición

Harris (1955) propone un método de calculo de capacidad de embalse basado en el manejo de una matriz de probabilidades de transición (MPT).

El procedimiento es como sigue:

- Se define una capacidad de almacenamiento, conocida la demanda.
- Del registro de escurrimiento se definen dos temporadas principales, seca y húmeda (o de otra forma según sea necesario) y se separan los registros de escurrimiento correspondientes.
- Considerando una distribución teórica que represente adecuadamente a la de la muestra de escurrimientos, se construye una gráfica de frecuencia acumulativa contra escurrimiento para cada una de las estaciones identificadas anteriormente.
- Se definen zonas de almacenamiento iniciales y finales para la capacidad de embalse considerada.

- Se calculan la contribución neta al almacenamiento para que iniciando en una zona I se termine en cada una de las zonas finales F. Para ello se emplea:

$$Q_t = S_{t+1} + D_t - S_t$$

Donde

Q_t es la contribución neta al almacenamiento

S_{t+1} es el límite inferior de la zona final de almacenamiento

D_t es la demanda estacional

S_t es el límite inferior de la zona inicial de almacenamiento. La contribución neta al almacenamiento es el volumen de agua necesario para alcanzar una zona de almacenamiento después de haber satisfecho la demanda

- De las gráficas de las distribuciones acumulativas de probabilidad, se calcula la probabilidad que corresponde a las contribuciones netas al almacenamiento Q_t antes calculadas y se forma una matriz de probabilidad.
- La matriz así formada, se eleva al cuadrado en forma sucesiva hasta lograr que los renglones tengan valores iguales en cada una de sus columnas. Esta matriz (permanente) muestra las probabilidades de pasar de una zona de almacenamiento a otra, cuando el sistema ha operado durante un número infinito de años. De esta manera, los resultados son independientes de las condiciones originales de operación.
- Si la probabilidad de no cumplir con la demanda no es el valor deseado, se repite el proceso para una nueva capacidad de almacenamiento.

2.6.3 Métodos estocásticos

Los métodos estocásticos se denominan así por el uso que se hace de escurrimientos sintéticos generados estocásticamente a partir de registros histórico correspondiente y que poseen las mismas características estadísticas que la muestra original.

- Los métodos determinísticos tienen la desventaja de considerar sólo el registro histórico de escurrimientos, limitando de esta manera las posibilidades de escurrimiento a las de muestra histórica. Sin embargo, la gran ventaja de estas técnicas es su simplicidad tanto en los conceptos como en la aplicación. Estos procedimientos pueden ser usados en una etapa preliminar de diseño.
- En el caso de los métodos de matriz de probabilidad de transición, se hace abstracción conceptos de teoría de líneas de espera hasta de los registros históricos mediante el empleo de distribuciones teóricas de probabilidad, considerando así todas las condiciones posibles de entrada al vaso. Este es un método más elaborado y complejo

que involucra el cálculo de la matriz permanente. Este proceso es muy tardado, por lo que usualmente se consideran dos estaciones de escurrimiento en el ciclo anual.

- El empleo del algoritmo de sucesión de picos o el de la curva masa a la inversa puede proveer mayor información, si se aplican usando un registro sintético de gran longitud (v.g. 1000 años), Estos dos métodos pueden para lograr una simulación regresiva si se toman en cuenta evaporación, precipitación, etc., lo que produciría información más precisa sobre el comportamiento del sistema.
- El uso de todos estos métodos de cálculo es recomendable para cualquier aplicación real. La comparación de los resultados obtenidos, podría proveer información adicional respecto al funcionamiento del embalse lo cual en muchas circunstancias es valioso para el diseñador.
- La modificación de algunos de estos permitiría la obtención de otras variables diseño tales como la capacidad de control de avenidas. De hecho, se pueden llegar a establecer curvas de extracción o políticas de operación.

2.7 PROGRAMAS COMPUTACIONALES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE EMBALSES

2.7.1 ResSim

El HEC Reservoir System Simulation (HEC-ResSim, 2013) es un modelo de simulación de embalses que ha sido desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU, para ayudar a predecir el comportamiento de un embalse y de acuerdo a esto determinar las salidas de agua durante la operación diaria del mismo.

El software puede modelar eventos singulares o un conjunto de eventos de periodos completos establecidos mediante Time-steps (Pasos de tiempo). Los proyectos se crean mediante tres sub-procesos hasta la simulación, esto permite que se puedan incorporar diferentes niveles de detalle y especificaciones, una vez determinado el modelo final y ejecutada la simulación se pueden acceder a diferentes opciones de visualización de resultados entre tablas, gráficos y Tablas.

Para la creación de red de embalses el usuario deberá construir el esquema de la red, describir los elementos físicos y operacionales del modelo de embalse y desarrollar las alternativas que desea analizar.

Una vez que el modelo de embalse este completo y las alternativas ya se hayan definido, el módulo de simulación se utiliza para configurar, para que los cálculos sean realizados y los resultados sean vistos. Cuando se crea una simulación se debe especificar un tiempo de simulación, un intervalo de cálculo, y las alternativas para ser analizados.

2.7.2 WEAP

El modelo WEAP presenta un modelo hidrológico en el que se puede obtener datos de caudal a partir de precipitación, datos de temperatura, velocidad del viento, superficie de la cuenca, también es necesario datos de tipo y uso de suelo con los cuales se calculan parámetros de calibración en la cuenca y para la calibración es necesario datos de caudales medidos en la salida de la cuenca. Con todos estos datos introducidos en el WEAP, calculará caudales que serán nuestros “caudales calculados” en la cuenca.

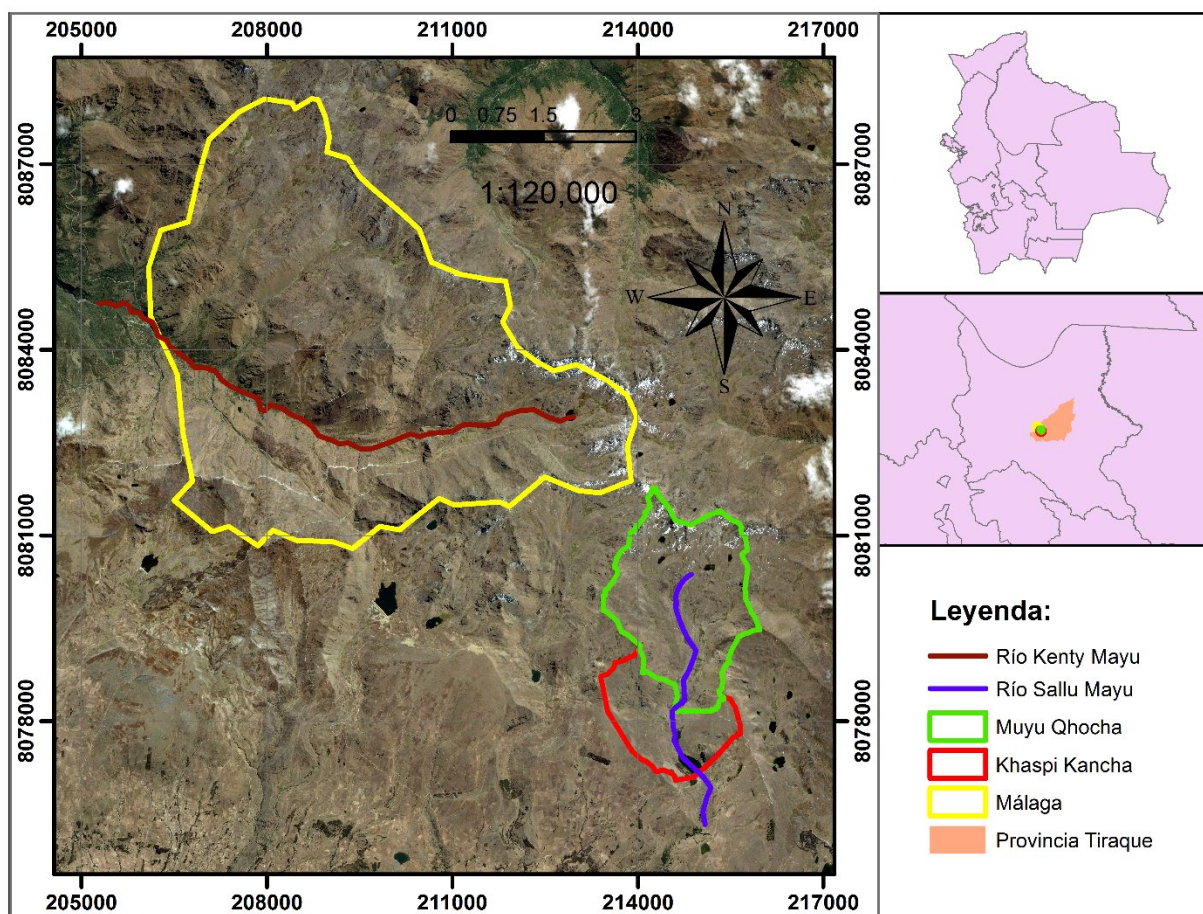
En la interfaz visual de WEAP se importan primero los elementos necesarios para la modelación que serían el catchmen de la cuenca, el río trazado en la cuenca, luego el embalse en el río y también áreas de demanda de agua a las que abastecerá el embalse. WEAP tiene la opción de calcular la “Cobertura” de la demanda que es el porcentaje de atención o cobertura que el embalse atenderá en el área de demanda que se puso en el programa.

Esta cobertura es importante para dibujar nuestra propia tabla de porcentaje de atención a la demanda en función de la altura de la presa para distintas probabilidades de falla de la presa. Este Tabla nos ayudara a calcular la altura de la presa observando hasta que alturas el porcentaje de atención a la demanda va creciendo y en el punto que este porcentaje deje de crecer razonablemente, se considerara la altura optima de la presa.

3 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

Las cuencas Muyo Qhochá y Khaspi Kancha se encuentran ubicados en el departamento de Cochabamba en la provincia de Tiraque entre $65^{\circ} 46'$ y $65^{\circ} 42'$ longitud oeste y entre $17^{\circ} 20'$ y $17^{\circ} 24'$ latitud sur.



Mapa 3.1: Ubicación de las cuencas Málaga, Muyo Qhochá y Khaspi Kancha

3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE INTERÉS HIDROLÓGICO

Algunas características físicas como el área y la altitud media de las cuencas Málaga, Muyo Qhocha y Khaspi Kancha.

Tabla 3.1: Características físicas de las cuencas de estudio

Cuenca	Área (Km ²)	Altitud Media (msnm)
<i>Málaga</i>	34.02	3899
<i>Muyo Qhocha</i>	5.4	4372.5
<i>Khaspi Kancha</i>	2.43	4240.5

3.2.1 Curvas Hipsométricas

Tabla 3.2: Curvas hipsométricas de la cuenca Muyo Qhocha

Nº	Cotas Intervalo		Cota Media Intervalo	Área Parcial	Área Acumulada (km ²)	% Área Total
1	4078	4137	4107.5	0.1905	0.1905	3.53
2	4137	4196	4166.5	0.4659	0.6564	12.16
3	4196	4255	4225.5	0.4739	1.1303	20.94
4	4255	4314	4284.5	0.6841	1.8145	33.62
5	4314	4373	4343.5	0.8767	2.6912	49.86
6	4373	4432	4402.5	1.0384	3.7296	69.10
7	4432	4491	4461.5	0.8004	4.5300	83.92
8	4491	4550	4520.5	0.5042	5.0343	93.27
9	4550	4609	4579.5	0.2884	5.3227	98.61
10	4609	4667	4638	0.0750	5.3977	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3: Curvas hipsométricas de la cuenca Khaspi Kancha

Nº	Cotas Intervalo		Cota Media Intervalo	Área Parcial	Área Acumulada (km ²)	% Área Total
1	4004	4051	4027.5	0.2559	0.2559	10.48
2	4051	4098	4074.5	0.3577	0.6136	25.14
3	4098	4146	4122	0.3761	0.9897	40.55
4	4146	4193	4169.5	0.3274	1.3172	53.96
5	4193	4240	4216.5	0.3688	1.6859	69.07
6	4240	4288	4264	0.2978	1.9838	81.27
7	4288	4335	4311.5	0.2841	2.2679	92.91
8	4335	4382	4358.5	0.1193	2.3871	97.79

9	4382	4430	4406	0.0417	2.4288	99.50
10	4430	4477	4453.5	0.0121	2.4410	100.00

Fuente: Elaboración propia

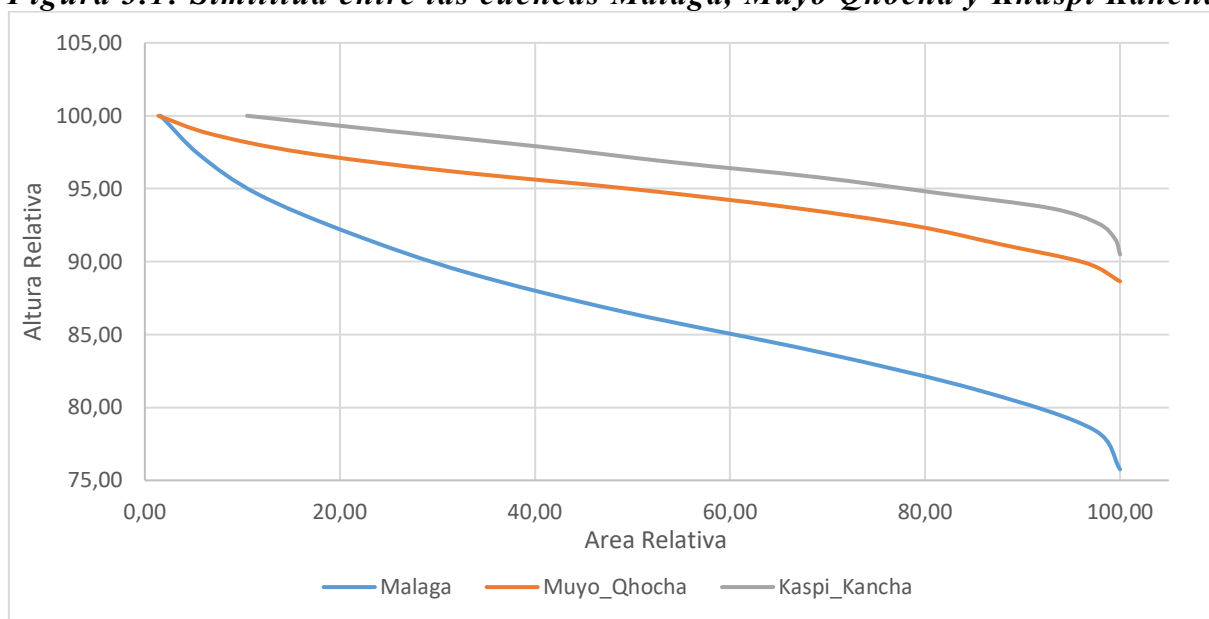
Tabla 3.4: Curvas hipsométricas de la cuenca Málaga

Nº	Cotas Intervalo		Cota Media Intervalo	Área Parcial	Área Acumulada (km ²)	% Área Total
1	3384	3509	3446.5	0.5525	0.5525	1.62
2	3509	3634	3571.5	1.3648	1.9173	5.64
3	3634	3758	3696	2.0039	3.9212	11.53
4	3758	3883	3820.5	3.2663	7.1875	21.13
5	3883	4008	3945.5	4.0880	11.2755	33.15
6	4008	4133	4070.5	5.4975	16.7730	49.31
7	4133	4258	4195.5	6.6723	23.4453	68.93
8	4258	4384	4321	5.7174	29.1627	85.73
9	4384	4507	4445.5	3.9520	33.1146	97.35
10	4507	4632	4569.5	0.9009	34.0155	100.00

Fuente: elaboración propia

3.2.2 Curvas hipsométricas adimensionales de similitud entre las tres cuencas

Figura 3.1: Similitud entre las cuencas Málaga, Muyo Qhocha y Khaspi Kancha



Fuente: Elaboración propia

En los gráficos se pueden observar que la cuenca Málaga tiene alturas más bajas en comparación con las otras cuencas, a pesar de que las cuencas sean contiguas, y por lo cual también su clima es tropical y debido a ello también su precipitación media anual es mucho más alta, mayor presencia de vegetación y también presenta diversidad en sus alturas, ya que va desde la cota 3384 hasta 4569.

Las cuencas Muyo Qhocha y Khaspi Kancha son mucho más similares en sus alturas y debido a ello también son similares tanto en la cobertura de suelo, en el clima y en la precipitación.

3.3 DISPONIBILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS

3.3.1 Disponibilidad espacial de datos hidrometereológicos

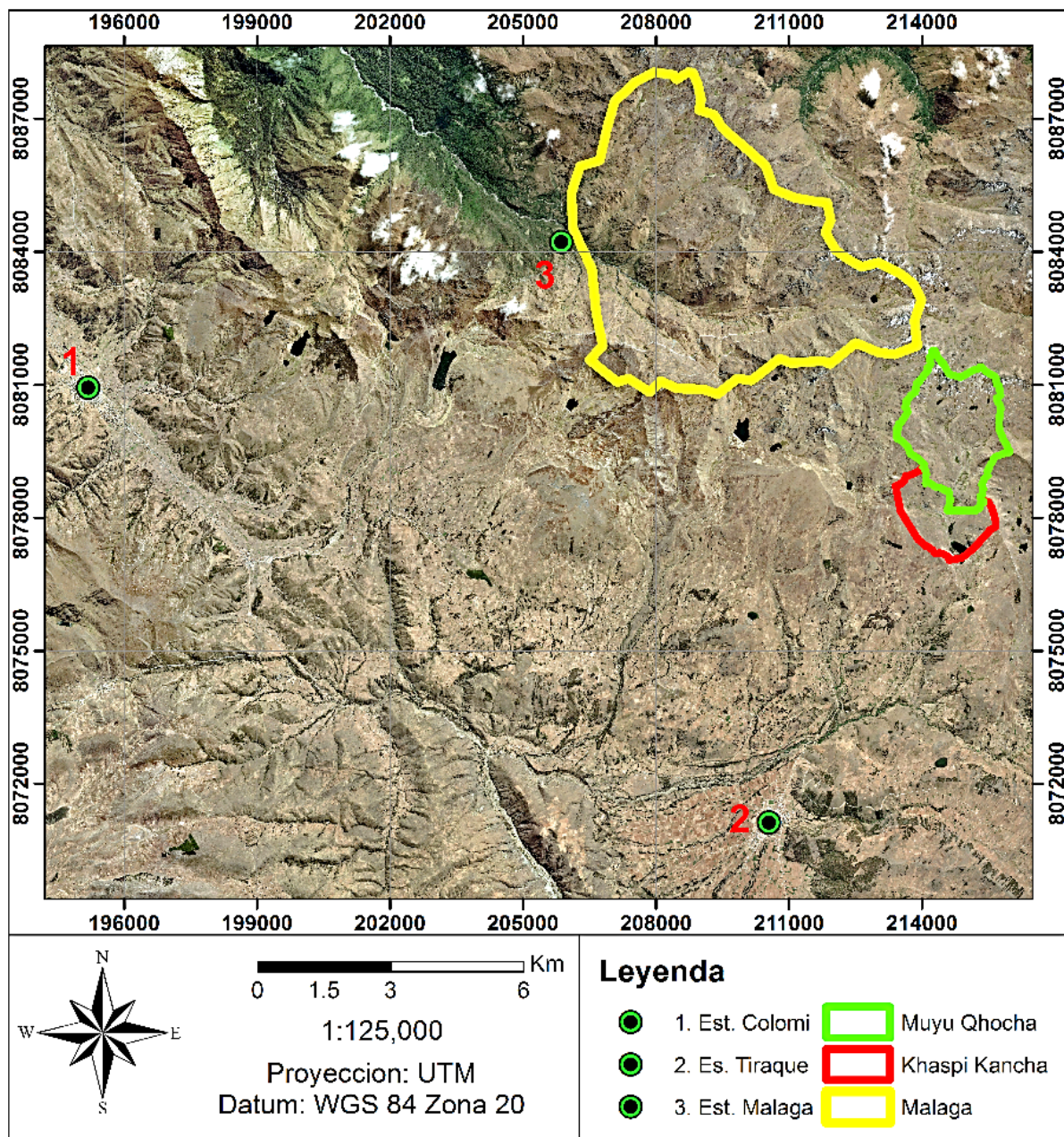
Las estaciones pluviométricas más próximas a la cuenca del proyecto son las de Colomi, Tiraque y Málaga 3200, sus coordenadas son proporcionadas en el Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Localización de las estaciones meteorológicas

Estación	Altitud msnm	Latitud S	Longitud W	P media (mm)	Periodo de registro
<i>Colomi</i>	3309	17°20'9.60"S	65°51'43.20"O	609	1978 – 2017
<i>Tiraque</i>	3304	17°25'31.00"S	65°43'28.00"O	529	1960 – 2017
<i>Málaga 3200</i>	3200	17°18'21.60"S	65°46'1.20"O	2075	1998 – 2013

Fuente: Elaboración propia

Mapa 3.2: Ubicación de las estaciones Hidrometereológicas más próximas a la cuenca del proyecto



Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Disponibilidad Temporal de las estaciones hidrometeorológicas

Se obtuvieron datos Meteorológicos diarios de precipitación, temperatura, velocidad del viento de las estaciones más cercanas a la cuenca de estudio de la página de SENHAMI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología), pero este trabajo se realizó con datos mensuales por lo que se realizó una sumatoria de estos datos meteorológicos de todos los días del mes. Los datos hidrométricos de la cuenca Málaga, necesarios para su calibración, se obtuvieron de la estación hidrométrica San Jacinto, estos datos también eran diarios por lo que para convertirlos a mensuales se sacó el promedio de todos los días del mes.

3.3.2.1 Disponibilidad Temporal de las estaciones hidrometeorológicas

Año		1960				1961				1962				1963				1964				1965				1966			
Precipitación	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												
Caudal	Málaga																												
	Málaga																												
	Tiraque																												
Temperatura	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												
Velocidad del Viento	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												

Año		1967				1968				1969				1970				1971				1972				1973			
Precipitación	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												
Caudal	Málaga																												
	Málaga																												
	Tiraque																												
Temperatura	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												
Velocidad del Viento	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												

Año		1974				1975				1976				1977				1978				1979				1980			
Precipitación	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												
Caudal	Málaga																												
	Málaga																												
	Tiraque																												
Temperatura	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												
Velocidad del Viento	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												

Año		1981				1982				1983				1984				1985				1986				1987			
Precipitación	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												
Caudal	Málaga																												
	Málaga																												
	Tiraque																												
Temperatura	Colomi																												
	Málaga																												
	Tiraque																												
Velocidad del Viento	Colomi																												
	Málaga																												
	Tiraque																												

Año		1988				1989				1990				1991				1992				1993				1994			
Precipitación	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												
Caudal	Málaga																												
	Málaga																												
	Tiraque																												
Temperatura	Colomi																												
	Málaga																												
	Tiraque																												
Velocidad del Viento	Colomi																												
	Málaga																												
	Tiraque																												

Año		1995				1996				1997				1998				1999				2000				2001			
Precipitación	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												
Caudal	Málaga																												
	Málaga																												
	Tiraque																												
Temperatura	Colomi																												
	Málaga																												
	Tiraque																												
Velocidad del Viento	Colomi																												
	Málaga																												
	Tiraque																												

Año		2002				2003				2004				2005				2006				2007				2008			
Precipitación	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												
Caudal	Málaga																												
Temperatura	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												
Velocidad del Viento	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												

Año		2009				2010				2011				2012				2013				2014				2015			
Precipitación	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												
Caudal	Málaga																												
Temperatura	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												
Velocidad del Viento	Málaga																												
	Tiraque																												
	Colomi																												

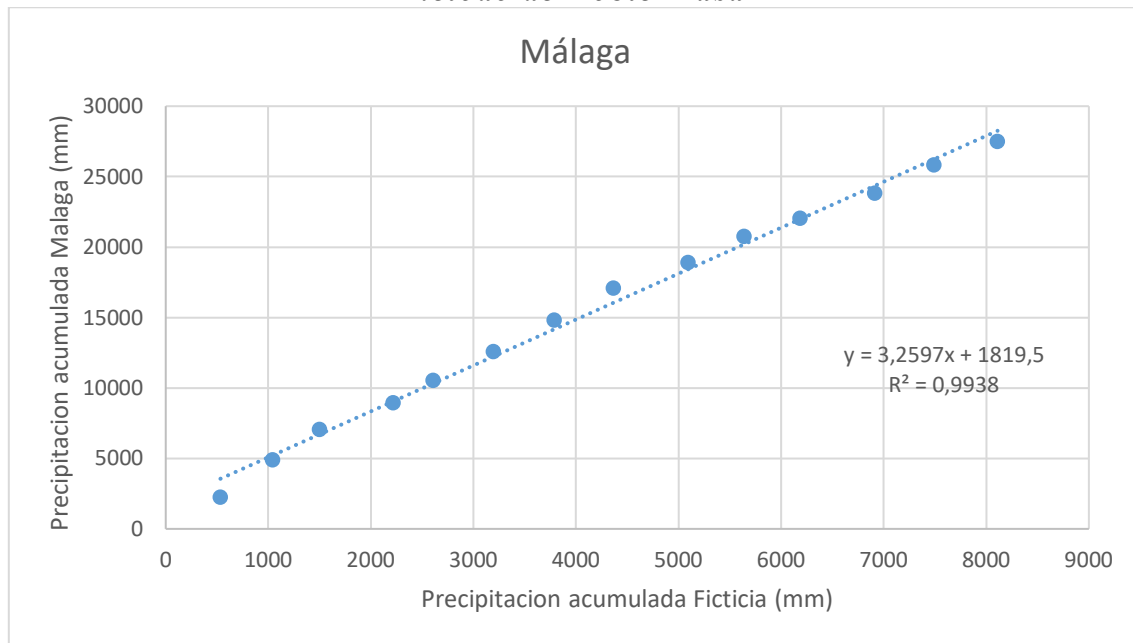
Año		2016				2017			
Precipitación	Málaga								
	Tiraque								
	Colomi								
Caudal	Málaga								
Temperatura	Málaga								
	Tiraque								
	Colomi								
Velocidad del Viento	Málaga								
	Tiraque								
	Colomi								

3.4 ANÁLISIS DE CALIDAD DE DATOS HIDROMETEREOLÓGICOS

Para la modelación hidrológica de la cuenca Málaga, para los datos meteorológicos primeramente se realizaron los polígonos de Thiessen en el cual se vio que sólo la estación Málaga cubre toda la cuenca por lo que solo se usaron los datos de esa estación.

Para esta estación se realizó un análisis de calidad por el método de la doble masa o de acumulación, primero se construyeron datos de una estación ficticia con el promedio de los datos de las estaciones Tiraque y Colomi, luego se calculó la precipitación acumulada de la estación Málaga y de la estación ficticia con lo que se construyó una gráfica de dispersión como se muestra en la figura 3.2, después se sacó la ecuación de correlación y se puede concluir que el factor de correlación es cercano a la unidad cumpliéndose con la validación.

Figura: 3.2 Análisis de calidad de los datos de la estación Málaga por el método de Doble Masa

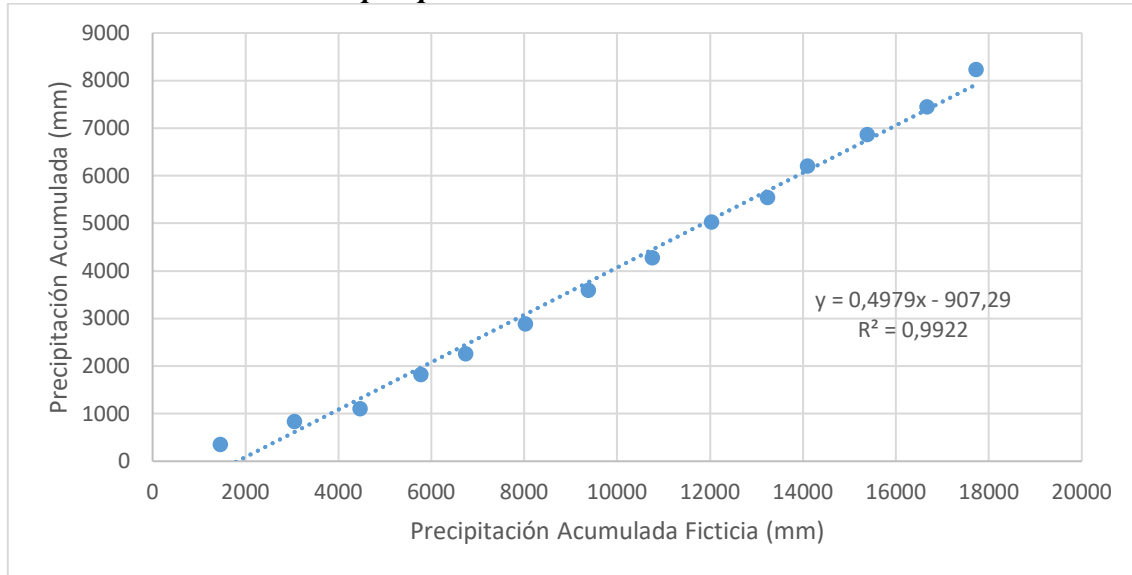


Fuente: Elaboración propia

Para los datos meteorológicos usados en la modelación hidrológica de las cuencas Muyo Qhocha y Khaspi Kancha se hizo énfasis solo en la estación Tiraque debido a que las demás estaciones están del otro lado de la ladera de la cordillera.

A continuación, en la Figura 3.3 se presenta el gráfico de dispersión para realizar el análisis de calidad por el método de Doble Masa para los datos de precipitación de la estación Tiraque y se observa que el factor de correlación es cercano a la unidad, que es un valor bueno para cumplir con la validación.

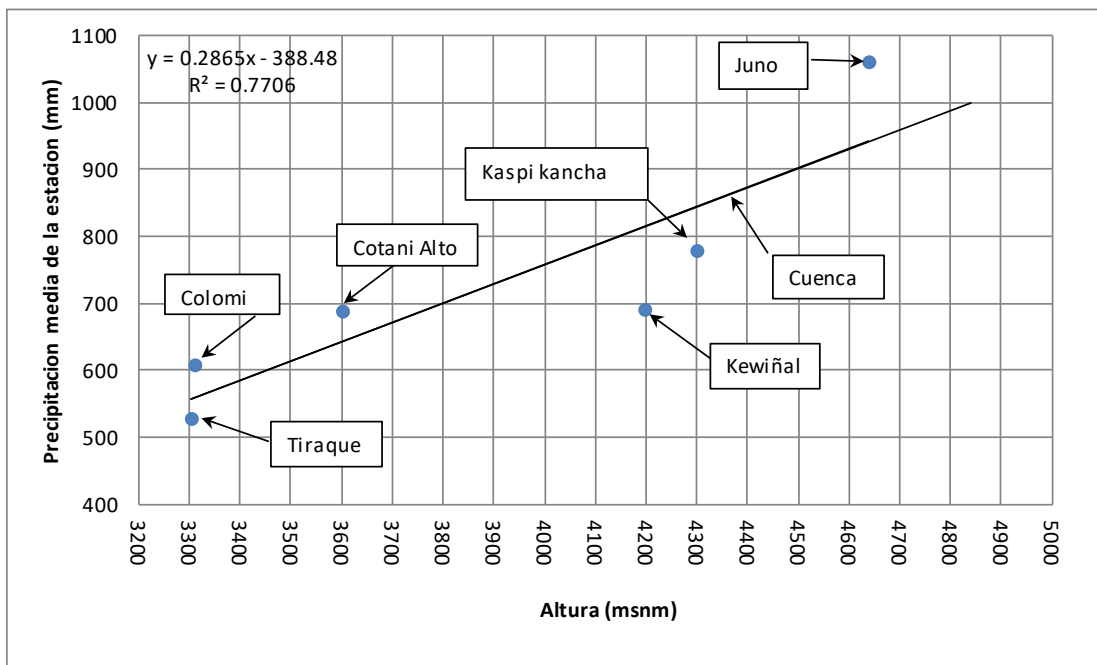
Figura 3.3: Análisis de calidad de los datos de Precipitación de la estación Tiraque por el método de Doble Masa



Fuente: Elaboración propia

Debido a que las cuencas de estudio tienen una altura promedio superior a la de la estación Tiraque, se realizó una relación Altura-Precipitación promedio con los datos de precipitación promedio anual con las cuencas cercanas como se muestra en la figura 3.4.

Figura 3.4: Relación altura estación – Precipitación media anual



Fuente: Hidrología Cuenca Muyo Qhocha

En la relación de la figura se puede estimar una precipitación promedio de 854 mm para una altitud de 4352 msnm y como la estación Tiraque tiene una precipitación promedio de 530 mm se puede obtener un factor de transformación para elevar los datos mensuales de Tiraque de manera que a nivel anual se alcance una precipitación promedio de 854 mm para las cuencas.

Las series mensuales obtenidas se muestran en el Tabla 3.6

Tabla 3.6: Precipitación mensual para las cuencas Muyo Qhocha y Khaspi kancha (mm)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
2000	137	265	129	31	0	1	21	14	11	6	69	144	828
2001	137	103	216	0	1	48	4	28	2	16	39	127	721
2002	261	203	125	7	19	14	6	10	25	24	69	88	851
2003	72	169	121	31	10	0	55	8	34	43	16	396	955
2004	343	85	101	20	0	0	4	5	0	30	102	129	819
2005	248	222	17	0	15	1	25	0	127	30	151	84	920
2006	356	259	4	43	0	0	4	10	30	31	107	169	1013
2007	263	78	204	56	0	4	0	0	47	33	81	148	914
2008	152	209	110	62	6	4	0	0	15	48	20	187	813
2009	271	152	105	62	0	12	0	25	10	9	2	105	753
2010	211	123	141	72	15	0	1	4	26	5	24	164	786
2011	174	167	99	0	11	0	53	1	25	30	51	62	673
2012	138	408	164	9	0	5	35	2	4	21	52	152	990
2013	149	232	111	40	0	0	9	59	0	66	76	171	913
Prom	208	191	118	31	6	6	16	12	25	28	61	152	854

Fuente: Hidrología Cuenca Muyo Qhocha

3.5 MAPAS TEMÁTICOS

3.5.1 Mapa de uso de suelo, cuencas Málaga, Muyo Qhocha y Khaspi Kancha

Para estimar el uso de suelo en las cuencas de estudio se usó el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) que consiste en un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a mediciones, por medio de sensores remotos instalados en una plataforma espacial (en este caso de la plataforma “LandSat 8”), de la intensidad de radiación de ciertas bandas del Espectro Electromagnético que la vegetación emite o refleja.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

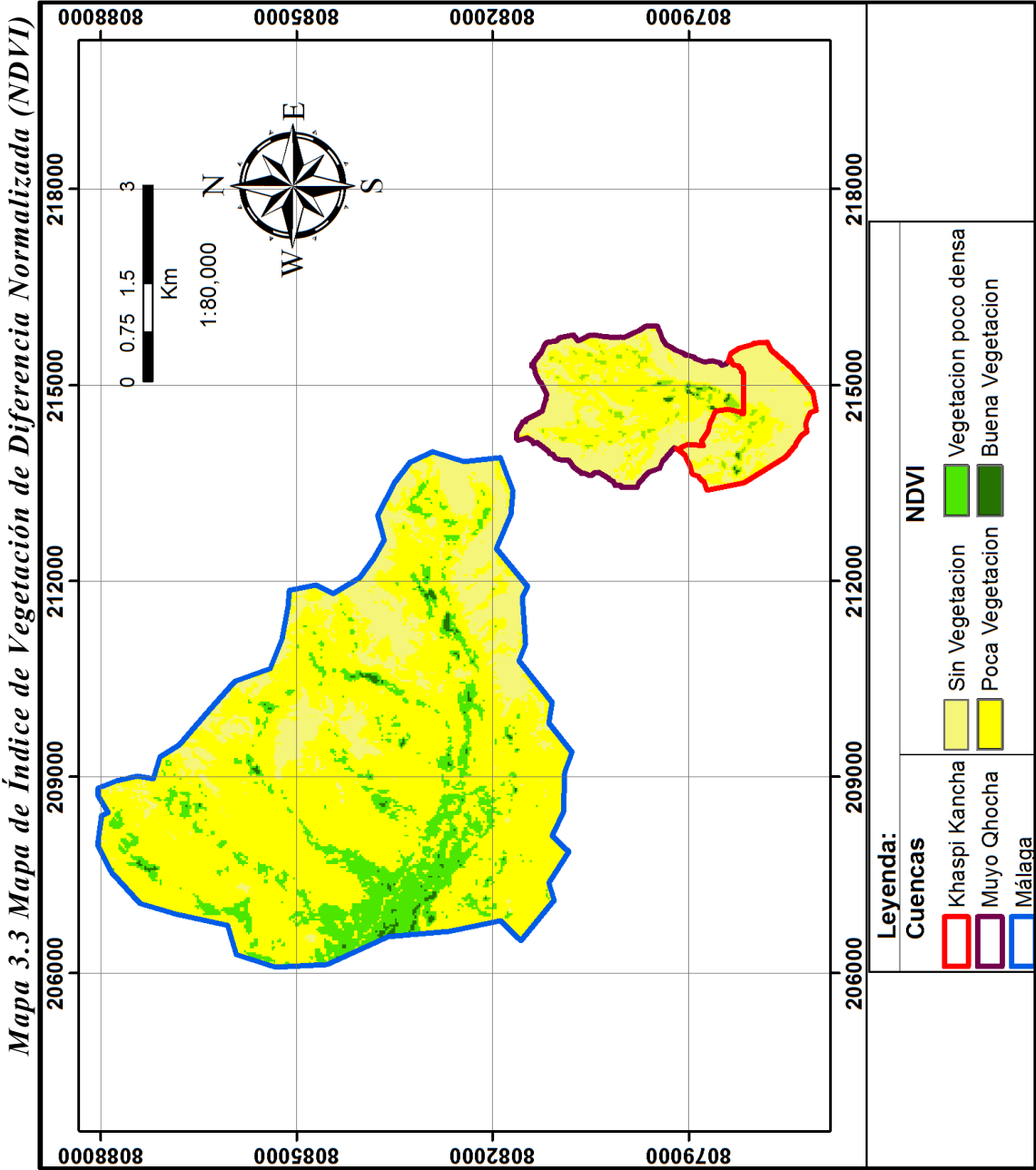
Dónde: NIR= Banda infrarroja

RED= Banda Roja

El NDVI varía entre -1 y 1, los valores positivos corresponden a las zonas cubiertas de vegetación, los valores negativos corresponden a nubes nieve y agua, las zonas con suelo desnudo y ropa o suelos con vegetación dispersa presentan valores negativos y positivos cercanos a cero.

Para este estudio se sacó el NDVI en las cuencas de estudio como se muestra en el Mapa 4.2 clasificando los tipos de cobertura en cuatro grupos que se los asigno distintos tipos de uso de suelo de acuerdo a las tablas para obtener los valores de calibración.

- Sin vegetación (de -1 a -0.5): Sin cobertura vegetal.
- Poca vegetación (de -0.5 a 0): Pastizales, Arbustos, Puna alto Andina Árida.
- Vegetación poco densa (de 0 a 0.5): Agricultura, Cultivos, Humedales.
- Buena Vegetación (de 0.5 a 1): Bosque, Plantación Forestal.



Fuente: Elaboración Propia

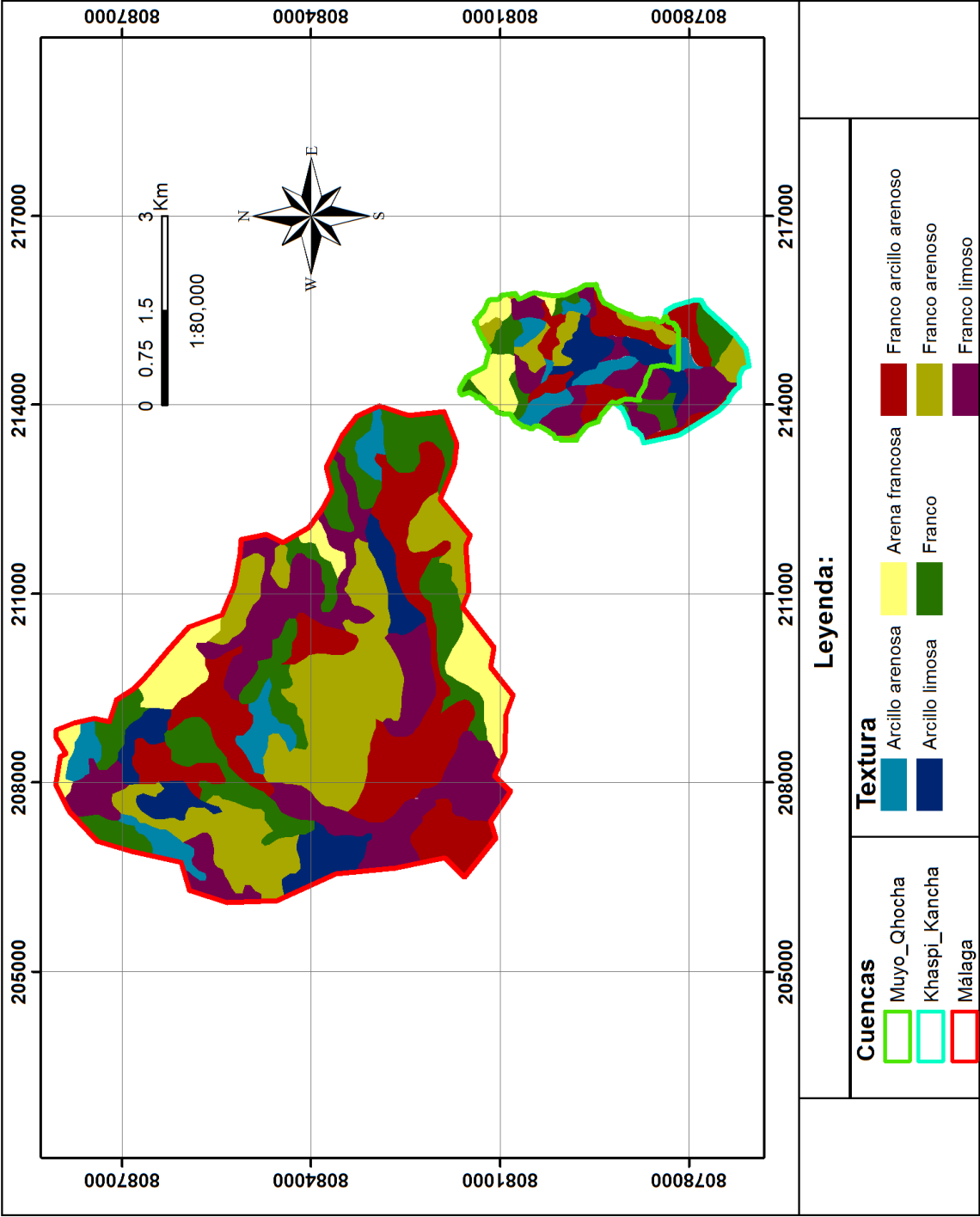
Cobertura	Málaga		Muyo Qhocha		Khaspi Kancha	
	Área (Km2)	Porcentaje de Área (%)	Área (Km2)	Porcentaje de Área (%)	Área (Km2)	Porcentaje de Área (%)
<i>Sin Vegetación</i>	5.61	16.54	2.62	48.53	1.65	67.80
<i>Poca Vegetación</i>	23.65	69.66	2.53	46.87	0.71	29.26
<i>Vegetación poca Densa</i>	4.46	13.14	0.22	4.06	0.06	2.55
<i>Buena Vegetación</i>	0.23	0.67	0.03	0.54	0.01	0.39

Fuente: Elaboración Propia

3.5.2 Mapa de tipo de suelo, cuencas Málaga, Muyo Qhocha y Khaspi Kancha

El tipo de suelo en las cuencas estudiadas, es presentado en el Mapa 4.3, habiendo sido obtenido en base a inferencias basadas en visitas de campo y un análisis geomorfológico realizado en base a imágenes satélite.

Mapa 3.4 Mapa de tipo de Suelo en las cuencas de estudio



Fuente: Mapas Temáticos en Tiraque.

Tabla 3.2: Área de Texturas de las cuencas Málaga, Muyo Qhocha y Khaspi Kancha

Textura	Málaga		Muyo Qhocha		Khaspi Kancha	
	Área (Km2)	Porcentaje de Area (%)	Área (Km2)	Porcentaje de Area (%)	Área (Km2)	Porcentaje de Area (%)
<i>Arcillo arenosa</i>	1.59	4.67	0.76	14.12	0.11	4.48
<i>Arcillo limosa</i>	2.33	6.86	0.70	12.95	0.17	6.90
<i>Arena francosa</i>	2.43	7.17	0.67	12.43	0.00	0.00
<i>Franco</i>	5.77	17.00	0.52	9.57	0.55	22.53
<i>Franco arcillo arenoso</i>	6.85	20.18	0.99	18.22	0.52	21.48
<i>Franco arenoso</i>	7.94	23.40	0.68	12.57	0.23	9.54
<i>Franco limoso</i>	7.04	20.73	1.09	20.14	0.85	35.08

Fuente: Elaboración Propia

4 MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA LA DETERMINACIÓN DEL APOORTE DE AGUA A LAS PRESAS MUYU QHOCHA Y KHASPI KANCHA

4.1 ESTRATEGIA ADOPTADA PARA SIMULAR LA TRANSFORMACIÓN DE LLUVIA EN CAUDAL, EN UNA CUENCA SIN DATOS DE DESCARGA

Para simular la transformación de lluvia en caudal en un modelo hidrológico de una cuenca en la que no se tiene datos de caudal de descarga de la cuenca, se recurrió primeramente a una cuenca vecina y/o similar, que sí cuenta con datos medidos de precipitación y caudal de descarga para poder realizar un modelo hidrológico de dicha cuenca, que en este caso de estudio se usó la cuenca Málaga que está a lado de la cuenca de estudio y con características similares.

Seguidamente se realizó la modelación, su calibración y validación del modelo hidrológico de la cuenca Málaga, para cerciorarse que los parámetros obtenidos de la calibración si son los correctos para que el modelo pueda calcular caudales en periodos fuera de la calibración.

Suponiendo que las características físicas de la cuenca Málaga son las mismas o similares a las cuencas Muyo Qhocha y Khaspi Kancha debido a que son cuencas contiguas, se usaron los parámetros de calibración obtenidos del modelo hidrológico de Málaga en los modelos hidrológicos realizados para las cuencas de Muyo Qhocha y Khaspi Kancha para así simular el caudal de descarga de dichas cuencas.

4.1.1 Uso de la cuenca Málaga con datos de lluvia y caudal

La cuenca Málaga cuenta con una superficie de 34.02 km² pertenece a la red de cuencas de aporte a la Presa Colomi por lo cual es monitoreada constantemente, tanto en mediciones de precipitación y caudal.

Para este análisis se usó datos mensuales en precipitación, temperatura y velocidad del viento que son necesarios en el modelo WEAP. No se tiene datos medidos de humedad en las estaciones hidrometeorológicas cercanas.

Los caudales, que son muy necesarios para la calibración, se obtuvo de una modelación hecha por el LHUMMS (Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Mayor de San Simón), donde se calculó el aporte que la cuenca Málaga realiza a la presa de Corani.

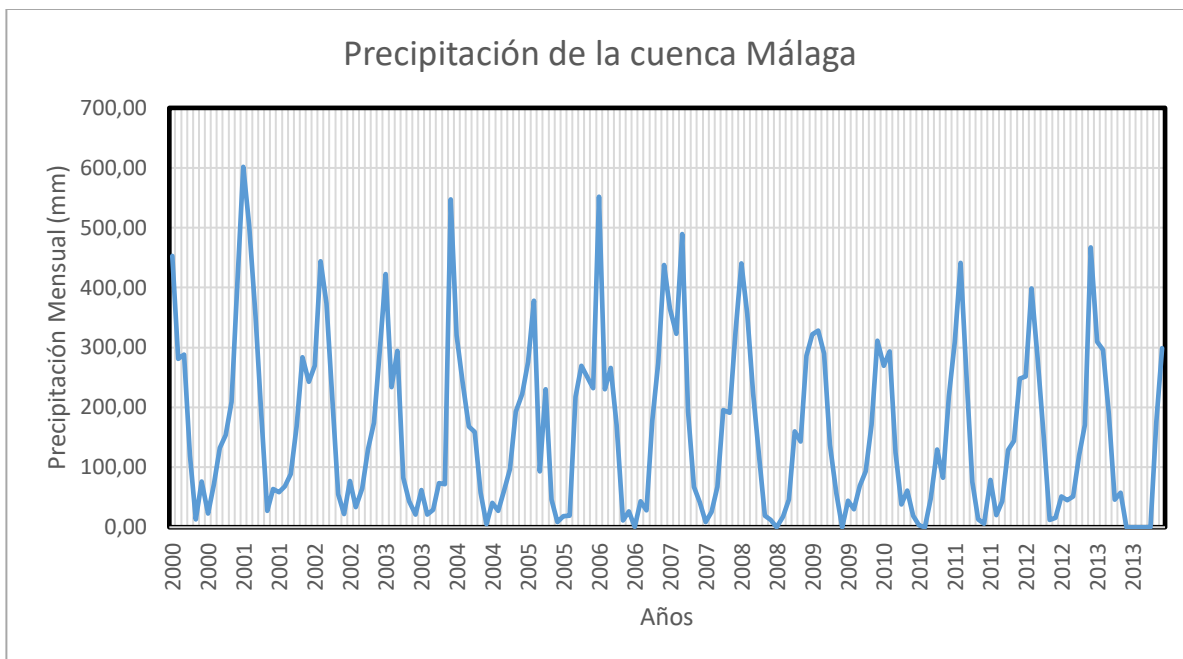


Figura 4.1: Datos de Precipitación mensual de la cuenca Málaga (SENHAMI)

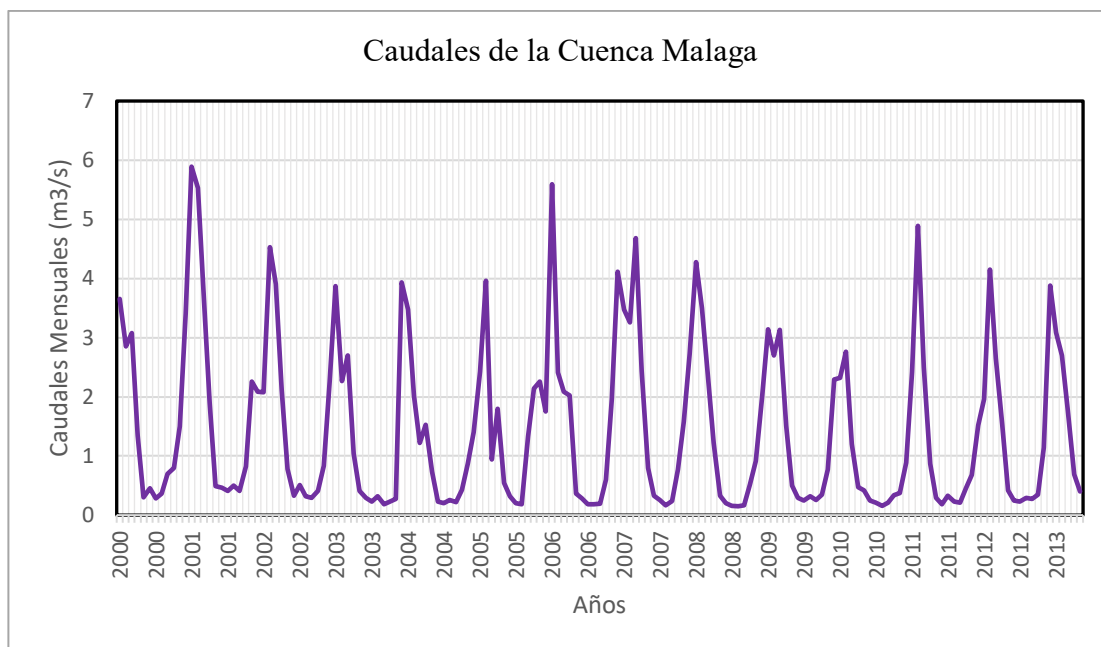


Figura 4.2 Datos de Caudal mensual de la cuenca Málaga (Modelación LHUMMS)

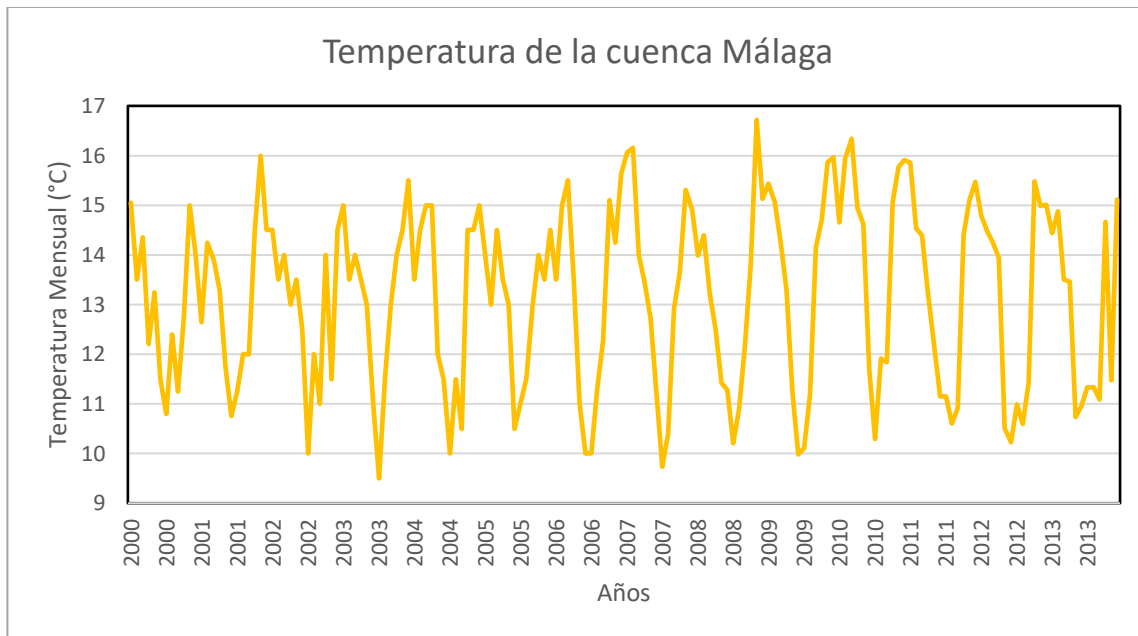


Figura 4.3 Datos de Temperatura mensual de la cuenca Málaga (SENHAMI)

4.1.2 Calibración del modelo WEAP

El proceso de calibración es el análisis de las características hidrológicas particulares asociadas a los ecosistemas que sean relevantes en la cuenca en estudio. Debido a que es una cuenca pequeña no presenta la influencia humana por lo tanto los caudales no son afectados por el uso o manejo del recurso.

En el caso de la cuenca Málaga presenta ecosistemas subtropicales en la zona que bordea el río y de alta montaña en los límites de la cuenca.

Los factores de calibración se determinan gracias a valores promedios y sus respectivos rangos existentes en tablas en el punto 2.3, cada factor está relacionado con la cobertura y tipo de suelo por lo cual se realizó y se obtuvo mapas de cobertura y textura en las cuencas de estudio con los que nos permite clasificar de una manera mejor, ordenada y fácil la cuenca de acuerdo a sus características. Es importante la revisión de la literatura existente.

En una primera aproximación se estableció factores de calibración generales para toda el área mencionada, los cuales son:

- Kc: coeficiente de cultivo
- 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

4.1.2.1 Validación

Habiendo realizado la calibración de un modelo hidrológico a continuación es indispensable realizar la validación del modelo, verificando y evaluando que el modelo, con todos sus parámetros ajustados de calibración, estén aptos para hacer predicciones en periodos fuera de la calibración.

Usualmente, la validez de modelo hidrológico para un periodo diferente al de la calibración se asume verdadera considerando condiciones futuras similares.

De esta manera, se dice que un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el periodo de validación muestran errores o límites aceptables.

4.1.2.2 Función Objetivo

Considerando que es poco probable que un modelo matemático logre describir exactamente todas las fases del comportamiento de una cuenca, se utilizaron dos funciones objetivo: el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe *ENS* y la raíz cuadrada de la varianza de los residuales *RMSE* (Wagener, Wheeler, & Gupta, 2004). El *ENS* enfatiza el desempeño del modelo durante los picos y los caudales altos, al basarse en una forma normalizada de residuales al cuadrado y medidas ordinarias de errores; considera la relación entre la sumatoria de la diferencia al cuadrado entre los valores observados en la estación hidrométrica Q_t y los valores calculados por el modelo matemático Q_i , con la sumatoria de la diferencia al cuadrado entre las observaciones Q_t y la media de la serie de observaciones Q_m . El *RMSE* evalúa la concordancia entre los valores calculados (Q_i) y los valores observados (Q_t), donde n es el número de observaciones de la serie:

$$ENS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_t - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_t - Q_m)^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_t - Q_i)^2}{n}}$$

4.1.3 Adopción de parámetros en las cuencas Muyo Qhocha y Khaspi Kancha

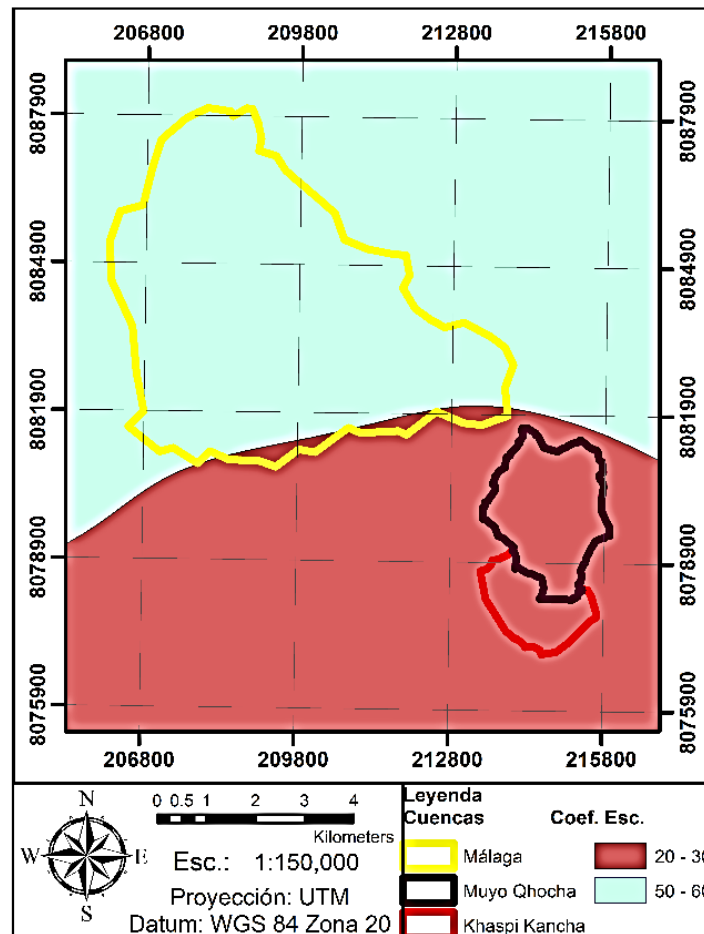
Para obtener los caudales de aporte a la presa se necesitaron los parámetros de calibración obtenidos de la calibración del modelo para la cuenca Málaga, los valores de temperatura obtenido por el método del gradiente hidráulico y velocidad del viento de la página de SENHAMI de la estación Tiraque para las cuencas Muyo Qhocha y Khaspi Kancha.

Para los datos de precipitación se hizo énfasis en la estación de Tiraque debido a que es la más cercana a las cuencas del proyecto, se encuentra en la misma ladera de la cordillera y no se cuenta con datos de precipitación medidos en las cuencas de estudio, por lo cual solamente se pudo realizar un análisis en la relación altura-precipitación para poder obtener la precipitación en las cuencas de estudio.

Debido a que la cuenca en estudio tiene una altura promedio superior a estación de Tiraque se calculó la precipitación promedio anual sobre la cuenca, en base a una relación altura-precipitación promedio anual, tomando en cuenta también otras estaciones cercanas para obtener un factor de transformación y con eso se obtuvo una precipitación promedio en las cuencas de estudio.

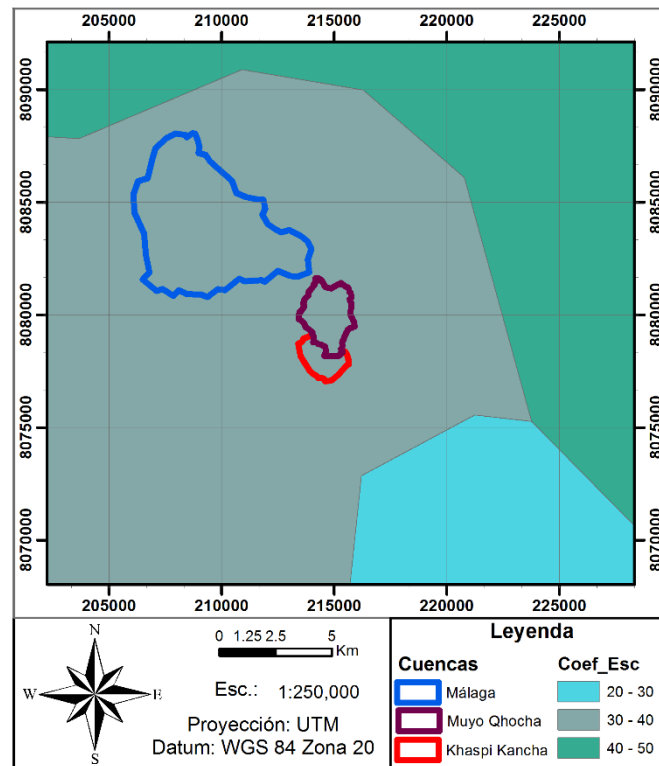
Se usaron los mapas de tipo y uso de suelo para ubicar las áreas de las distintas características en toda la superficie de las cuencas ,que junto con los datos de precipitación, temperatura velocidad del viento, superficie de las cuencas y los parámetros de calibración, validados, obtenidos del modelo hidrológico de Málaga se los puso a WEAP para realizar la corrida de las cuencas Muyo Qhochá y Khaspi Kancha , con el que se obtuvo los caudales de escurrimiento de la cuenca que aportan a sus presas.

Para asegurarnos que los caudales calculados en los modelos hidrológicos de las cuencas Muyo Qhochá y Khaspi Kancha en WEAP sean valores racionales se calculó su coeficiente de escurrimiento junto con los valores de precipitación adoptados en el modelo y se comparó con los valores obtenidos en el Balance Hídrico Superficial de Bolivia (1992 y 2016).



Mapa 4.1: Coeficiente de escurrimiento para la zona de estudio (Balance hídrico superficial de Bolivia, 1992)

Donde en el balance hídrico superficial de Bolivia de 1992 se puede observar que en la cuenca Málaga el coeficiente de escurrimiento oscila entre 50 a 60 y en las Cuencas Muyo Qhocha y Khaspi Kancha el coeficiente deberá salir entre 20 a 30.



Mapa 4.2: Coeficiente de escurrimiento para la zona de estudio (Balance hídrico superficial de Bolivia, 2016)

El balance hídrico superficial de Bolivia de 2016 las tres cuencas están en un rango entre 30 a 40, pero también las cuencas Muyo Qhocha y Khaspi Kancha se encuentran muy cercanos al rango entre 20-30.

4.1.4 Uso de datos de tipo y uso de suelo para adoptar parámetros

Los datos de uso y tipo de suelo son indispensables para la adopción de los parámetros de calibración en el modelo hidrológico de WEAP ya que cada parámetro está relacionado en la bibliografía desarrollada en la presente tesis en la descripción del modelo WEAP. Se obtienen mediante tablas que están en función del tipo y uso de suelo.

4.1.4.1 Coeficiente de cultivo Kc

El coeficiente de cultivo se lo obtiene a partir del uso de suelo donde como se muestra en el **Tabla 2.1** para cada uso de suelo existente en la cuenca se obtiene un valor de Kc

4.1.4.2 Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces S_w (mm)

En el factor de capacidad de almacenamiento del agua la tabla está en función del tipo de suelo (CRH) descrito en el Tabla 2.2 y la profundidad radicular descrito en el Tabla 2.3 que está en función del uso de suelo donde dependiendo del tipo de suelo obtenido en las cuencas de estudio se relacionó el valor de CRH y con el producto de la profundidad radicular se obtuvo el valor de SWC.

4.1.4.3 Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda D_w (mm)

La capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda se determinará como valor único para toda la cuenca de un metro (1 m)

4.1.4.4 Factor de resistencia a la escorrentía RRF

En el factor de resistencia a la escorrentía (RRF) está directamente relacionado con el “LAI” descrito en el Tabla 2.4 que está en función del uso de suelo donde también dependiendo del uso de suelo obtenido para las cuencas de estudio se lo relaciona en la tabla con el LAI y se obtiene el valor de RRF.

4.1.4.5 Conductividad en la zona de raíces RZC

El factor de la conductividad en la zona de raíces (RZC) está en función del tipo de suelo como se describe en el Tabla 2.5, donde se obtiene el valor de K_s que sería el valor del factor RZC.

4.1.4.6 Conductividad en la zona profunda K_s

La conductividad en la zona profunda se lo puede obtener del Tabla 2.6 que está en función del tipo de suelo presente en la cuenca.

4.1.4.7 Dirección preferencial de flujo f

La dirección preferencial de flujo se lo obtiene en función de la altura de la cuenca:

Para rangos de elevación menores a 3000 msnm, con excepción de sitios con cobertura de uso agrícola, donde se asume pendientes topográficas menores que coadyuvan a la mayor escorrentía en sentido vertical, se asume valores de 0.15

Para rangos de elevación mayores a 3000 msnm, asumiendo que las mayores pendientes topográficas coadyuvan a la mayor escorrentía superficial (menor aporte a los reservorios subsuperficiales, se asume valores de 0.3

4.2 CALIBRACIÓN DEL WEAP EN LA CUENCA MÁLAGA

La calibración del modelo hidrológico en WEAP de la cuenca Málaga se lo realizó con los valores de precipitación, temperatura, velocidad del viento de la página de SENHAMI, de la estación Málaga 3200 y el caudal para la calibración obtenido de la modelación hecha por el LHUMMS, el área y el límite de la cuenca se obtuvo con el DEM descargado de Geo Bolivia.

Primeramente, se trabajó con los valores promedios de los parámetros calibración obtenidos en las tablas descritas en el punto 2.3.

Se fueron cambiando los valores de todos los parámetros en los rangos descritos en la bibliografía hasta que se concluyó que los valores de SWC, RRF y RZC fueron los parámetros que tenían mayor sensibilidad en la calibración del modelo de la cuenca, también corroborado del Análisis de sensibilidad hecho por el LHUMSS para el balance hídrico de Bolivia.

Posteriormente se trabajó con los tres parámetros encontrados con mayor sensibilidad SWC, RRF y RZC. Se realizó el proceso de calibración, en el modelo de WEAP, iterando los tres parámetros hasta encontrar los valores óptimos para que los caudales calculados sean bastante similares a los medidos, también se corrobora la calibración con las funciones objetivos ENS y RMSE.

4.2.1 Resultados de la Calibración

El objetivo fue tratar de igualar los caudales calculados en el modelo hidrológico de WEAP con los caudales medidos de la cuenca. Para lo cual se recurrió al método grafico realizado en WEAP, cambiando los parámetros de calibración hasta aproximar lo más posible los caudales calculados con los medidos, pero también era necesario realizar un método cuantitativo por lo cual se utilizó las funciones objetivas ENS y RMSE que nos permitió evaluar el sistema desarrollado calculando sus coeficientes de eficiencia en Excel.

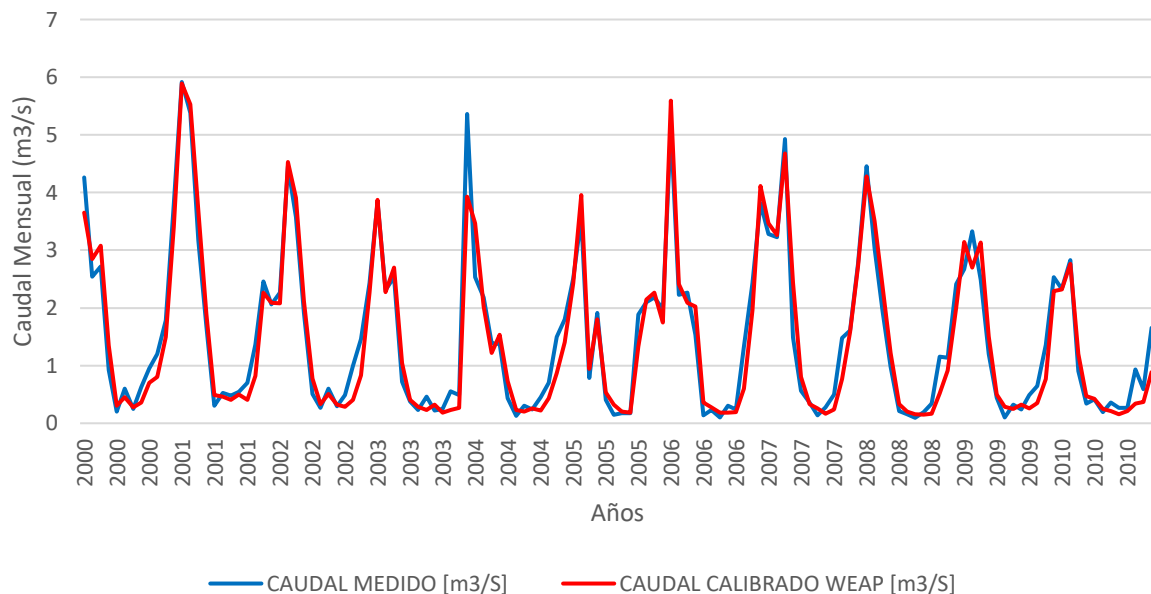


Figura 4.4: Resultado final de la calibración de WEAP en la cuenca Málaga de todos los años.

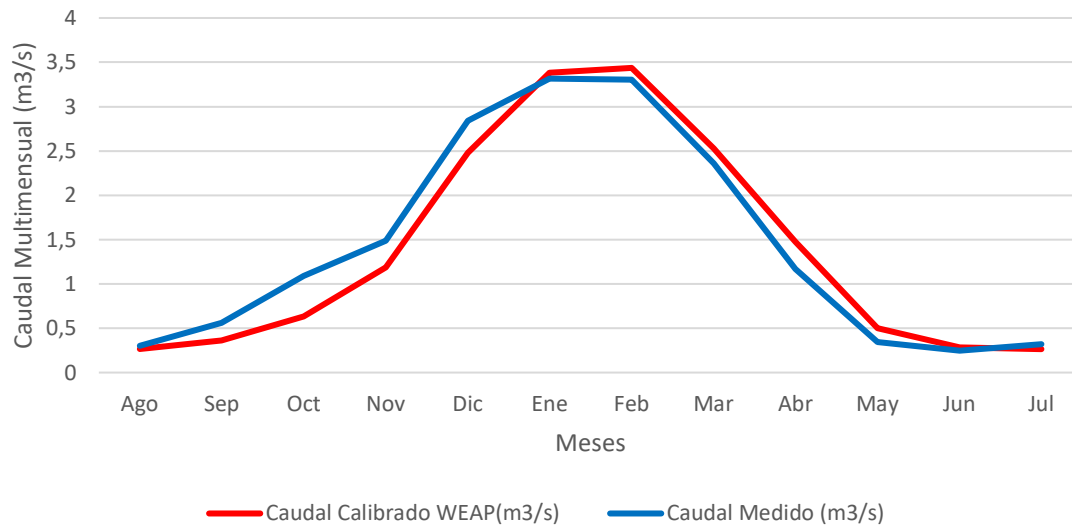


Figura 4.5: Resultado final de la calibración de WEAP en la cuenca Málaga, Promedio multimensual.

Después de los procesos de iteración se llegaron a los parámetros mostrados en la siguiente tabla y se calcularon los coeficientes de eficiencia de NSE igual a 0.94 y RMSE de 0.32 que son cifras excelentes para una calibración hidrológica.

En el Tabla 4.1 se presentarán los parámetros tomados inicialmente que son los valores promedios obtenidos de las tablas de estimación de parámetros de WEAP, que son los valores de partida para la calibración, y también los valores finales de los parámetros ya calibrados, así para poder ver cómo nos guió la calibración para obtener el valor de los parámetros.

Tabla 4.1: Tabla comparativo de valores iniciales adoptados y los valores finales de los parámetros calibrados.

Cobertura	Textura	Valores Iniciales			Valores Calibrados		
		SWC	RRF	RZC	SWC	RRF	RZC
Sin Vegetación	Arcillo arenosa	90	1.710	30.24	90	1.368	30.24
	Arcillo limosa	130	1.710	21.6	130	1.368	21.60
	Arena francosa	90	1.710	1025.28	90	1.368	1025.28
	Franco	140	1.710	70.56	140	1.368	70.56
	Franco arcillo arenoso	130	1.710	64.8	130	1.368	64.80
	Franco arenoso	120	1.710	239.04	120	1.368	239.04
	Franco limoso	150	1.710	27.36	150	1.368	27.36

Poca Vegetación	<i>Arcillo arenosa</i>	90	2.080	30.24	90	1.456	30.24
	<i>Arcillo limosa</i>	130	2.080	21.6	130	1.456	21.60
	<i>Arena francosa</i>	90	2.080	1025.28	90	1.456	1025.28
	<i>Franco</i>	140	2.080	70.56	140	1.456	70.56
	<i>Franco arcillo arenoso</i>	130	2.080	64.8	130	1.456	64.80
	<i>Franco arenoso</i>	120	2.080	239.04	120	1.456	239.04
	<i>Franco limoso</i>	150	2.080	27.36	150	1.456	27.36
Vegetación poca Densa	<i>Arcillo arenosa</i>	90	6.340	30.24	90	5.072	30.24
	<i>Arcillo limosa</i>	130	6.340	21.6	130	5.072	21.60
	<i>Arena francosa</i>	90	6.340	1025.28	90	5.072	1025.28
	<i>Franco</i>	140	6.340	70.56	140	5.072	70.56
	<i>Franco arcillo arenoso</i>	130	6.340	64.8	130	5.072	64.80
	<i>Franco arenoso</i>	120	6.340	239.04	120	5.072	239.04
	<i>Franco limoso</i>	150	6.340	27.36	150	5.072	27.36
Buena Cobertura Vegetal	<i>Arcillo arenosa</i>	90	8.720	30.24	135	8.72	30.24
	<i>Arcillo limosa</i>	130	8.720	21.6	195	8.72	21.60
	<i>Arena francosa</i>	90	8.720	1025.28	135	8.72	1025.28
	<i>Franco</i>	140	8.720	70.56	210	8.72	70.56
	<i>Franco arcillo arenoso</i>	130	8.720	64.8	195	8.72	64.80
	<i>Franco arenoso</i>	120	8.720	239.04	180	8.72	239.04
	<i>Franco limoso</i>	150	8.720	27.36	225	8.72	27.36

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros finales adoptados para la calibración de la cuenca Málaga se presentan en el Tabla 4.2 que presenta el área total de cada cobertura, el área parcial de las distintas texturas del suelo presentes en las distintas coberturas y los valores finales de los parámetros calibrados.

Tabla 4.2 Parámetros adoptados en la calibración de la cuenca Málaga.

Cobertura	Área (Km²)	Textura	Área (Km²)	SWC	RRF	RZC
Sin Vegetación	5.61	<i>Arcillo arenosa</i>	0.110	90	1.368	30.24
		<i>Arcillo limosa</i>	0.071	130	1.368	21.60
		<i>Arena francosa</i>	0.830	90	1.368	1025.28
		<i>Franco</i>	2.007	140	1.368	70.56
		<i>Franco arcillo arenoso</i>	0.575	130	1.368	64.80

		<i>Franco arenoso</i>	1.258	120	1.368	239.04
		<i>Franco limoso</i>	0.761	150	1.368	27.36
		<i>Arcillo arenosa</i>	1.274	90	1.456	30.24
		<i>Arcillo limosa</i>	1.238	130	1.456	21.60
		<i>Arena francosa</i>	1.589	90	1.456	1025.28
<i>Poca Vegetación</i>	23.65	<i>Franco</i>	3.690	140	1.456	70.56
		<i>Franco arcillo arenoso</i>	4.935	130	1.456	64.80
		<i>Franco arenoso</i>	5.953	120	1.456	239.04
		<i>Franco limoso</i>	4.969	150	1.456	27.36
		<i>Arcillo arenosa</i>	0.201	90	5.072	30.24
		<i>Arcillo limosa</i>	0.917	130	5.072	21.60
		<i>Arena francosa</i>	0.013	90	5.072	1025.28
<i>Vegetación poca Densa</i>	4.46	<i>Franco</i>	0.067	140	5.072	70.56
		<i>Franco arcillo arenoso</i>	1.297	130	5.072	64.80
		<i>Franco arenoso</i>	0.721	120	5.072	239.04
		<i>Franco limoso</i>	1.243	150	5.072	27.36
		<i>Arcillo arenosa</i>	0.000	135	8.720	30.24
		<i>Arcillo limosa</i>	0.101	195	8.720	21.60
		<i>Arena francosa</i>	0.000	135	8.720	1025.28
<i>Buena Cobertura Vegetal</i>	0.23	<i>Franco</i>	0.004	210	8.720	70.56
		<i>Franco arcillo arenoso</i>	0.043	195	8.720	64.80
		<i>Franco arenoso</i>	0.012	180	8.720	239.04
		<i>Franco limoso</i>	0.066	225	8.720	27.36

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Validación del modelo hidrológico WEAP de la cuenca Málaga

El periodo de validación se lo realizó en los años 2011, 2012 y los cinco primeros meses del 2013 obteniendo buenos resultados con los coeficientes de Nash igual a 0.95 y el RMSE de 1.27 que son valores excelentes para su validación.

En la Figura 4.6 se puede observar que los caudales medidos y los calculados, gráficamente, son muy similares por lo cual también se obtuvo buenos valores de los coeficientes de Nash y el RMSE.

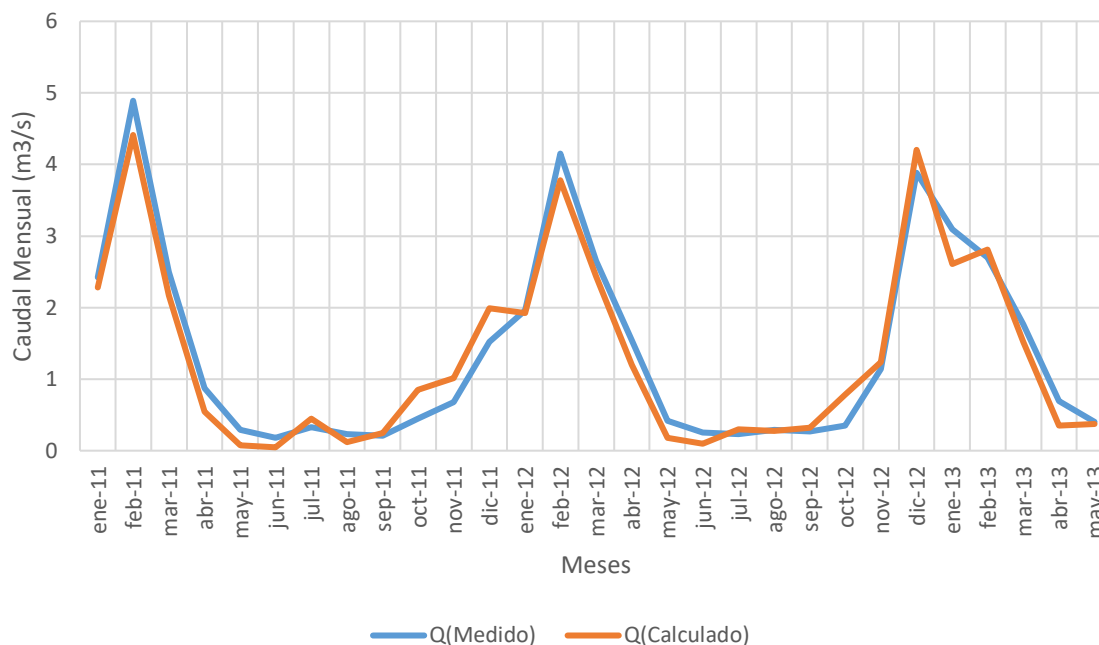


Figura 4.6: Resultado de la validación del modelo de WEAP en la cuenca Málaga.

4.3 ADOPCIÓN DE PARÁMETROS Y CÁLCULO DEL CAUDAL DE APOORTE CON WEAP.

Para el cálculo del caudal de aporte a las presas de Muyo Qhocha y Khaspi Kancha se realizó la modelación hidrológica en WEAP en el que se cargaron todos los datos de precipitación, temperatura, velocidad del viento obtenidos de la página de SENHAMI; las superficies de las cuencas del DEM obtenidos de la página de Geo Bolivia y los parámetros de calibración iniciales adoptados para la cuenca Málaga en el WEAP

En la modelación se obtuvo los valores de caudales de aporte a las presas. Para asegurarse de haber obtenido valores aceptables se calculó el coeficiente de escurrimiento con los caudales calculados en el modelo, los valores de precipitación y la superficie de las cuencas, pero se pudo observar que el coeficiente de escurrimiento obtenido fue de 0.4 que se considera alto para la zona como se puede observar en los Mapas 4.1 y 4.2.

El coeficiente de escurrimiento debe variar entre 0.3 a 0.4 según el balance hídrico superficial de Bolivia de 2016 pero se aproxima bastante en el rango de 0.2 a 0.3, en el que se encuentra en el balance de 1992, por lo cual se considera un valor elevado para ese tipo de cuencas por lo cual se realizó otros cambios a los parámetros de calibración en las cuencas de Muyo Qhocha y Khaspi Kancha, variando los parámetros, dentro de los límites establecidos en las tablas de obtención de valores para cada parámetro. Los parámetros iniciales adoptados de la cuenca Málaga y los parámetros finales después de realizar los cambios se presentan en

la Tabla 4.3, finalmente se obtuvo un coeficiente de escurrimiento de 0.28 que es aceptable para el lugar.

Tabla 4.3: Tabla comparativo de valores iniciales adoptados de la cuenca Málaga y los valores finales adoptados para las cuencas Muyo Qhocha y Khaspi Kancha.

Cobertura	Textura	Valores Iniciales			Valores Finales		
		SWC	RRF	RZC	SWC	RRF	RZC
Sin Vegetación	<i>Arcillo arenosa</i>	90	1.368	30.240	90	2.840	24.768
	<i>Arcillo limosa</i>	130	1.368	21.600	130	2.840	22.464
	<i>Arena francosa</i>	90	1.368	1025.280	90	2.840	759.168
	<i>Franco</i>	140	1.368	70.560	140	2.840	28.224
	<i>Franco arcillo arenoso</i>	130	1.368	64.800	130	2.840	47.232
	<i>Franco arenoso</i>	120	1.368	239.040	120	2.840	172.224
	<i>Franco limoso</i>	150	1.368	27.360	150	2.840	24.768
Poca Vegetación	<i>Arcillo arenosa</i>	90	1.456	30.240	90	6.000	24.768
	<i>Arcillo limosa</i>	130	1.456	21.600	130	6.000	22.464
	<i>Arena francosa</i>	90	1.456	1025.280	90	6.000	759.168
	<i>Franco</i>	140	1.456	70.560	140	6.000	28.224
	<i>Franco arcillo arenoso</i>	130	1.456	64.800	130	6.000	47.232
	<i>Franco arenoso</i>	120	1.456	239.040	120	6.000	172.224
	<i>Franco limoso</i>	150	1.456	27.360	150	6.000	24.768
Vegetación poca Densa	<i>Arcillo arenosa</i>	90	5.072	30.240	90	8.400	24.768
	<i>Arcillo limosa</i>	130	5.072	21.600	130	8.400	22.464
	<i>Arena francosa</i>	90	5.072	1025.280	90	8.400	759.168
	<i>Franco</i>	140	5.072	70.560	140	8.400	28.224
	<i>Franco arcillo arenoso</i>	130	5.072	64.800	130	8.400	47.232
	<i>Franco arenoso</i>	120	5.072	239.040	120	8.400	172.224
	<i>Franco limoso</i>	150	5.072	27.360	150	8.400	24.768
Buena Cobertura Vegetal	<i>Arcillo arenosa</i>	135	8.720	30.240	90	18.000	24.768
	<i>Arcillo limosa</i>	195	8.720	21.600	130	18.000	22.464
	<i>Arena francosa</i>	135	8.720	1025.280	90	18.000	759.168
	<i>Franco</i>	210	8.720	70.560	140	18.000	28.224
	<i>Franco arcillo arenoso</i>	195	8.720	64.800	130	18.000	47.232
	<i>Franco arenoso</i>	180	8.720	239.040	120	18.000	172.224
	<i>Franco limoso</i>	225	8.720	27.360	150	18.000	24.768

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Tabla 4.3 que el Factor de Resistencia a la Escorrentía (RRF) aumentó esto debido a que las cuencas Muyo Qhocha y Khaspi Kancha son cuencas pequeñas, de altura considerable y pendientes bajas, donde no presenta mucha cobertura vegetal debido a sus bajas temperaturas; la Conductividad en la Zona Radicular (RZC) disminuyó debido a la falta de vegetación existente en las cuencas lo que disminuye el flujo en la zona de raíces.

Finalmente, después de realizar los cambios en los parámetros para obtener un coeficiente de escurrimiento aceptable, según los mapas de coeficiente de escurrimiento del Balance Hídrico superficial de Bolivia de 1992 y 2016, que fue de 0.28 se llegaron a los siguientes valores de los parámetros de calibración para las cuencas Muyo Qhocha y Khaspy Kancha:

Tabla 4.4: Parámetros adoptados en la cuenca Muyo Qhocha.

Cobertura	Área Km2	Textura	Área Km2	SWC	RRF	RZC
Sin Vegetación	2.6245	<i>Arcillo arenosa</i>	0.2685	90	2.84	24.768
		<i>Arcillo limosa</i>	0.0326	130	2.84	22.464
		<i>Arena francosa</i>	0.5292	90	2.84	759.168
		<i>Franco</i>	0.3212	140	2.84	28.224
		<i>Franco arcillo arenoso</i>	0.5614	130	2.84	47.232
		<i>Franco arenoso</i>	0.3780	120	2.84	172.224
		<i>Franco limoso</i>	0.5336	150	2.84	24.768
Poca Vegetación	2.5345	<i>Arcillo arenosa</i>	0.4683	90	6.00	24.768
		<i>Arcillo limosa</i>	0.5105	130	6.00	22.464
		<i>Arena francosa</i>	0.1340	90	6.00	759.168
		<i>Franco</i>	0.1904	140	6.00	28.224
		<i>Franco arcillo arenoso</i>	0.4046	130	6.00	47.232
		<i>Franco arenoso</i>	0.2963	120	6.00	172.224
		<i>Franco limoso</i>	0.5303	150	6.00	24.768
Vegetación poca Densa	0.2198	<i>Arcillo arenosa</i>	0.0270	90	8.40	24.768
		<i>Arcillo limosa</i>	0.1311	130	8.40	22.464
		<i>Arena francosa</i>	0.0089	90	8.40	759.168
		<i>Franco</i>	0.0061	140	8.40	28.224
		<i>Franco arcillo arenoso</i>	0.0191	130	8.40	47.232
		<i>Franco arenoso</i>	0.0054	120	8.40	172.224
		<i>Franco limoso</i>	0.0221	150	8.40	24.768
Buena Vegetación	0.0293	<i>Arcillo arenosa</i>	0.0000	90	18.00	24.768
		<i>Arcillo limosa</i>	0.0263	130	18.00	22.464
		<i>Arena francosa</i>	0.0000	90	18.00	759.168

<i>Franco</i>	0.0000	140	18.00	28.224
<i>Franco arcillo arenoso</i>	0.0001	130	18.00	47.232
<i>Franco arenoso</i>	0.0000	120	18.00	172.224
<i>Franco limoso</i>	0.0029	150	18.00	24.768

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.5 Parámetros adoptados en la cuenca Khaspi Kancha.

Cobertura	Área Km2	Textura	Área Km2	SWC	RRF	RZC
<i>Sin Vegetación</i>	<i>1.6517</i>	<i>Arcillo arenosa</i>	0.0628	90	2.84	24.768
		<i>Arcillo limosa</i>	0.0172	130	2.84	22.464
		<i>Arena francosa</i>	0.0000	90	2.84	759.168
		<i>Franco</i>	0.4423	140	2.84	28.224
		<i>Franco arcillo arenoso</i>	0.4304	130	2.84	47.232
		<i>Franco arenoso</i>	0.2134	120	2.84	172.224
		<i>Franco limoso</i>	0.4855	150	2.84	24.768
<i>Poca Vegetación</i>	<i>0.7127</i>	<i>Arcillo arenosa</i>	0.0425	90	6.00	24.768
		<i>Arcillo limosa</i>	0.1232	130	6.00	22.464
		<i>Arena francosa</i>	0.0000	90	6.00	759.168
		<i>Franco</i>	0.0813	140	6.00	28.224
		<i>Franco arcillo arenoso</i>	0.0923	130	6.00	47.232
		<i>Franco arenoso</i>	0.0189	120	6.00	172.224
		<i>Franco limoso</i>	0.3545	150	6.00	24.768
<i>Vegetación poca Densa</i>	<i>0.0621</i>	<i>Arcillo arenosa</i>	0.0038	90	8.40	24.768
		<i>Arcillo limosa</i>	0.0249	130	8.40	22.464
		<i>Arena francosa</i>	0.0000	90	8.40	759.168
		<i>Franco</i>	0.0186	140	8.40	28.224
		<i>Franco arcillo arenoso</i>	0.0004	130	8.40	47.232
		<i>Franco arenoso</i>	0.0000	120	8.40	172.224
		<i>Franco limoso</i>	0.0144	150	8.40	24.768
<i>Buena Vegetación</i>	<i>0.0095</i>	<i>Arcillo arenosa</i>	0.0000	90	18.00	24.768
		<i>Arcillo limosa</i>	0.0028	130	18.00	22.464
		<i>Arena francosa</i>	0.0000	90	18.00	759.168
		<i>Franco</i>	0.0067	140	18.00	28.224
		<i>Franco arcillo arenoso</i>	0.0000	130	18.00	47.232

<i>Franco arenoso</i>	0.0000	120	18.00	172.224
<i>Franco limoso</i>	0.0000	150	18.00	24.768

Fuente: Elaboración propia

4.3.1 Obtención de caudales de aporte al embalse Muyo Qhocha

Se procedió a cargar todos los datos de la cuenca Muyo Qhocha a su modelo hidrológico en WEAP y realizar los cambios en los parámetros de calibración para acercarse al Coeficiente de Escurrimiento encontrado en los Balance hídrico superficial de Bolivia de 1992 y 2016 se hizo correr el programa y se obtuvieron los siguientes caudales mostrados en el Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Caudales de aporte (l/s) de la cuenca Muyo Qhocha al embalse.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
2000	32.9	191.6	65.0	22.5	17.2	17.0	16.2	15.9	16.0	15.0	17.1	34.4	38.4
2001	45.0	38.8	105.3	20.4	17.0	18.4	16.7	16.3	16.1	15.2	15.9	26.0	29.2
2002	140.3	149.0	58.3	21.1	18.5	18.5	17.2	16.7	17.1	16.2	18.7	21.9	42.8
2003	20.7	59.9	47.4	21.6	17.1	16.7	17.4	16.1	16.3	16.0	15.4	280.7	45.4
2004	331.6	52.7	34.3	22.5	19.4	19.2	18.0	17.4	17.4	16.6	23.0	34.9	50.6
2005	131.8	177.2	24.6	20.1	18.8	18.7	17.8	17.1	28.9	19.8	39.7	29.2	45.3
2006	269.7	243.6	25.0	23.3	20.9	20.5	19.1	18.5	18.9	18.0	25.4	53.6	63.0
2007	158.2	43.7	90.8	35.3	21.5	20.8	19.3	18.6	19.5	18.6	21.8	40.2	42.4
2008	54.6	126.4	52.5	30.3	20.9	20.1	18.6	18.0	18.0	17.9	17.5	47.5	36.9
2009	173.1	91.3	43.0	29.1	20.4	19.9	18.5	18.1	18.0	16.8	16.7	20.7	40.5
2010	79.5	57.5	50.6	31.2	19.7	18.4	17.0	16.5	16.8	15.6	15.8	35.3	31.2
2011	63.9	84.0	39.4	19.1	17.1	17.0	17.4	16.0	16.0	15.3	16.4	16.7	28.2
2012	31.4	433.4	103.9	22.4	18.4	18.2	17.7	16.8	16.6	15.7	16.8	35.2	62.2
2013	50.2	150.2	52.9	24.1	18.3	17.9	16.7	16.2	16.1	15.1	15.1	14.2	33.9
Prom	113.1	135.7	56.6	24.5	18.9	18.7	17.7	17.0	18.0	16.5	19.7	49.3	42.1

Fuente: Weater Evaluation And Planning (WEAP)

4.4 USO DE LA HERRAMIENTA GMET EN EL MODELO HIDROLÓGICO DE LAS CUENCAS MUYO QHOCHA Y KHASPI KANCHA EN WEAP

En 2017, el Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia (MMAyA) solicitó el desarrollo del estudio "Balance Hídrico de Bolivia (BHB) 1980-2016". Liderado por el Instituto Medioambiental de Estocolmo (SEI) y con el apoyo de socios académicos nacionales, este proyecto desarrolló un enfoque estandarizado para la determinación de balances hídricos para las subcuencas de Bolivia, basados en la plataforma "Water Evaluation and Planning (WEAP)".

Durante el desarrollo del BHB, el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de los Estados Unidos (NCAR) y el SEI desarrollaron grillas de precipitación y temperatura a nivel

diario, basadas en observaciones en tierra para el periodo 1980-2016 para Bolivia y regiones fronterizas con los países vecinos (Peru, Brazil, Paraguay, Argentina y Chile).

Debido a la alta demanda en el uso de la herramienta GMET que se le está dando en la actualidad, también se aprovechó la malla de Precipitación y Temperatura en este proyecto para observar su comportamiento y las diferencias o similitudes que tendrá con los resultados obtenidos en esta modelación propia en WEAP.

4.4.1 Comparación de resultados de caudal hechas a partir de la malla de GMET y los datos obtenidos de SENHAMI en WEAP

Para la obtención de caudales de aporte a la presa Muyo Qhochá se realizó la modelación en WEAP con datos obtenidos de SENHAMI y los parámetros de calibración obtenidas anteriormente en el presente proyecto.

Se realizó una segunda modelación usando los datos de la malla GMET y los mismos parámetros de calibración usados anteriormente. A continuación, se presentarán los caudales obtenidos en las distintas modelaciones hidrológicas:

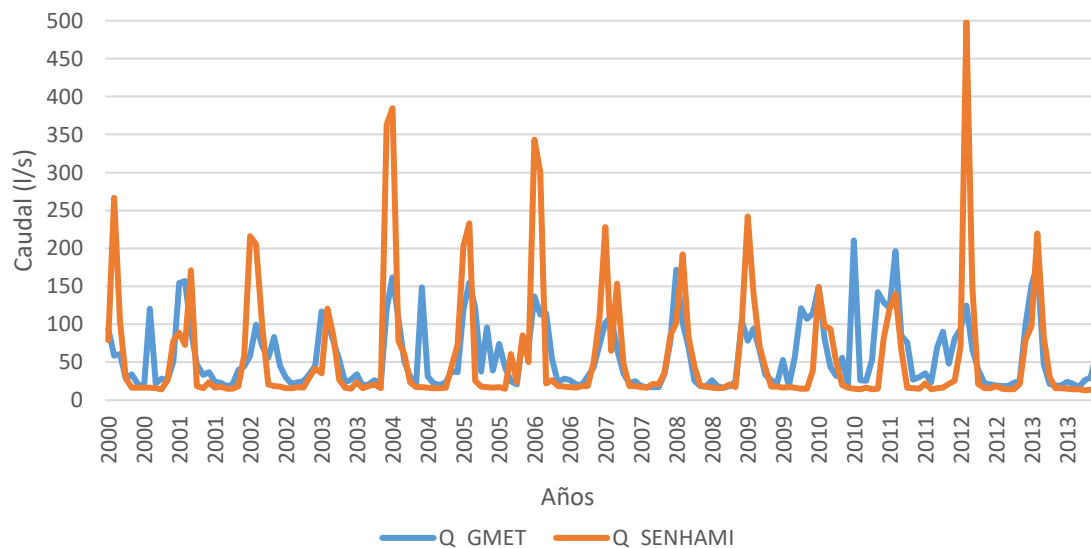


Figura 4.7: Comparación de caudales de las modelaciones hechas con GMET y SENHAMI en WEAP

Se puede observar en la figura que los caudales obtenidos por el modelo hecho con la malla de GMET son más bajas en comparación de los caudales obtenidos por el modelo hecho por los datos de SENHAMI, además se presentan una elevación de los caudales en algunos años en épocas de estiaje.

Debido a las elevaciones incongruentes en la obtención de datos de caudal en épocas de estiaje se realizó una comparación de los datos de precipitación adoptados de la malla de GMET y de SENHAMI en los modelos.

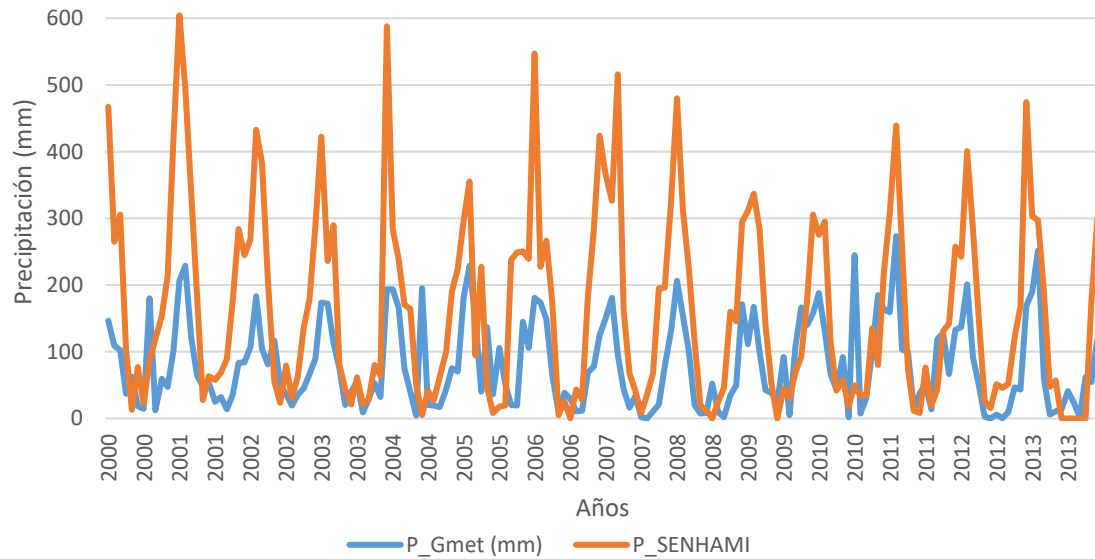


Figura 4.8: Comparación de precipitaciones adoptadas en las modelaciones hechas con GMET y SENHAMI en WEAP

Como se puede observar en la figura 4.8 las precipitaciones de GMET son más bajas en comparación de SENHAMI, además que presenta algunos picos de precipitaciones en épocas de estiaje, por lo que se da a entender que la malla del GMET no presenta datos muy confiables de precipitación y no es aconsejable usarlo sin antes verificarlos con datos reales medidos en las estaciones hidrológicas.

Debido a estos errores encontrados no se continuará con el uso de la malla de GMET.

5 CALIBRACIÓN Y USO DE LOS MODELOS CRAWFORD Y CHAC PARA OBTENCIÓN DEL CAUDAL DE APOORTE DE LA CUENCA MÁLAGA

5.1 INTRODUCCIÓN

Se realizó una calibración de la cuenca Málaga con los modelos hidrológicos Crawford y CHAC para tener una fuente de comparación con el modelo WEAP. Para la calibración de ambos modelos son necesarios la precipitación, la evapotranspiración potencial y el escurrimiento, que son los volúmenes que salen de la cuenca durante el intervalo de análisis que es de un mes.

5.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO DE CRAWFORD

5.2.1 Estimación Inicial de los Parámetros

5.2.1.1 Capacidad de almacenamiento del suelo (CS)

Este parámetro será designado como CS y corresponde al nivel de almacenamiento de humedad en el suelo, el cual permite que cualquier balance positivo mensual salga de la cuenca como humedad en exceso, pudiendo ser escurrimiento directo o gasto base. La humedad en el suelo variará y podrá ser mayor o menor que CS, cuando es menor, la mayor parte de un balance positivo es retenido como humedad en el suelo y cuando la humedad en el suelo es mayor que CS, la cantidad de balance positivo produce escurrimiento directo y/o aumento del almacenamiento del agua subterránea. El balance mensual es la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración actual o real de manera que será positivo en la época de lluvias y negativo en la época seca.

En resumen, CS es el parámetro que controla el volumen de escurrimiento, con un incremento de CS decrece el escurrimiento y viceversa, La evapotranspiración actual (ETA) se incrementa cuando CS es incrementado. Teniendo en cuenta las consideraciones de Soria (2016), Tablas 2.2 y 2.3, sobre la capacidad de las diferentes texturas de suelos y tipos de vegetación inducida o natural, se considera con fines prácticos que CS puede variar entre 10 a 400 mm.

5.2.1.2 Proporción del Exceso de Humedad que Recarga el Agua Subterránea (PSUB)

Cuando los suelos de baja permeabilidad, se presentan bajas capacidades de infiltración y el escurrimiento es principalmente directo o superficial, de manera que el gasto base es reducido o nulo. Cuando los suelos tienen alta capacidad de infiltración los gastos bases son grandes y en tales cuencas PSUB podrá llegar a valer 0.80, en cambio, en cuencas con suelos de baja permeabilidad o de poco espesor, tendrá un valor de 0.30; recomendándose un valor medio de 0.60.

5.2.1.3 Porcentaje que del Almacenamiento de Agua Subterránea da origen al Gasto Base (GAS)

Con respecto al parámetro GAS su valor medio es de 0.50, alcanzando una magnitud de 0.90 en cuencas que tiene reducido gasto base y puede decrecer hasta 0.20 en cuencas que tienen gastos bases considerables. En general PSUB y GAS controlan el gasto base entre tormentas, de manera que el valor de GAS se puede evaluar durante un periodo que no haya ocurrido lluvia dividiendo el valor escurrido de un mes entre el correspondiente al mes anterior y restando tal cociente a uno.

5.2.1.4 Humedad Inicial en (mm)

En cuencas con precipitación uniforme a través del año, el almacenamiento inicial de humedad en el suelo será igual a CS. Si la precipitación es estacional y los cálculos inician en la estación seca, los almacenamientos deben ser bajos pudiéndose asignar magnitudes del orden del 10 y 5% de CS. Si los cálculos comienzan en la época húmeda, el almacenamiento inicial de humedad de 125% de CS.

5.2.1.5 Almacenamiento inicial de agua subterránea en (mm)

Para el almacenamiento inicial de agua subterránea es similar al de la humedad inicial. En cuencas con precipitación uniforme a través del año, el almacenamiento inicial de agua subterránea será en el orden de 20% de CS. Si la precipitación es estacional y los cálculos inician en la estación seca, los almacenamientos deben ser bajos pudiéndose asignar magnitudes del orden del 10 y 5% de CS. Si los cálculos comienzan en la época húmeda, el almacenamiento inicial de agua subterránea será de 40% de CS.

5.2.2 Análisis de sensibilidad de los parámetros

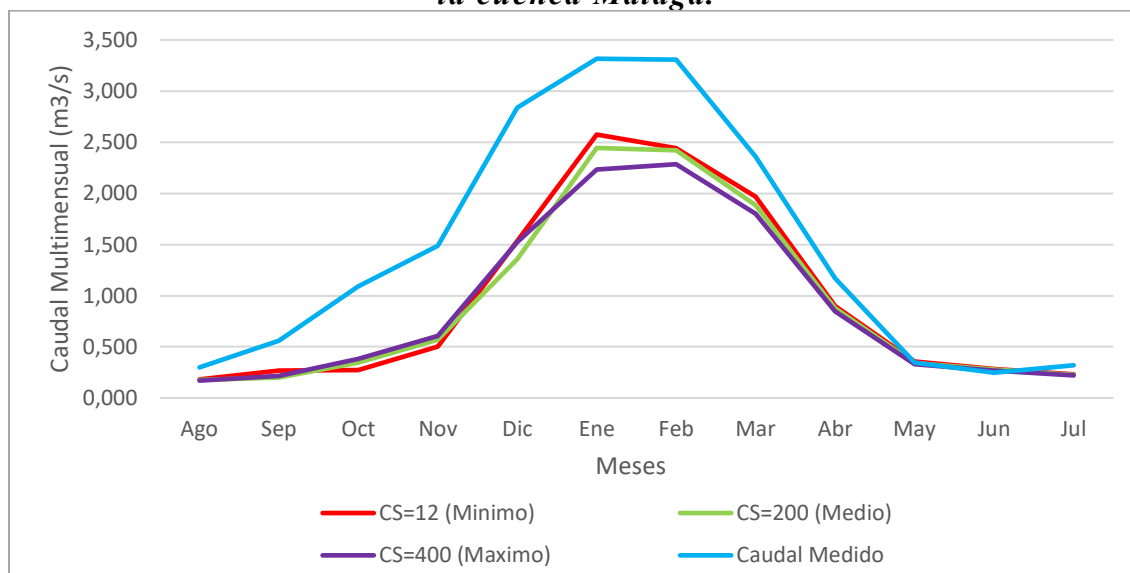
Se realizó un análisis de sensibilidad con los parámetros de calibración en el modelo hidrológico Crawford, haciendo correr el modelo con sus valores, máximos, medios y mínimos de cada parámetro y se realizó una comparación entre los caudales obtenidos en la corrida con estos valores y los caudales medidos en la cuenca. Cabe destacar que los valores son dependientes entre sí, por lo que existirán numerosos valores para todos los valores de los parámetros posibles por lo que se realizó el análisis de sensibilidad de cada parámetro, con los demás parámetros con su valor promedio respectivo.

El análisis de sensibilidad se realizó con los valores máximos, mínimos y sus respectivos valores medios que se puede adoptar para cada parámetro como se especifica en la estimación de parámetros descrita en el anterior punto.

5.2.2.1 Capacidad de almacenamiento del suelo (CS)

Se puede observar en la Figura 5.1 que el parámetro CS afecta a los caudales más considerablemente en los meses de lluvia y de menor forma en los meses de estiaje. La cuenca presenta una sensibilidad media a este parámetro.

Figura 5.1: Análisis de Sensibilidad del parámetro “CS” del modelo Crawford de la cuenca Málaga.

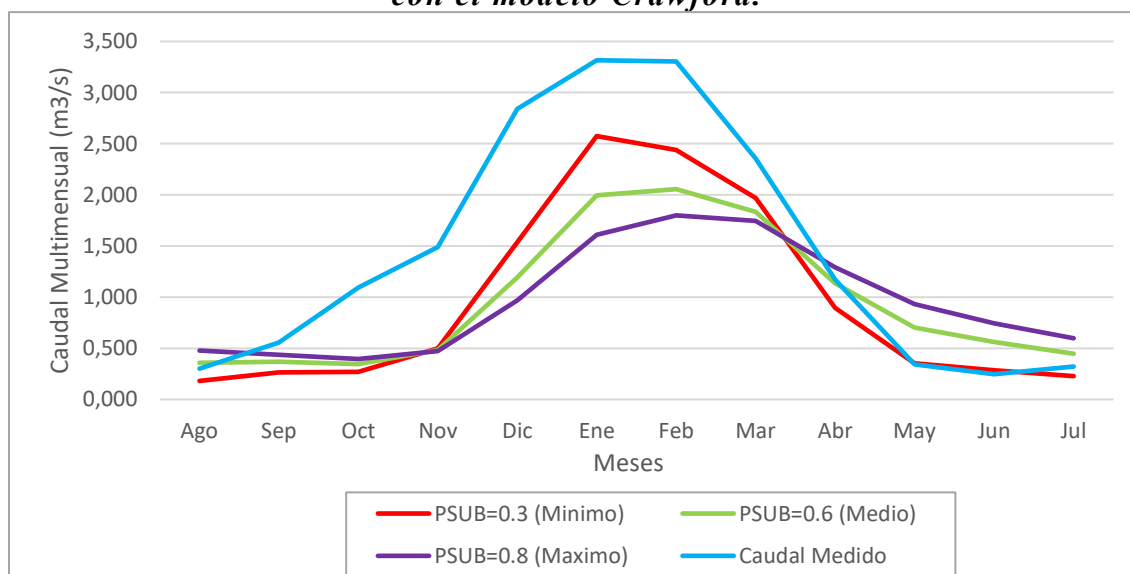


Fuente: Elaboración Propia

5.2.2.2 Proporción del Exceso de Humedad que Recarga el Agua Subterránea (PSUB)

Se puede observar en la Figura 5.2 que el parámetro PSUB afecta, muy considerablemente en todos los meses, a los caudales obtenidos en la corrida del modelo. La cuenca presenta una sensibilidad bastante alta a este parámetro.

Figura 5.2: Análisis de Sensibilidad del parámetro “PSUB” en la cuenca Málaga con el modelo Crawford.

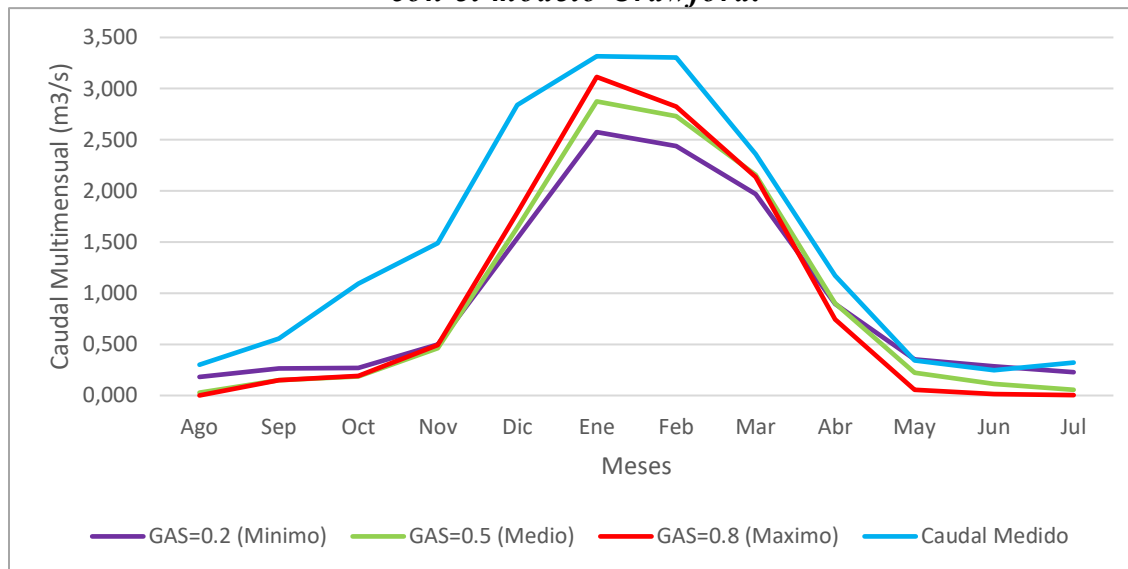


Fuente: Elaboración Propia

5.2.2.3 Porcentaje que del Almacenamiento de Agua Subterránea da origen al Gasto Base (GAS)

Se puede observar en la Figura 5.3 que el parámetro GAS afecta a los caudales, considerablemente en todos los meses, a los caudales obtenidos en la corrida. La cuenca presenta una sensibilidad alta a este parámetro.

Figura 5.3: Análisis de Sensibilidad del parámetro “GAS” en la cuenca Málaga con el modelo Crawford.

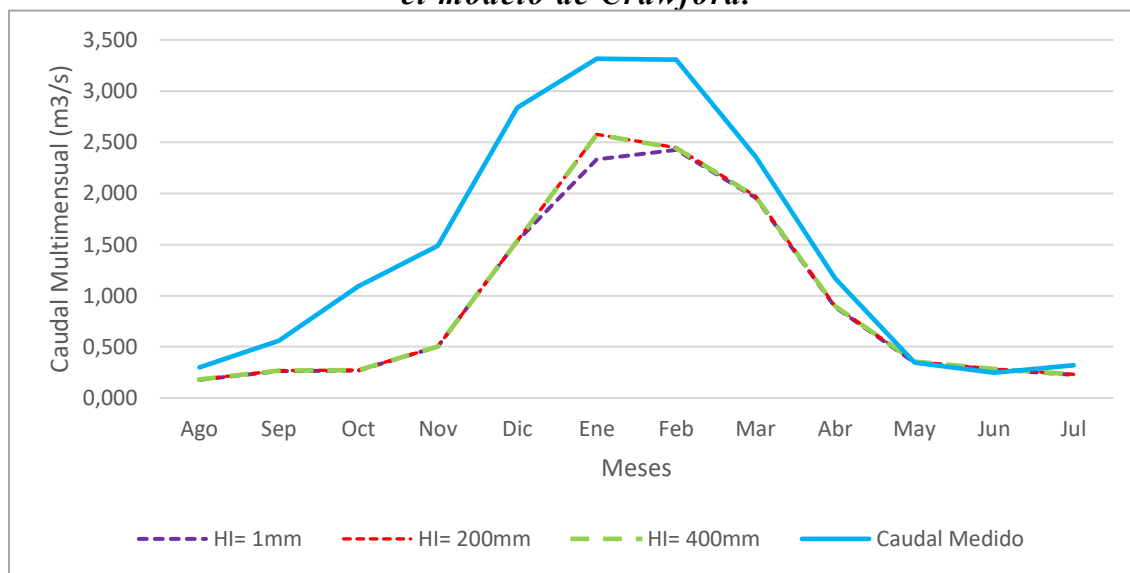


Fuente: Elaboración Propia

5.2.2.4 Humedad Inicial en (mm)

Observando la Figura 5.4 se concluyó que este parámetro presenta una sensibilidad baja debido a que sus cambios para sus distintas corridas no variaron mucho a los caudales.

Figura 5.4: Análisis de Sensibilidad del parámetro “HI” en la cuenca Málaga con el modelo de Crawford.

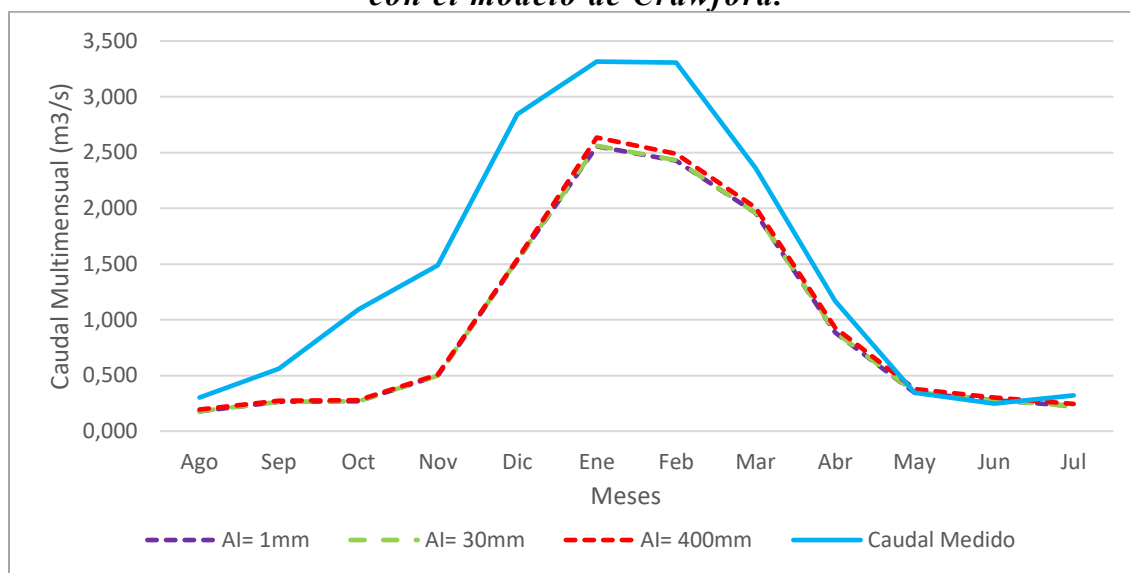


Fuente: Elaboración Propia

5.2.2.5 Almacenamiento inicial de agua subterránea en (mm)

Observando la Figura 5.5 se concluyó que este parámetro presenta una sensibilidad baja debido a que sus cambios para sus distintas corridas no variaron a los caudales.

Figura 5.5: Análisis de Sensibilidad del parámetro “AI” en la cuenca Málaga con el modelo de Crawford.



Fuente: Elaboración Propia

5.2.3 Resultados de la Calibración

Después de realizar la estimación inicial de los parámetros y un análisis de sensibilidad de la cuenca a los parámetros se realizó una calibración con un resultado final donde solo se dio importancia a los parámetros Cs, PSUB y GAS. Después de analizar los resultados del análisis de sensibilidad realizado anteriormente se pudo ver que la mejor calibración se realizó con los valores mínimos de los anteriores tres parámetros citados, debido a que con esos valores salieron los mejores resultados posibles y el coeficiente de eficiencia calculado fue: $NSE = 0.73$ y $RMSE = 0.73$, que son resultados admisibles.

5.2.3.1 Uso de la extensión SOLVER de la planilla Excel

Debido a que el modelo Crawford fue realizado en una planilla Excel se pudo usar la extensión “Solver” que posee el Excel y realizar una calibración automática ya que tiene la opción de asignar los parámetros a calibrar y los rangos en que el programa realizara las iteraciones para dichos parámetros durante la calibración.

Primeramente, se ajustó la extensión para que use el método de resolución “Evolutionary”, debido a que este método es el indicado para problemas de optimización no uniformes como es el caso de los datos de precipitaciones y caudales que se usaron en este proyecto; en las opciones se ajustaron los parámetros de convergencia a 0.00001, que vendría a ser la tolerancia que se da a solver para que obtenga un mejor resultado; el tamaño de la población a 100000, que sería el tamaño de la población de resultados posibles que puede manejar solver y el tiempo máximo sin mejora 60 s., para que el tiempo no sea mucho debido a que el algoritmo de este método consiste en una búsqueda constante de una mejor solución, como se muestra en el pequeño tutorial en la sección de Anexos.

El objetivo del solver fue que el valor del coeficiente de Nash sea lo más cerca posible a uno y también minimizar el valor de Baias lo más posible, por lo que se creó una nueva función que implique minimizar ambos términos para facilitar el trabajo y que solver trabaje con ambos términos al mismo tiempo.

$$Función = \frac{Bias}{100} + (1 - NSE)$$

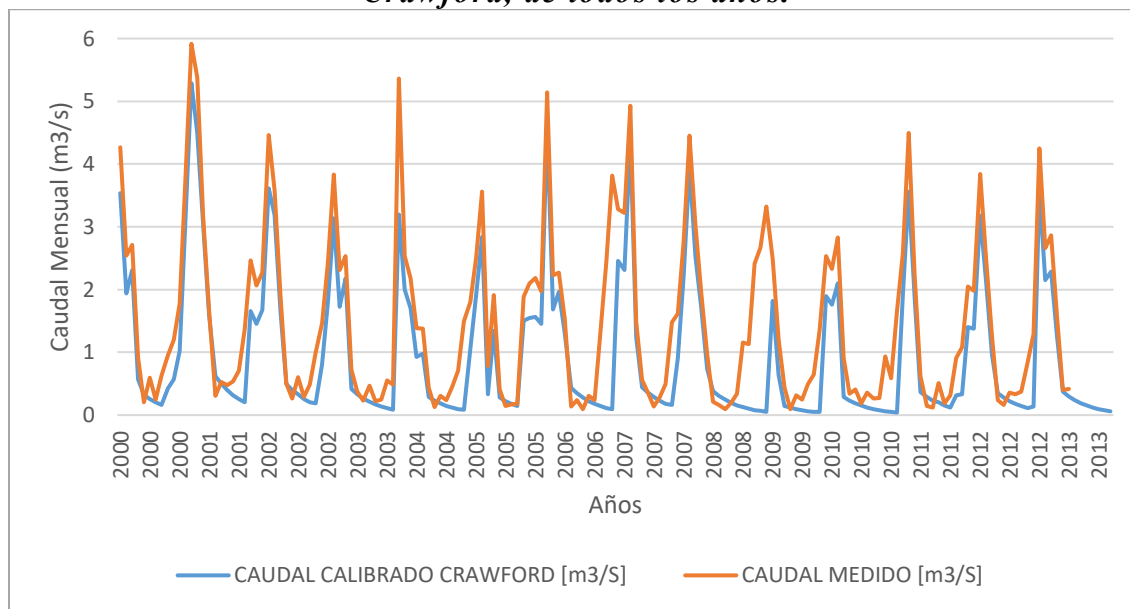
Se usó la opción solver primero en un parámetro a la vez, luego en dos parámetros y finalmente en los tres parámetros que tiene el modelo para calibrar. Realizando este procedimiento, y además teniendo en cuenta el análisis de sensibilidad, se observó que el parámetro “GAS” influye mucho en el Caudal base por lo que Solver tratando de minimizar los valores de Nash y Baias aumenta el valor de GAS, pero baja demasiado los caudales base y resulta una calibración incorrecta.

Debido a eso se puso el valor de Gas igual a 0.2, que es el valor mínimo y óptimo para la calibración, y solo se calibro con Solver los valores de CS y PSUB, sacando valores de 15.2653 y 0.3012 respectivamente, realizando esta operación se pudo obtener un valor de Nash de 0.78 y

RMSE de 0.65 que son valores mejores que el anterior realizado gráficamente Nash de 0.73. y RMSE de 0.73

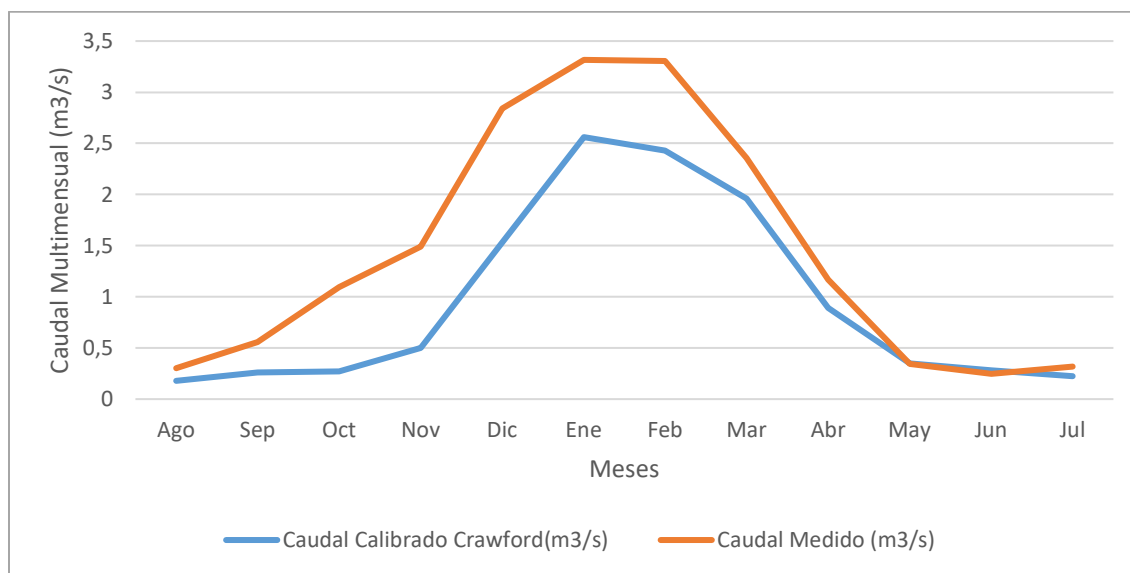
Los resultados finales se los puede observar en las Figura 5.6 y 5.7.

Figura 5.6: Resultado final de la calibración del modelo de la cuenca Málaga en Crawford, de todos los años.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.7: Resultado final de la calibración del modelo Crawford en la cuenca Málaga, Promedio multimensual.



Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar en las figuras que el resultado de los caudales calculados por el modelo hidrológico de Málaga en Crawford son valores más bajos en la época de lluvias y casi se asemejan en la época de estiaje en comparación a los caudales medidos en la cuenca, esto debido seguramente debido a las limitaciones del modelo en cuanto a los parámetros para poder ajustar bien las características del suelo en la cuenca incluso a pesar de haber usado la extensión solver en el modelo.

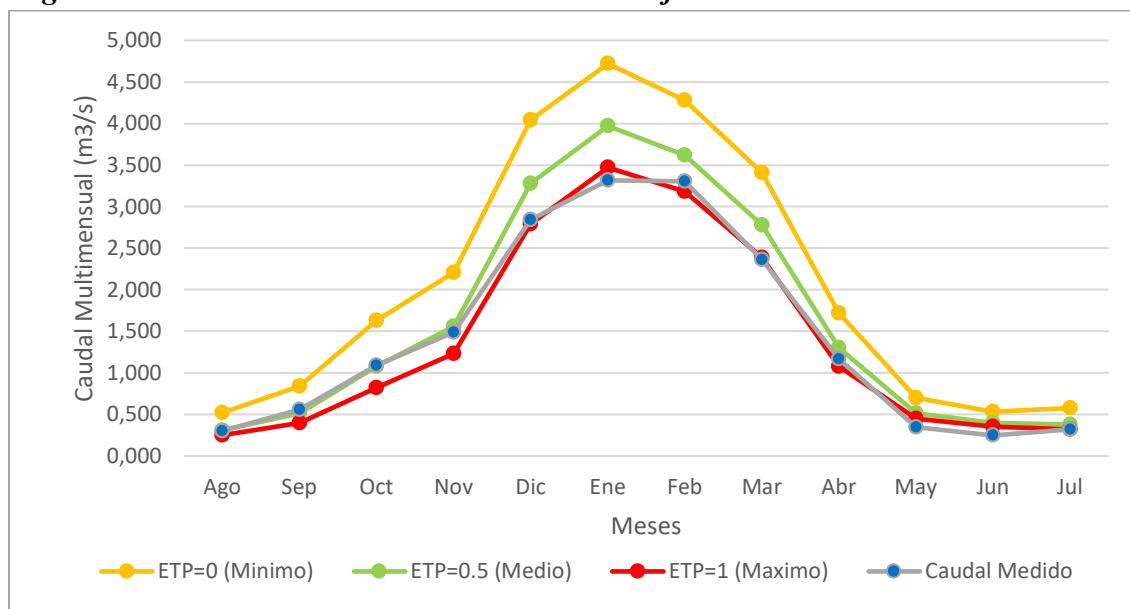
5.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO CHAC

5.3.1 Análisis de sensibilidad de los Parámetros

5.3.1.1 Coeficiente ETP

El rango del coeficiente ETP varía entre 0 y 1 y habiendo realizando el análisis de sensibilidad del coeficiente se vio que es bastante sensible en la calibración de la cuenca Málaga, pero al final el valor óptimo de calibración sería su valor máximo (ETP= 1).

Figura 5.8: Análisis de sensibilidad del coeficiente ETP del modelo CHAC.

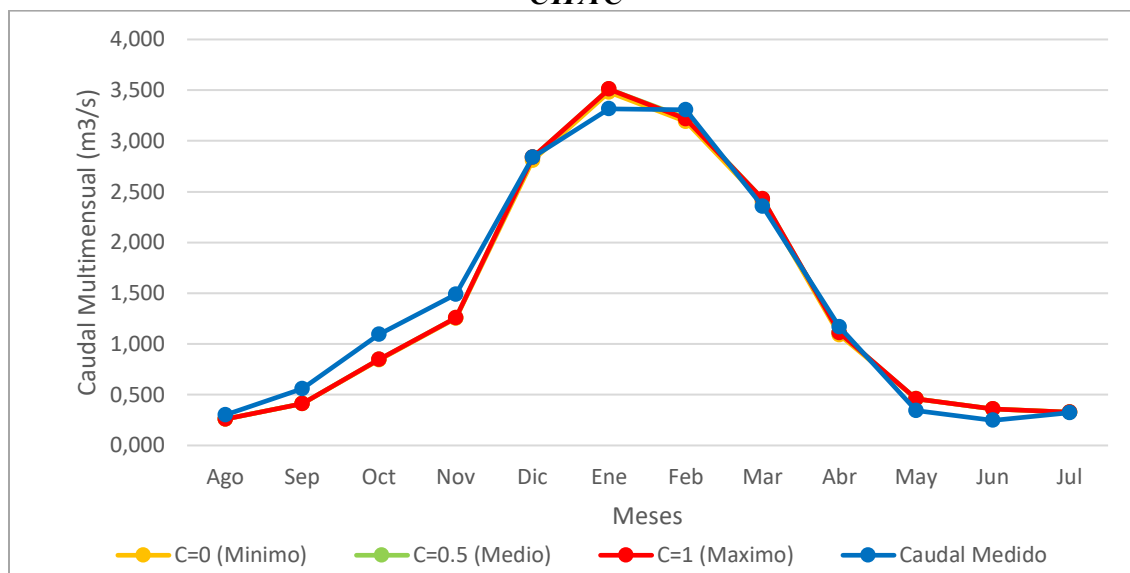


Fuente: Elaboración propia

5.3.1.2 Parámetro "C" de Excedencia

El parámetro "C" de excedencia varía entre 0 y 1, realizando el análisis de sensibilidad del parámetro en la cuenca Málaga se observó que el parámetro es poco sensible en el proceso de calibración por lo que se adoptó un valor promedio de $C = 0.45$.

Figura 5.9: Análisis de sensibilidad del parámetro “C” de Excedencia del modelo CHAC

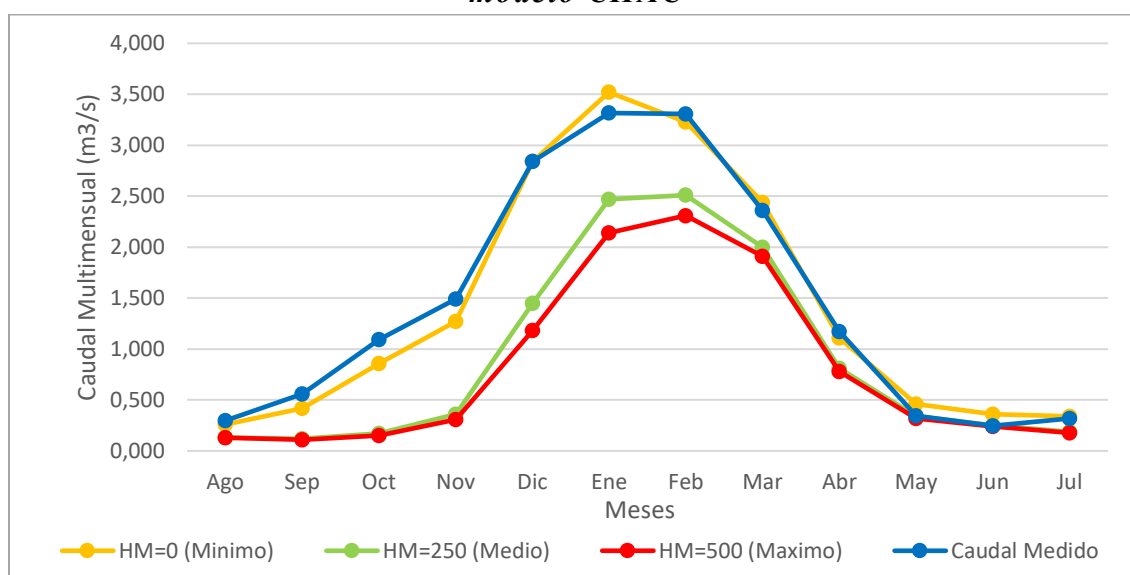


Fuente: Elaboración propia

5.3.1.3 Humedad Máxima

El parámetro de humedad máxima varía de 0 a 500 y habiendo realizado el análisis de sensibilidad en la cuenca Málaga se observó que el parámetro es bastante sensible en la calibración de la cuenca y el valor óptimo para la calibración sería un valor mínimo, HM= 5.

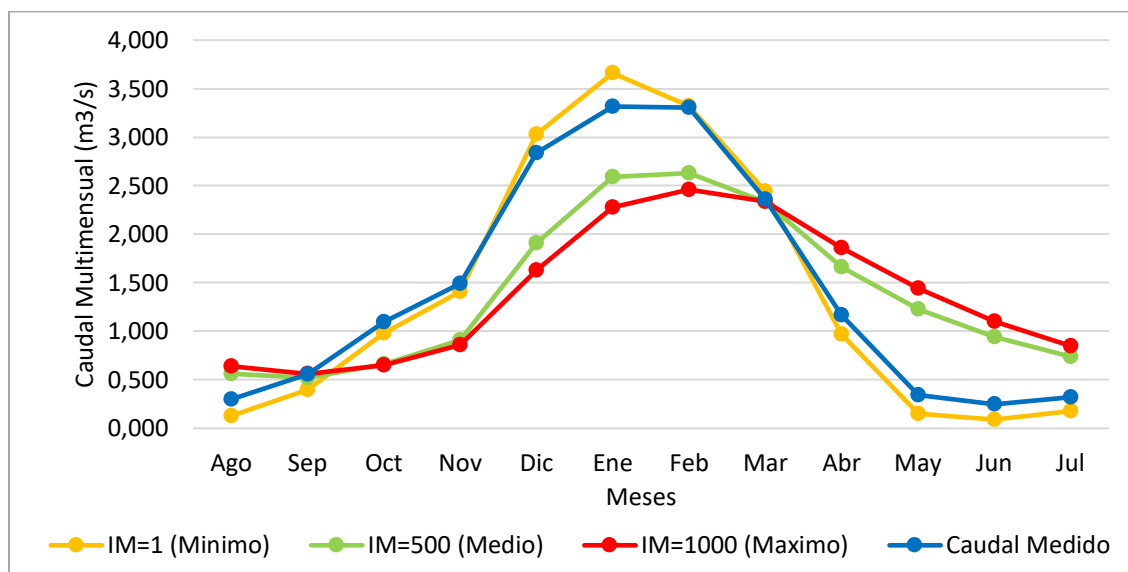
Figura 5.10: Análisis de sensibilidad del parámetro de Humedad Máxima del modelo CHAC



Fuente: Elaboración propia

5.3.1.4 Infiltración Máxima

Figura 5.11: Análisis de sensibilidad del parámetro Infiltración Máxima en el modelo CHAC.



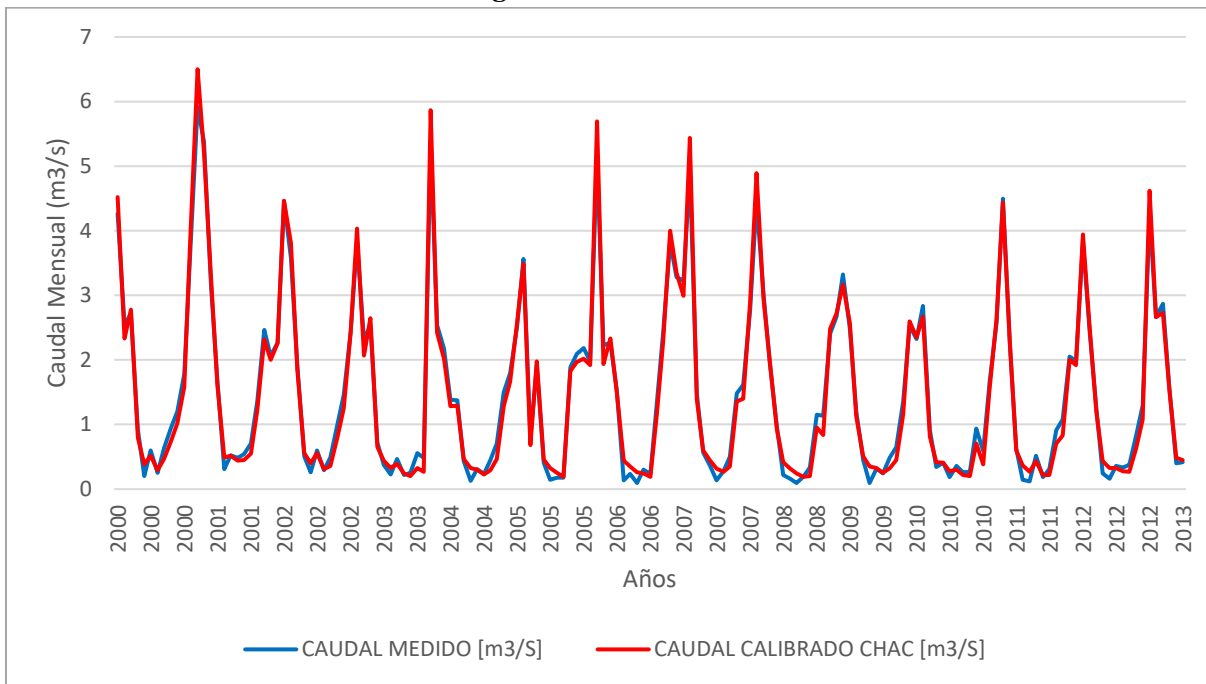
Fuente: Elaboración propia

5.3.2 Resultados de la calibración del Modelo CHAC

Después de haber realizado el análisis de sensibilidad del modelo para la cuenca Málaga, cambiando los parámetros de acuerdo al análisis de sensibilidad y verificando gráficamente con que parámetros se acercan los caudales modelados a los medidos se llegó a un resultado final óptimo y también verificando con el coeficiente de Nash-Sutcliffe, que salió NSE igual a 0.98, y Raíz del error cuadrático medio, RMSE igual a 0.16 valores muy excelentes.

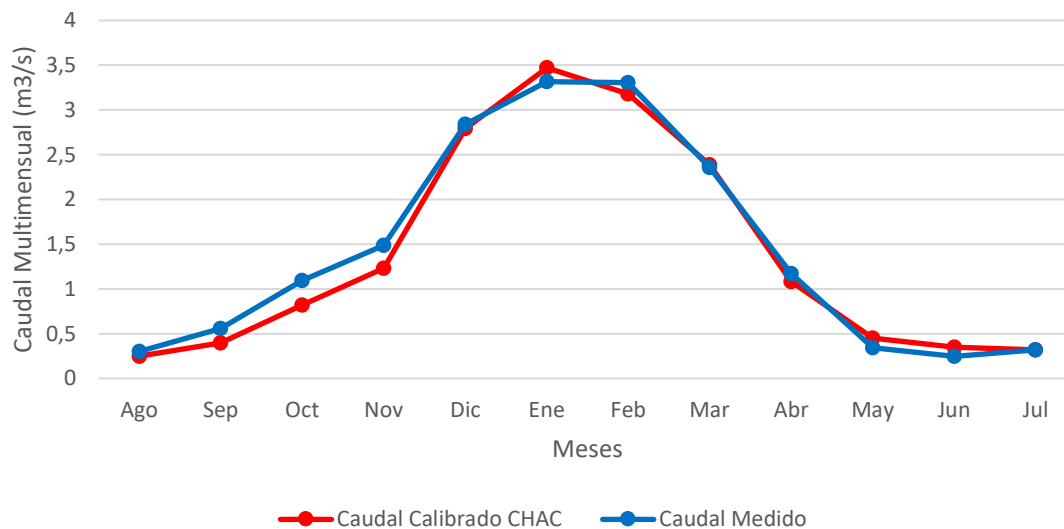
Los resultados finales de la calibración se presentan en las Figuras 5.12 y 5.13.

Figura 5.12: Resultado final de la calibración del modelo CHAC en la cuenca Málaga de todos los años.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.13: Resultado final de la calibración del modelo Crawford en la cuenca Málaga, Promedio multimensual.



Fuente: Elaboración propia

5.4 EVALUACIÓN DE RESULTADOS Y COMPARACIÓN CON EL WEAP

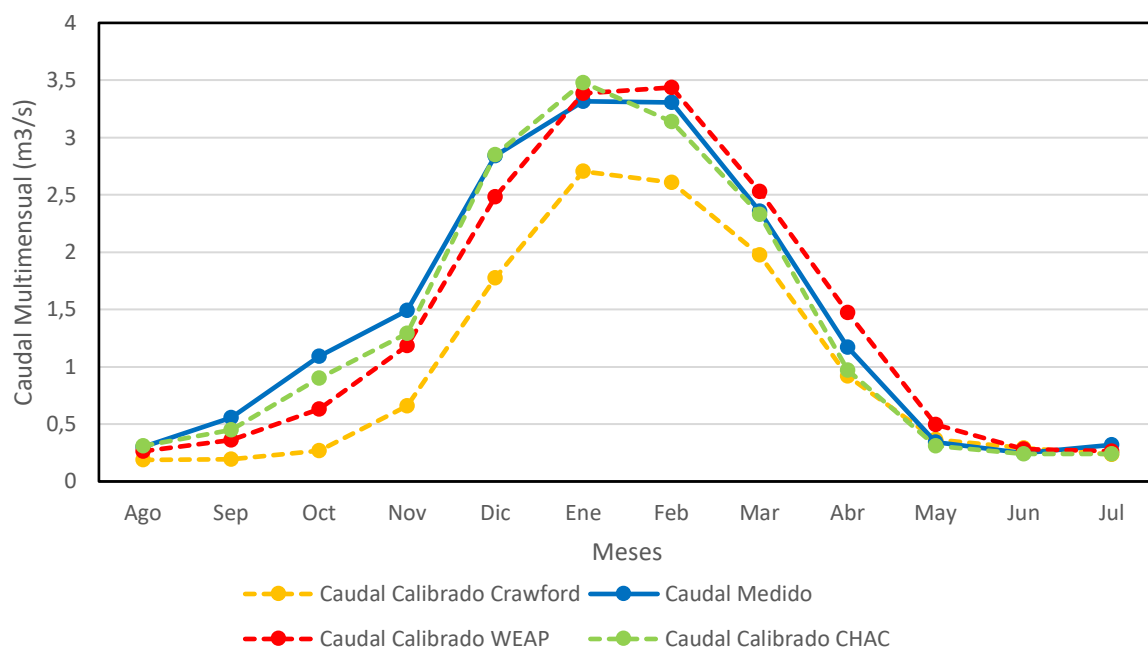
Obtenidos los caudales finales en las calibraciones de los modelos hidrológicos WEAP, Crawford y CHAC, de la cuenca Málaga, se los comparo con el Caudal medido de la cuenca, como se observa en la Figura 5.14, se observó que los modelos hidrológicos de WEAP y CHAC presentan mejores resultados ya que las curvas de los caudales calculados por WEAP y CHAC se asemejan más al caudal medido y los coeficientes de Nash-Sutcliffe salieron 0.95 y 0.98 respectivamente en comparación de 0.73 obtenidos de Crawford.

A pesar de que el modelo de CHAC presenta resultados un poco mejores en cuanto a la calibración hecha en los distintos modelos, no cuenta con la opción de modelación de presas, como es el caso de WEAP que además presenta más parámetros de calibración con la opción de adoptarlos con la guía de tablas de sus valores y sus límites mediante información de cobertura y textura del suelo

El modelo CHAC también presenta buenos resultados en la calibración, incluso un poco mejores que el WEAP, esto seguramente debido a que sus algoritmos son similares o iguales al programa que uso el LHUMSS para la obtención de los caudales de la cuenca Málaga, pero este modelo no toma en cuenta la topografía, ni los estudios del suelo de la cuenca.

El modelo Crawford presenta limitaciones debido a los pocos parámetros que tiene para su calibración y los resultados de caudal salieron muy distintos a los caudales medidos en la cuenca a pesar de que los parámetros de calibración ya están en los límites establecidos.

Figura 5.14 Comparación de los caudales promedio multimensual del modelo WEAP, Crawford y el caudal medido de la cuenca.



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5.1: Verificación de las calibraciones de los diferentes modelos por el coeficiente Nash-Sutcliffe

Modelo	Calibración Nash-Sutcliffe (2000-2007)		Validación Nash-Sutcliffe (2008-2013)	
Crawford	0.734	Muy Bueno	0.822	Excelente
WEAP	0.945	Excelente	0.936	Excelente
CHAC	0.982	Excelente	0.985	Excelente

Fuente: Elaboración Propia

5.4.1.1 Limitación de los modelos

Después de haber estudiado, realizado y analizado las calibraciones con los tres modelos hidrológicos WEAP, CHAC y Crawford se ha podido encontrar las siguientes limitaciones de los programas:

En el modelo hidrológico WEAP los parámetros de calibración se obtuvieron fácilmente de la Guía de Metodología para la Elaboración de Balances Hídricos Superficiales de Bolivia, donde presentan tablas para la obtención de valores mínimos, máximos y promedios de los parámetros a partir de características físicas de la cuenca como la cobertura, vegetación, tipo y uso del suelo.

Debido a que es un programa muy completo que necesita varios datos para la modelación hidrológica, existen muchas zonas en el territorio de Bolivia que no cuentan con todos los datos requeridos por el modelo por lo que vendría siendo una limitación del modelo WEAP.

El modelo WEAP además carece de rutinas de tránsito por lo que realizar una modelación hidrológica a paso diario o subdiario no es recomendable.

Para el modelo Crawford los parámetros de calibración se puede obtener primeramente de las tablas de Soria, 2016 de valores referenciales de CRH, de la capacidad de infiltración o permeabilidad del suelo de la cuenca y los escurrimientos.

El modelo es realizado en una planilla Excel que no representa la complejidad que debe tener un programa de modelación hidrológica.

Pero para el modelo de CHAC, después de haber cargado todos los valores iniciales para la calibración de la cuenca, los parámetros de calibración iniciales se presentan directamente en el programa y también la gráfica de caudal multimensual en función de los meses, para la calibración lo que se hace en el programa es ir solamente variando los parámetros dentro de unos rangos dados por el programa y ver el gráfico de caudales hasta tratar de igualar los caudales obtenidos por el programa con los caudales medidos en la cuenca.

Finalmente, los modelos Crawford y CHAC no presentan representaciones de demandas en sus modelos hidrológicos que son muy necesarios para modelar una o más presas.

6 DIMENSIONAMIENTO HIDROLÓGICO DE LOS EMBALSE DE MUYO QHOCHA Y KHASPI KANCHA

6.1 INTRODUCCIÓN

Realizando visitas a la presa Khaspi Kancha se constató que presenta caudal sobrante que descarga por su aliviadero, sobre todo en épocas de lluvia, que no es aprovechado para fines de riego y se concluyó que se podría aprovechar dichas aguas sobrantes en otro punto más arriba de la cuenca construyendo la presa Muyo Qhochá y atender otra demanda de riego que existe en la parte superior de la cuenca.

La altura hidrológica de la presa Muyo Qhochá se calculará tomando en cuenta que la presa Khaspi Kancha ya existe, está construida y satisface una demanda de riego aguas abajo, en el mismo río, por lo que se tomará en cuenta en el modelo WEAP que priorice la demanda que debe satisfacer la presa Khaspi Kancha y posteriormente que la presa Muyo Qhochá satisfaga su demanda de agua y así se podrá realizar el dimensionamiento hidrológico de la presa Muyo Qhochá sin perjudicar a la presa Khaspi Kancha.

6.2 DEMANDA DE AGUA PARA FINES DE RIEGO

El especialista en riego, determinó la demanda de agua para las cuencas Muyo Qhochá y Khaspi Kancha que se presenta en la Tabla 6.1, en la tercera columna se presentan los volúmenes de requerimiento mensual en (m³), observando que la demanda total anual es de 976574 m³, en la segunda columna se tiene el porcentaje anual de requerimiento mensual. Los valores presentados corresponden al requerimiento de una superficie bajo riego óptimo de 500 Ha para el embalse de Khaspi Kancha que el especialista en riego calculó.

Tabla 6.1: Distribución mensual de la demanda de riego del proyecto Muyo Qhochá y Khaspi Kancha

Meses	% Demanda Mensual	Volumen Demanda m ³
Ago	7.34	71674
Sep	17.36	169569
Oct	27.43	267840
Nov	9.53	93079
Dic	4.91	47970
Ene	10.81	105583
Feb	14.41	140749
Mar	6.83	66692
Abr	0.00	0
May	0.00	0
Jun	0.00	0

Jul	1.37	13419
Total	100.0	976574

Primeramente se realizó la modelación hidrológica de las cuencas de Muyo Qhocha y Khaspi Kancha en WEAP, posteriormente se implementaron las presas y su respectiva demanda de riego que deben satisfacer para realizar su modelación en la que se ira variando la altura de la presa y las áreas de las demandas para que se pueda tener probabilidades de falla de 2 y 10 %, para que finalmente se pueda obtener los datos de porcentaje de atención a la demanda para distintas alturas de presa con la que se podrá obtener la altura hidrológica optima de la presa Muyo Qhocha.

6.3 RESULTADOS SIMULACIÓN DE LOS EMBALSES EN CASCADA

Se realizó la simulación en WEAP de los embalses Muyo Qhocha y Khaspy Kancha, y la demanda que se asignó para el embalse de Khaspi Kancha de 500 ha. Para el embalse de Muyo Khocha se realizaron simulaciones para alturas de 16, 17, 18, 19 y 20 m del embalse y para 2% y 10% de probabilidad de falla del embalse. Mientras que la altura de la presa Khaspi Kancha se mantendrá constante igual a los 20 metros como está construida.

Se definió la probabilidad de falla de una presa como el número de meses que fallaran en el total de meses en la corrida por lo que, de los 168 meses de corrida, una probabilidad de falla de 2% son 3 meses que fallarán y de 10% son 16 meses de fallarán.

Lo que se hizo en WEAP fue primero colocar la altura del embalse de Muyo Khocha igual a 16 m e ir variando el área de la demanda asignada al embalse hasta encontrar el valor con el que la corrida nos de los meses que fallarán para las distintas probabilidades de falla ya antes mencionadas, posteriormente se aumentó la altura del embalse un metro y se volverá a encontrar el área de demanda para que el número de meses que fallaran. Se siguió aumentando la altura de la presa hasta los 20 metros y así obtener los resultados en la siguiente tabla:

Tabla 6.2: Resultados de las Áreas de demanda simuladas para distintas alturas del embalse Muyo Quocha y para distintas probabilidades de falla.

Altura(m)	Demanda (Ha)	
	Prob. Falla 2%	Prob. Falla 10%
16	221	324
17	261	352
18	274	371
19	284	399
20	295	427

Fuente: Elaboración Propia

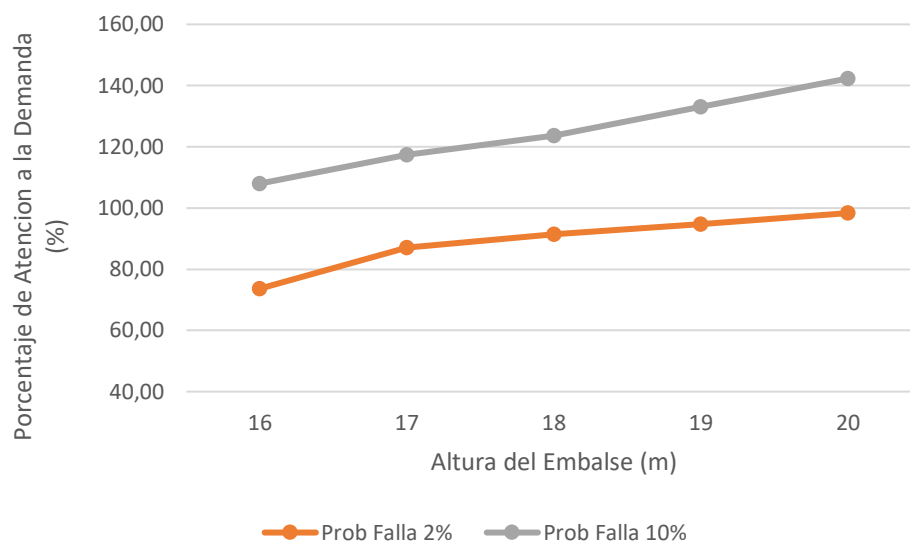
6.4 ALTURA PRESA VS PORCENTAJE DE ATENCIÓN DEMANDA

Para la determinación de la altura hidrológica de la presa se utilizó el método del gráfico de porcentaje de atención a la demanda vs altura del embalse en el que se puede determinar la altura hidrológica del embalse en el punto que se observa una disminución en el crecimiento lineal del porcentaje de atención a la demanda mientras la altura del embalse aumenta.

Tomando inicialmente una demanda requerida para el embalse de Muyo Qhochá de 300 ha se calculó el porcentaje de atención a la demanda requerida para las distintas probabilidades de falla y distintas alturas del embalse. Se presentan los resultados en la Figura 6.1 y la Tabla 6.3.

Como se puede observar en la Figura 6.1 el crecimiento del porcentaje de atención a la demanda es más alto en el intervalo de 16 a 17 metros, mientras que en el intervalo de 17 a 18 metros de altura del embalse el crecimiento del porcentaje de atención a la demanda no es tan significativo, por lo que una construcción de un embalse de 18 metros o superior no sería necesario, por lo que es aconsejable una altura del embalse de 17 metros.

Figura 6.1: Gráfica de Porcentaje de atención a la demanda vs Altura del embalse



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6.3: Porcentaje de atención a la demanda vs Altura del embalse para distintas probabilidades de falla en el Embalse de Muyo Quocha

Altura(m)	Porcentaje de atención a la demanda	
	Prob Falla	Prob Falla
	2%	10%
16	73.67	108.00
17	87.00	117.33
18	91.33	123.67
19	94.67	133.00
20	98.33	142.33

Fuente: Elaboración Propia

También se realizó una verificación de que la cuenca Khaspi Kancha aguas abajo que cumpla el porcentaje mínimo de atención a la demanda que es 75% para riego. Se presentan los resultados para la altura del embalse ya definida de 17 metros que para una probabilidad de falla del embalse de Muyo Qhocha de 2% para el embalse de Khaspi Kancha también será de 2% y para una probabilidad de falla de 10% del embalse de Muyo Qhocha para el embalse de Khaspi Kancha será de 6%, como se muestra en el Tabla 6.4.

Tabla 6.4: Verificación de las probabilidades de falla del embalse de Khaspi Kancha

Altura Presa (m)	Meses de falla del embalse Muyo Qhocha		Meses de falla del embalse Khaspi Kancha	
	Prob. Falla	Prob. Falla	Prob. Falla	Prob. Falla
	2%	10%	2%	6%
17	3	16	3	10

Fuente: Elaboración Propia

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

En base a todo lo abarcado en el presente trabajo se llegó a las siguientes conclusiones:

- La plataforma WEAP es un modelo muy útil para el dimensionamiento de la altura hidrológica de presas en cascada, gracias a su opción de asignar demandas y el factor de importancia para cada demanda, además que utiliza datos de cobertura y textura de suelo para la calibración de sus parámetros en la modelación hidrológica.
- No se pudo usar de manera directa los parámetros de calibración del modelo da la cuenca Málaga en los modelos de las cuencas Muyo Qhocha y Khaspi Kancha debido a que a pesar de que son cuentas contiguas son muy distintas tanto en altura media, clima, precipitación promedio anual, coeficiente de escurrimiento.
- El valor del coeficiente de escurrimiento fue un indicativo muy importante para cerciorarse de que la calibración y la modelación hidrológica estaban bien realizadas ya que debido a él se pudo ver que los parámetros de calibración de la cuenca Málaga no fueron los indicados para poder encontrar la disponibilidad de agua en las cuencas Muyo Qhocha y Khaspi Kancha.
- En la cuenca Málaga el parámetro RRF (Factor de resistencia a la esorrentía) fue el único valor que se modificó para su calibración, mientras que los otros parámetros se comportaron bien con sus valores promedios propuestos en la bibliografía, lo que da énfasis a que los rangos de los parámetros propuestos en la bibliografía del modelo WEAP son bastante acertados.
- La herramienta GMET resulto no ser confiable para realizar un modelo hidrológico debido a que presenta datos de precipitación erróneos que están presentes en las épocas de estiaje.

7.2 RECOMENDACIONES

Habiendo realizado todo este proyecto y viendo los resultados y los comportamientos se presentan las siguientes recomendaciones:

- Es muy importante tener información, ahora ya no sólo de precipitación sino también de caudales, temperatura, velocidad del viento, etc. en todo el territorio de Bolivia ya que son muy necesarios para realizar procesos de cálculo y análisis en las distintas cuencas del país y así obtener resultados precisos y seguros en todos los proyectos futuros. Por lo que es recomendable realizar una modelación con disponibilidad de datos más extensa para este proyecto ya que solo se pudo conseguir un periodo de 13 años.
- Es importante mejorar la precisión de los estudios de cobertura y textura del suelo respecto a los mapas temáticos obtenidos para este proyecto ya que son valores muy importantes para obtener los parámetros de calibración en los modelos hidrológicos de WEAP.
- Se debe tener precaución con el uso de los datos del GMET en modelaciones de cuencas pequeñas y alejadas como los del presente proyecto.
- Se debe tomar muy en cuenta el coeficiente de escurrimiento de cada cuenca al momento de realizar la calibración o una modelación hidrológica debido a que este coeficiente nos determina cuanta lluvia se convirtió en esorrentía y este valor está definido en rangos para distintas zonas de Bolivia.
- Es recomendable usar el modelo WEAP (Weater Evaluation And Planning) para determinar la altura hidrológica de embalses en cascada debido a su opción de factor de importancia que se da a cada demanda y así controlar la demanda que puede satisfacer primero.
- Es importante conocer bien, los procesos representados por el modelo hidrológico utilizado, para lograr la correcta modelación de la transformación de lluvia en caudal.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chong-yu Xu. (2002). "Hydrologic models". Uppsala University. Suecia.

Crawford, N. H. Hydrologic Computations at a Small Hydro Site, capítulo pp. Small and Mini Hydropower Systems, ed. por Jack J. Fritz, McGraw-Hill Book Co., Nueva York, Estados Unidos.

Fiering, M. B. Streamflow Synthesis, Mc Millan, Londres, 1967.

Ministerio de Medio Ambiente y Agua - Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, 2016. Guía Metodológica para la Elaboración de Balances Hídricos Superficiales - Análisis de Variabilidad Climática de Oferta y Demanda Hídrica. Versión Resumida

Molnar, P. (2011). "Calibration". Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.

Refsgaard, J. y Abbott, M. (1996). "Distributed hydrological modelling". Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.

SENAMHI, (2016). Unidad de Pronóstico. Estación meteorológica de Málaga. Estado Plurinacional de Bolivia. Recuperado de <http://www.senamhi.gob.bo/sismet/index.php>

SENAMHI. (2015). Manual informativo del modelo conceptual del Sistema Nacional de Información Meteorológica, Climatológica,

Agrometeorológica e Hidrológica SNIMCAH. La Paz: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

SENAMHI. (2011). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Recuperado el 10 de Mayo de 2016, de http://www.senamhi.gob.bo/sige/listado_estaciones_municipios/Clasificacion_de_estaciones_meteorologicas_e_hidrologicas%20.pdf

Wagener, T., H. S. Wheater, and H. V. Gupta (2004), Rainfall-Runoff Modeling in Gauged and Ungauged Basins, Imp. Coll. Press, London, doi:10.1142/9781860945397

Wallis, J. R. y Matalas, N. C. "Sensitivity of reservoir design to the generating mechanism of inflows", Water Resources Research, Vol. 8, No. 3, 1972.

9 ANEXOS

ANEXO A

Uso de la extensión solver de Excel para la optimización de parámetros hidrológicos del modelo Crawford

- Establecer el objetivo que solver analizara
- Seleccionar de qué forma solver analizara el objetivo, en este caso seleccionar “Min” para encontrar el valor mínimo posible de la nueva función que tiene las variables Vias y el Nash
- Seleccionar las variables de la hoja de cálculo para que solver los ajuste, que vendrían a ser los parámetros de calibración del modelo.
- “Agregar” las restricciones para cada una de las variables seleccionadas.
- Seleccionar el método de resolución “Evolutionary”

The screenshot shows the 'Parámetros de Solver' (Solver Parameters) dialog box in Excel. The 'Establecer objetivo:' (Set Objective) field is set to '\$A\$174'. The 'Para:' (To) section has 'Mín' (Min) selected. The 'Cambiando las celdas de variables:' (Changing Variable Cells) field is set to '\$H\$4:\$J\$4,\$L\$4'. The 'Sujeto a las restricciones:' (Subject to the Constraints) list contains six constraints: '\$H\$4 <= 400', '\$H\$4 >= 10', '\$J\$4 <= 0.8', '\$J\$4 >= 0.3', '\$L\$4 <= 0.8', and '\$L\$4 >= 0.2'. The 'Convertir variables sin restricciones en no negativas' (Make Variable Non-Negative) checkbox is checked. The 'Método de resolución:' (Select a GRG Nonlinear engine for Solver Problems that are smooth nonlinear. Select the LP Simplex engine for linear Solver Problems, and select the Evolutionary engine for Solver problems that are non-smooth.) dropdown is set to 'Evolutionary'. The 'Método de resolución' (Solver Method) section provides instructions: 'Seleccione el motor GRG Nonlinear para problemas de Solver no lineales suavizados. Seleccione el motor LP Simplex para problemas de Solver lineales, y seleccione el motor Evolutionary para problemas de Solver no suavizados.' The 'Ayuda' (Help), 'Resolver' (Solve), and 'Cerrar' (Close) buttons are at the bottom.

Parámetros de Solver

Establecer objetivo:

Para: ☐ Máx ☒ Mín ☐ Valor de:

Cambiando las celdas de variables:

Sujeto a las restricciones:

- \$H\$4 <= 400
- \$H\$4 >= 10
- \$J\$4 <= 0.8
- \$J\$4 >= 0.3
- \$L\$4 <= 0.8
- \$L\$4 >= 0.2

☒ Convertir variables sin restricciones en no negativas

Método de resolución:

Método de resolución

Seleccione el motor GRG Nonlinear para problemas de Solver no lineales suavizados. Seleccione el motor LP Simplex para problemas de Solver lineales, y seleccione el motor Evolutionary para problemas de Solver no suavizados.

Ayuda Resolver Cerrar

- vi. Entrar a las opciones del método de resolución y asignar los siguientes valores:

Opciones

Todos los métodos | GRG Nonlinear | Evolutionary

Convergencia: 0.00001

Tasa de mutación: 0.075

Tamaño de población: 100000

Valor de inicialización aleatorio: 0

Tiempo máximo sin mejora: 60

☒ Requerir límites en variables

Aceptar Cancelar

- vii. Seleccionar el botón “Resolver” y solver realizara la operación de optimización de los parámetros de calibración

ANEXO B

Datos de Entrada al Modelo WEAP para la calibración de la Cuenca Málaga

Tabla B.1: Precipitación Mensual para la Cuenca Málaga (mm)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
2000	467.2	265.1	305.7	102.2	13.2	76.7	23.0	85.4	119.1	153.7	214.1	421.8	187.3
2001	604.5	495.7	340.4	185.6	27.5	63.6	58.2	68.7	89.1	177.2	284.3	244.9	220.0
2002	268.1	432.7	382.1	206.5	55.2	23.8	79.3	30.9	63.3	135.3	179.2	289.2	178.8
2003	422.7	236.3	289.8	81.3	43.4	21.0	62.0	21.1	28.7	80.5	64.6	588.3	161.6
2004	284.1	239.3	170.2	164.6	50.5	4.9	41.0	27.2	61.5	99.2	190.8	224.6	129.8
2005	297.0	355.4	94.6	227.6	45.9	8.3	18.1	19.4	237.6	249.3	250.9	239.1	170.3
2006	547.4	227.7	266.3	176.0	5.1	26.1	0.5	43.5	27.9	183.5	282.7	423.8	184.2
2007	366.7	326.3	515.6	161.6	67.1	41.2	8.2	36.6	67.8	195.3	196.2	326.1	192.4
2008	479.6	313.6	226.3	115.3	19.3	12.2	0.0	24.5	45.7	159.8	146.1	294.1	153.0
2009	311.5	336.9	282.5	139.5	53.5	0.0	44.7	29.6	68.8	92.8	177.7	305.7	153.6
2010	275.4	295.7	114.4	41.7	57.1	18.9	50.1	33.9	35.8	135.2	80.1	220.2	113.2
2011	307.7	439.1	255.7	73.9	11.7	8.1	76.6	19.8	43.7	131.5	142.1	258.0	147.3
2012	242.7	400.6	283.3	148.5	25.3	15.4	51.4	45.5	51.2	121.4	167.9	474.7	169.0
2013	309.7	296.6	188.4	45.9	57.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	175.7	298.7	114.4
Prom	370.3	332.9	265.4	133.6	38.0	22.9	36.7	34.7	67.2	136.8	182.3	329.2	162.5

Fuente: Senhami Estación Málaga 3200

Tabla B.2: Temperatura Mensual para la Cuenca Málaga (°C)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
2000	2.8	-0.2	1.7	0.8	1.1	2.8	-0.2	0.3	-1.9	-1.4	1.2	-1.1	0.5
2001	0.0	1.7	0.4	-0.2	1.3	-0.1	-3.7	1.9	1.9	2.4	0.5	1.8	0.7
2002	-0.1	2.5	3.2	0.7	4.6	2.6	-3.3	0.5	-6.8	1.1	-6.5	4.6	0.3
2003	1.9	2.4	1.2	2.6	4.5	-1.6	-6.9	-1.9	1.7	0.0	2.0	1.0	0.6
2004	1.8	4.7	2.7	6.4	0.4	0.1	-3.0	-3.3	-3.6	4.2	0.4	1.7	1.0
2005	1.6	0.9	2.6	3.9	5.1	-4.6	-2.7	-2.7	2.5	3.2	-2.6	2.4	0.8
2006	0.2	2.5	2.3	2.8	-2.3	-4.5	-2.3	-2.5	-3.5	-0.4	-4.6	1.2	-0.9
2007	1.0	0.0	-0.1	1.2	-0.9	-3.9	-5.5	-7.1	-1.5	-1.5	4.0	2.1	-1.0
2008	1.0	1.9	0.4	-2.2	-4.8	-3.6	-4.9	-5.7	-8.0	-6.0	0.9	0.9	-2.5
2009	3.3	1.3	1.8	0.4	-3.0	-3.7	-3.9	-2.7	3.6	-1.2	-0.8	0.1	-0.4
2010	-3.6	-2.7	-1.0	1.8	3.8	-1.4	-4.2	-4.2	-9.5	-0.9	-0.7	-0.9	-2.0
2011	-0.2	0.1	1.3	0.4	-2.5	-2.9	-4.0	-2.6	-5.3	1.7	0.3	-0.4	-1.2
2012	0.3	0.8	2.2	4.0	-5.1	-6.3	-1.6	-3.0	1.2	2.5	1.4	0.3	-0.3
2013	0.2	1.4	-2.8	2.4	-5.1	-2.9	-5.1	-6.0	-6.0	-0.5	-8.9	1.7	-2.6
Prom	0.7	1.2	1.1	1.8	-0.2	-2.1	-3.7	-2.8	-2.5	0.2	-1.0	1.1	-0.5

Fuente: Elaboración Propia, elaborado por el gradiente Temperatura-Altura

Tabla B.3: Velocidad del viento Mensual para la Cuenca Málaga (m/s)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
2000	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.5	0.3	0.6	0.7	0.5	0.5	0.3	0.4
2001	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.6	0.2	0.6	1.1	1.1	1.0	0.7	0.5
2002	0.7	0.4	0.7	0.5	0.5	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5
2003	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.6	0.4	0.6	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5
2004	1.4	1.5	1.6	2.0	1.9	2.2	2.4	2.4	2.7	2.4	2.0	1.8	2.0
2005	1.4	1.0	1.6	3.8	2.9	3.8	5.6	5.1	6.3	5.1	3.7	3.8	3.7
2006	3.9	4.1	4.1	4.0	3.9	3.6	3.6	4.6	4.2	3.8	3.4	3.3	3.9
2007	2.7	2.7	4.0	4.0	3.9	4.2	4.1	5.1	4.3	3.8	3.4	2.9	3.8
2008	2.4	3.4	3.1	3.4	3.3	3.7	3.6	2.9	3.8	3.6	3.1	2.6	3.3
2009	3.4	3.7	3.0	2.9	3.3	3.5	4.5	3.4	4.3	3.6	3.3	2.9	3.5
2010	2.9	2.7	3.0	3.8	3.9	3.7	4.8	4.4	4.6	4.4	4.3	4.1	3.9
2011	2.8	3.0	3.8	3.7	3.6	3.7	3.5	3.8	3.6	3.4	3.3	3.4	3.5
2012	3.1	3.5	3.1	2.9	3.4	3.9	3.6	4.1	3.9	3.5	3.2	3.6	3.5
2013	3.6	3.8	3.4	3.4	3.5	5.0	4.4	4.4	4.8	3.5	3.5	4.4	4.0
Prom	2.1	2.2	2.3	2.5	2.5	2.8	3.0	3.0	3.2	2.9	2.5	2.5	2.6

Fuente: Senhami. Estación Tiraque

Tabla B.4: Caudal Mensual para la calibración de la Cuenca Málaga (m3/s)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
2000	3.65	2.85	3.08	1.35	0.30	0.45	0.28	0.36	0.70	0.80	1.50	3.40	1.56
2001	5.89	5.53	3.69	1.90	0.49	0.46	0.41	0.50	0.41	0.82	2.26	2.09	2.04
2002	2.08	4.53	3.91	2.12	0.78	0.33	0.51	0.32	0.29	0.41	0.83	2.26	1.53
2003	3.87	2.27	2.70	1.04	0.41	0.29	0.23	0.32	0.18	0.23	0.27	3.93	1.31
2004	3.47	2.02	1.22	1.53	0.73	0.23	0.20	0.26	0.22	0.43	0.87	1.40	1.05
2005	2.43	3.96	0.94	1.80	0.54	0.32	0.20	0.18	1.33	2.14	2.26	1.75	1.49
2006	5.59	2.41	2.09	2.02	0.36	0.28	0.18	0.18	0.19	0.60	1.96	4.11	1.66
2007	3.47	3.26	4.68	2.44	0.80	0.33	0.26	0.17	0.24	0.77	1.58	2.73	1.73
2008	4.28	3.50	2.37	1.22	0.33	0.20	0.16	0.15	0.17	0.52	0.91	2.01	1.32
2009	3.14	2.70	3.13	1.51	0.50	0.29	0.25	0.32	0.26	0.35	0.77	2.29	1.29
2010	2.32	2.76	1.20	0.47	0.42	0.25	0.21	0.16	0.21	0.34	0.37	0.89	0.80
2011	2.42	4.89	2.50	0.87	0.29	0.18	0.33	0.23	0.21	0.45	0.68	1.52	1.21
2012	1.96	4.15	2.65	1.54	0.42	0.25	0.23	0.29	0.27	0.35	1.14	3.88	1.43
2013	3.09	2.70	1.77	0.69	0.40	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.76
Prom	3.41	3.39	2.57	1.46	0.48	0.28	0.25	0.25	0.34	0.59	1.11	2.31	1.37

Fuente: Modelación LHUMMS