

**ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE USO DEL MODELO HIDROLÓGICO WEAP  
DENTRO DEL PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE LOS RECURSOS  
HIDRÁULICOS DE LA CUENCA DEL RÍO MOTATÁN EN EL  
SITIO DE PRESA AGUA VIVA**

**Por:**

***JACKELINE C. PEÑA SUÁREZ***

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

**Trabajo de Grado para optar al Grado de Magíster Scientiae en Desarrollo de los  
Recursos Aguas y Tierras, mención: “Planificación y Desarrollo de los Recursos  
Hidráulicos”**

**CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E  
INVESTIGACIÓN AMBIENTAL Y TERRITORIAL.  
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES.  
MÉRIDA- VENEZUELA  
Febrero 2017**

C.C Reconocimiento

## DEDICATORIA

A mis hermanas Dayana y Ginett, mi triunfo es el que anhelo para Ustedes.

A mis sobrinos Lucas y Nathalia, mis más preciados tesoros, a ustedes van dedicados mis logros para que les sirvan de ejemplo y sean mayores y mejores que los míos.

A todas y cada una de las personas que han formado parte en mi formación en todos estos años.

*Jackeline Peña*

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## AGRADECIMIENTOS

A Dios quien todo lo puede, que sin su presencia y su amor no logramos nuestros objetivos.

A mis padres Judith y Oswaldo, detrás de este logro están Ustedes, su apoyo, confianza y cariño. Nada podría ser mejor, Gracias por hacer realidad este sueño compartido, por alentarme hacer lo que quiero y ser como soy. Los amo.

A Marlim gracias por estar a mi lado en todo momento, por tu apoyo incondicional, mi amiga, mi hermana. Siempre juntas.

A la profesora Angela Henao, por su amistad, sus conocimientos, orientaciones, su manera de trabajar, su persistencia, su paciencia y su motivación han sido fundamentales para mi formación como investigador, sin su apoyo la investigación no se hubiese podido terminar.

Al profesor Jesús Mejías por su paciencia y disposición, además su orientación constante, conocimientos y sugerencias fueron esenciales para concluir con éxito esta investigación.

Al profesor Luis Mora a quien agradezco por su orientación y apoyo en este trabajo. De igual manera, por su amistad y compromiso incondicional.

A Roy por ser la persona que ha compartido el tiempo a mi lado, porque en su compañía las cosas malas se convierten en buenas, la tristeza se transforma en alegría y la soledad no existe. Gracias por todo.

Al personal docente del CIDIAT, por su amistad y los conocimientos brindados sin mezquindad durante todo el proceso. De manera muy especial a la profesora María Alejandra, a Carolina, al profesor Hervé y al profesor José Gregorio.

A todo el personal del CIDIAT por su colaboración en todo momento y por brindarme un ambiente amigable durante toda mi estadía en la institución de manera muy especial a la Sra. Tibayre, a Linet, a la Sra. Dorys y a la profesora Silvia.

A quienes creyeron en mí....

A todos, muchas Gracias.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	vii
AGRADECIMIENTOS.....	viii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABLAS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
<b>CAPÍTULO 1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. General.....	3
1.3.2. Específicos.....	3
1.4. Justificación.....	3
1.5. Alcances.....	3
1.6. Limitaciones.....	4
<b>CAPÍTULO 2. MARCO REFERENCIAL.....</b>	<b>5</b>
2.1. Antecedentes.....	5
2.2. Modelos de simulación hidrológica empleados en la zona.....	6
2.3. Experiencias de simulación hidrológica usando el modelo WEAP.....	7
<b>CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
3.1. Sistema hidrológico general y regional.....	13
3.2. Cuenca hidrográfica.....	15
3.2.1. Tipos de cuenca.....	15
3.3. Modelos hidrológicos.....	16
3.3.1. Elementos de un modelo de simulación.....	17
3.3.2. Utilidad de los modelos en hidrología.....	18
3.3.3. Protocolo para el desarrollo de un modelo.....	19
3.3.4. Avances académicos producidos durante el desarrollo de un modelo.....	19
3.3.5. Clasificación de los modelos hidrológicos.....	20
3.4. Calibración de los parámetros del modelo.....	23
3.5. Validación del modelo.....	26
3.6. Revisión de los principales modelos que permiten la simulación hidrológica continua.....	26
3.6.1. Modelo SWAT.....	27
3.6.2. Modelo AQUATOOL.....	27
3.6.3. Modelo de Simulación Hidrológica Mensual (SIHIM).....	28
3.6.4. Sistema de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP).....	32
3.6.5. El WEAP y la planificación.....	39

3.7. Análisis comparativo entre los modelos de simulación hidrológica.....	41
3.7.1. Criterio económico.....	41
3.7.2. Criterios operativos.....	42
3.7.3. Criterios técnicos.....	43
3.7.4. Otras características que se desprenden de la revisión.....	44
3.8. Selección del modelo WEAP.....	44
<b>CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>47</b>
4.1. Ubicación de la cuenca hidrográfica.....	47
4.2. Aspectos físico – naturales.....	47
4.2.1. Clima.....	47
4.2.2. Geología y geomorfología.....	49
4.2.3. Hidrología.....	52
4.2.4. Suelos.....	54
4.2.5. Zonas de vida.....	54
4.2.6. Vegetación.....	54
4.3. Descripción de la subcuenca Carache.....	55
4.3.1. Clima.....	55
4.3.2. Relieve y geomorfología.....	57
4.3.3. Geología.....	58
4.3.4. Hidrología.....	59
4.3.5. El medio biótico.....	59
<b>CAPÍTULO 5. MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>61</b>
5.1. Tipo de investigación.....	61
5.2. Diseño de la investigación.....	61
5.3. Técnicas de recolección de la información.....	61
5.4. Etapas de la investigación.....	62
5.4.1. Recopilación de información existente.....	62
5.4.2. Diagnostico.....	62
5.4.3. Procesamiento de la información recopilada.....	63
5.4.4. Creación del modelo.....	63
5.4.5. Calibración y validación del modelo.....	63
5.4.5.1. Calibración del modelo WEAP	63
5.4.5.2. Validación del modelo WEAP	64
5.4.6. Corridas del modelo, simulación hidrológica y calibración automática (Pest de calibración).....	64
5.4.6.1. Corridas del modelo WEAP.....	64
5.4.6.2. Simulación hidrológica.....	64
5.4.6.3. Calibración automática.....	64
5.4.7. Comparación entre el modelo WEAP y SIHIM.....	65
5.4.8. Análisis de los resultados.....	65
5.4.9. Elaboración de las conclusiones y recomendaciones.....	65

<b>CAPÍTULO 6. SIMULACIÓN HIDROLÓGICA.....</b>	<b>67</b>
6.1. Desarrollo de actividades para la modelación hidrológica.....	67
6.1.1. Digitalización de la cuenca del río Motatán.....	67
6.1.2. Selección del periodo de registro para efectuar la calibración del modelo WEAP.....	67
6.1.3. Selección de las estaciones medidoras de precipitación.....	67
6.1.4. Selección del método de simulación hidrológica en WEAP.....	68
6.2. Creación del modelo.....	68
6.2.1. Configuración de la cuenca.....	68
6.2.2. Datos de entrada para el modelo.....	68
6.2.3. Usos del suelo.....	73
6.3. Calibración, validación y análisis de sensibilidad.....	73
6.3.1. Criterios de eficiencia del modelo.....	73
6.3.2. Calibración del modelo WEAP.....	73
6.3.3. Análisis de los parámetros agronómicos/hidrológicos alcanzados durante el proceso de calibración.....	75
6.3.4. Salidas del modelo.....	81
6.3.5. Validación del modelo.....	82
6.3.6. Análisis de sensibilidad de los parámetros agronómicos/hidrológicos.....	84
6.4. Resultados de la simulación empleando el modelo SIHIM.....	100
6.5. Comparación entre el modelo de simulación mensual (SIHIM) y el modelo WEAP.....	102
6.5.1. Semejanzas.....	102
6.5.2. Diferencias.....	103
6.5.3. Entradas solicitadas por SIHIM.....	103
6.5.4. Entradas solicitadas por WEAP.....	103
6.5.5. Calibración de los modelos de simulación.....	104
6.5.6. Salidas y evaluaciones de los modelos de simulación.....	104
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>111</b>
7.1. Conclusiones.....	111
7.2. Recomendaciones.....	114
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>115</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
3.1	Ciclo hidrológico general.....	14
3.2	Conceptualización del sistema hidrológico general.....	15
3.3	Conceptualización del sistema hidrológico regional.....	16
3.4	Pasos en el protocolo de desarrollo de un modelo.....	20
3.5	Ejemplo que muestra dos grados de discretización para una cuenca hidrográfica.....	23
3.6	Ecuación Nash Sutcliffe (E).....	24
3.7	Ecuación Bias.....	25
3.8	Ecuación coeficiente de correlación lineal.....	25
3.9	Diagrama de bloques donde se muestran las salidas del modelo.....	31
3.10	Ecuación del almacenamiento superior del tanque.....	33
3.11	Ecuación de la lluvia .....	33
3.12	Ecuación almacenamiento de la humedad en dos capas de suelo	33
3.13	Ecuación del escurrimiento superficial y del interflujo del almacenamiento superior del tanque.....	34
3.14	Ecuación del balance de masa para el segundo almacenamiento.....	34
3.15	Ecuación del flujo base.....	34
3.16	Ecuación de la percolación desde el almacenamiento superior del acuífero....	34
4.1	Ubicación relativa del área de estudio.....	48
4.2	Ubicación de las estaciones de precipitación y temperatura en el área de estudio.....	50
4.3	Subcuenca del río Carache representada en líneas verticales.....	55
5.1	Delimitación de la cuenca del río Motatán y subdivisión en las subcuencas Carache y Motatán.....	62
6.1	Entrada de datos de precipitación de la estación Escuque para la subcuenca Motatán.....	69
6.2	Entrada de datos de precipitación de la estación Guamas de Monay para la subcuenca Carache.....	70
6.3	Entrada de datos de temperatura promedio mensual de la estación Guamas de Monay.....	70
6.4	Entrada de datos de temperatura promedio mensual de la estación Aeropuerto-Valera.....	71
6.5	Calibración usando el modelo Pest.....	75
6.6	Calibración automática de los valores observados y simulados en WEAP.....	76
6.7	Calibración. Series de parámetros observados y simulados para el periodo hidrológico 1942-1960.....	79
6.8	Calibración. Correlación entre los caudales observados y simulados para el periodo hidrológico 1942-1960.....	80
6.9	Valor promedio mensual de caudales simulados y observados para el periodo	

	hidrológico 1942-1960.....	81
6.10	Escorrentía total generada durante el proceso de calibración.....	82
6.11	Validación. Series de caudales simulados y observados en el punto de cierre del la cuenca del río Motatán.....	83
6.12	Validación. Correlación entre los caudales simulados y observados para el periodo 1961-1970.....	83
6.13	Valor promedio mensual de caudales simulados y observados para el periodo de validación 1961-1970.....	84
6.14	Variación mensual de la escorrentía.....	86
6.15	Variación total de la escorrentía simulada.....	86
6.16	Variación del flujo base.....	87
6.17	Variación mensual de la escorrentía simulada.....	88
6.18	Variación total de la escorrentía simulada.....	88
6.19	Variación del flujo base.....	89
6.20	Variación mensual de la escorrentía simulada.....	90
6.21	Variación total de la escorrentía simulada.....	91
6.22	Variación del flujo base.....	91
6.23	Variación mensual de la escorrentía simulada.....	92
6.24	Variación total de la escorrentía simulada.....	93
6.25	Variación del flujo base.....	93
6.26	Variación mensual de la escorrentía simulada.....	94
6.27	Variación total de la escorrentía simulada.....	95
6.28	Variación del flujo base.....	95
6.29	Variación mensual de la escorrentía simulada.....	96
6.30	Variación total de la escorrentía simulada.....	96
6.31	Variación del flujo base.....	97
6.32	Variación mensual de la escorrentía simulada.....	98
6.33	Variación total de la escorrentía simulada.....	98
6.34	Variación del flujo base.....	99
6.35	Variación mensual de la escorrentía simulada.....	99
6.36	Variación total de la escorrentía simulada.....	100
6.37	Gráfico de valores mensuales de escorrentías simuladas y observadas en el modelo SIHIM. Fuente: Mejías (2005).....	106
6.38	Escorrentías totales simuladas para las subcuencas.....	106
6.39	Curva de duración de caudales para el periodo de calibración modelo WEAP.....	107
6.40	Curva de duración de caudales del SIHIM.....	108

## LISTA DE TABLAS

	<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
3.1	Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe.....	25
3.2	Variables de entrada requeridas para el modelo SIHIM.....	30
4.1	Información acerca de las estaciones meteorológicas seleccionadas.....	49
4.2	Estaciones pluviométricas instaladas en la subcuenca del río Carache y sus alrededores.....	57
4.3	Valores de temperatura media anual para siete estaciones localizadas dentro de la subcuenca del río Carache.....	57
4.4	Estación hidrométrica del río Carache	57
4.5	Caudales mensuales del río Carache en m <sup>3</sup> /s	59
6.1	Usos de suelo y parámetros agronómicos/hidrológicos para cada unidad.....	72
6.2	Usos de suelo y parámetros agronómicos/hidrológicos para cada unidad.....	72
6.3	Valores de los parámetros agronómicos/hidrológicos en los que el modelo tuvo un buen ajuste entre la escorrentía simulada y la observada.....	76
6.4	Valores de los parámetros agronómicos/hidrológicos en los que el modelo tuvo un buen ajuste entre la escorrentía simulada y la observada.....	77
6.5	Escorrentía observada y simulada en m <sup>3</sup> /s durante el periodo de calibración.....	81
6.6	Valores finales de los parámetros del modelo SIHIM.....	100
6.7	Resultados intermedios, en mm, total para el periodo: 1955-1970.....	101
6.8	Resultados intermedios, en mm, total para el periodo: 1955-1970.....	101
6.9	Caudales observados y simulados usando el modelo SIHIM.....	101

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
**CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN AMBIENTAL Y**  
**TERRITORIAL**  
**Maestría en Desarrollo de los Recursos Aguas y Tierras, Mención: “Planificación y Desarrollo de**  
**los Recursos Hidráulicos”**

**ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE USO DEL MODELO HIDROLÓGICO WEAP DENTRO DEL**  
**PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS DE LA CUENCA DEL**  
**RÍO MOTATÁN EN EL SITIO DE PRESA AGUA VIVA**

**Autor:** Jackeline C. Peña Suárez

**Tutor:** Dra. Angela Henao.

**Co-Tutor:** MSc. Jesús Mejías

**RESUMEN**

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el potencial del modelo WEAP para la simulación hidrológica, usando como caso de estudio la cuenca del río Motatán en el sitio de presa Agua Viva en el estado Trujillo. Esta cuenca se encuentra ubicada en la parte occidental de Venezuela, con una superficie aproximada de 4454 km<sup>2</sup>. Se realizó la revisión de los principales modelos de simulación, tales como: HEC-HMS, HSPF, SWAT, AQUATOOL, MODFLOW, SIHIM y WEAP, considerando las características más relevantes de cada uno de ellos, como la información de entrada, las capacidades del modelo, limitaciones y salidas. Luego se hizo un análisis comparativo entre cada uno de ellos, referido a criterios económicos, operativos y técnicos. Se observó que WEAP cuenta con grandes potencialidades proporcionando herramientas para la planificación integral de los recursos hídricos, incluidos el análisis de políticas de gestión. Es un instrumento efectivo para examinar diferentes escenarios que facilitan la gestión de los recursos hídricos, y que además en Venezuela no se tiene conocimiento de estudios serios que hayan usado la herramienta WEAP, hecho que junto a sus bondades influyó en su uso en esta investigación. Se realizó la simulación hidrológica de la cuenca del río Motatán utilizando el método lluvia-escorrentía, específicamente el método de la humedad del suelo. Para la simulación hidrológica, el área de estudio se subdividió en dos subcuencas, identificadas como río Carache y Motatán, respectivamente; la suma de las escorrentías generadas por estas dos fueron comparadas con los datos históricos de la estación hidrométrica en Agua Viva, la cual constituye el punto de cierre de la cuenca. Para la calibración y validación del modelo, se usó el período 1942-1970, se evalúa el modelo utilizando el coeficiente de correlación lineal, el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el Bias o sesgo, obteniéndose para los mismos, valores de 0,80; 0,60 y 4%, respectivamente, que lo definen como un modelo hidrológico de un buen funcionamiento. La escorrentía generada por WEAP, resultó ser muy similar a la que generó Mejías (2005), cuando calibro un modelo exclusivo para estimar escorrentía, tal como el SIHIM, en la mismas condiciones de área de estudio, punto de cierre e información básica. Se concluye del análisis efectuado, que WEAP constituye una herramienta válida, útil, atractiva, fácil de usar, y además gratuita, que ofrece muchas posibilidades aún no exploradas, y por lo tanto debiera quedar en carpeta para aplicaciones posteriores en este tipo de estudios a nivel de cuencas, logrando con esto mejorar la planificación y gestión del recurso hídrico en la misma.

**Palabras clave:** Modelos, escorrentía, simulación, calibración, validación, cuenca, WEAP.

## CAPÍTULO 1

### EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1. Introducción

El agua es un recurso indispensable para la vida y su disponibilidad presenta una limitación de acuerdo a la cantidad y calidad, con una desigual distribución espacio-tiempo, lo cual hace necesaria su planificación y regulación; esta situación ha generado una preocupación creciente por los temas ambientales, en especial por la contaminación de las aguas y los inevitables conflictos de uso que se presentarán en el futuro, es así como se ha conformado un panorama que favorece al incremento del interés por los temas hidrológicos.

Por otra parte el mejoramiento y aumento de la capacidad de los computadores y el apareamiento de nuevos programas que facilitan los cálculos y el análisis de los procesos físicos en la cuenca, han legitimado el desarrollo de nuevas herramientas hidrológicas, en especial modelos de simulación que admiten realizar tareas que anteriormente eran casi imposibles.

Es así como en los últimos años, los modelos hidrológicos se han desarrollado en gran cantidad, con el fin de que sean usados como herramienta para la planificación de los recursos hídricos. Generalmente todos los modelos se basan sobre los sistemas existentes y difieren entre sí, en términos de su manejo y la magnitud de los componentes que integran el proceso hidrológico de entrada al modelo.

Estos modelos representan de manera simplificada los sistemas hidrológicos reales, que facilitan el estudio causa-efecto de una cuenca a través de los datos de entrada y salida, permitiendo un mejor entendimiento de los procesos hidrológicos que se dan dentro de la cuenca y la posterior planificación del recurso hídrico de manera sustentable.

Por todas las consideraciones hechas hasta ahora, es que se plantea ésta investigación, cuyo objetivo principal es la selección del modelo Water Evaluation And Planning System (WEAP), de esa lista de modelos desarrollados para simulación hidrológica en cuencas y estudiar su viabilidad, facilidad en el manejo de su aplicación, así como su flexibilidad y su potencial en el uso de la planificación de los recursos hidráulicos en la cuenca del río Motatán a nivel de la presa de Agua Viva, estado Trujillo, estableciendo comparaciones con los resultados que genera otro modelo escogido de esa lista como lo es el de Simulación Hidrológica Mensual (SIHIM).

Con el propósito de promover el uso del modelo WEAP en la planificación de los recursos hídricos en cuencas, con el fin de proponer la adecuada protección, optimización, manejo y

distribución del recurso agua para alcanzar la satisfacción de las demandas, el equilibrio en el manejo del recurso hídrico y la armonización del desarrollo regional.

## 1.2. Planteamiento del problema

Los seres humanos han estado batallando con la escasez de agua desde hace muchos años, pero ha sido la humanidad quien ha causado este inconveniente y lo ha hecho a través del mal uso que le da a este recurso.

La planicie aluvial del río Motatán localizada al occidente del país, en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, no escapa de esta situación. A pesar que la cantidad de agua en la zona es suficiente para satisfacer las necesidades de la población, se presentan en el lugar dos inconvenientes: primero, el agua se encuentra distribuida en forma desigual y segundo, la demanda aumenta de manera muy acelerada con el crecimiento de la población. A esto se agrega el mal uso del recurso en actividades relacionadas con el riego y sus prácticas.

La creciente demanda de agua lleva a la explotación cada vez más intensiva del acuífero. En estos casos, se ha considerado nuevamente el recurso como permanente, renovable e inagotable, creencia que ha incitado a su uso excesivo, ocasionando el agotamiento del acuífero, al ser mayores las tasas de extracción que las de recarga de los mismos. Este hecho tiene diversas implicaciones que van más allá del simple agotamiento del recurso, pues conlleva a fenómenos de subsidencia, creciente contaminación de aguas y descenso de la capa freática.

En tal sentido, las instituciones encargadas de planificar los recursos hídricos en cuencas hidrológicas, en busca de aumentar el conocimiento que tienen del recurso agua dentro de la cuenca para garantizar la utilización sostenible del mismo, tienen la necesidad de hacer uso de modelos de simulación, que permitan una visión clara para la planificación del recurso hídrico.

Es con la presentación del modelo agregado conceptual Stanford Watershed Model (Crawford y Lindsay, 1996), cuando se inicia el desarrollo de muchos modelos, partiendo de los más simples, modelos lineales con parámetros concentrados, hasta los más complejos, modelos no lineales con parámetros distribuidos. Por ende se puede afirmar que los modelos son de diferentes tipos y fueron desarrollados para distintos propósitos.

Entendiendo la importancia de la situación planteada, la presente investigación se basó en el estudio de uno de estos modelos de simulación, como lo es el modelo WEAP, analizando la viabilidad de su implementación en la planificación de los recursos hidráulicos, en lo que respecta a la generación de caudales, caso cuenca del río Motatán del estado Trujillo, en el sitio de ubicación de la presa Agua Viva.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. General

Analizar el potencial del modelo WEAP para la simulación hidrológica, usando como estudio de caso la cuenca del río Motatán en el sitio de presa Agua Viva en el estado Trujillo.

#### 1.3.2. Específicos

- Evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca con el modelo WEAP.
- Comprobar la facilidad y flexibilidad de uso del modelo.
- Analizar las diferencias entre los modelos WEAP- SIHIM
- Analizar y discutir la potencialidad de este modelo y modelos similares dentro de la planificación de los recursos hídricos.

### 1.4. Justificación

Partiendo de que el agua es fundamental para la vida y no tiene sustituto, es de gran importancia su manejo por medio de estrategias de planificación, siendo esta una poderosa herramienta que permite proponer el uso del agua de manera sustentable.

Un modelo hidrológico ofrece muchos beneficios para entender mejor y representar el comportamiento de la cuenca hidrográfica. El más importante de destacar es, que se puede tomar como una herramienta de análisis y planificación, que permite evaluar situaciones alternativas previas de apoyo básico para la toma de decisiones, permitiendo visualizar el comportamiento de la cuenca frente a diferentes impactos, sin tener que esperar que ocurran para saber la respuesta que tendrá el sistema.

Es por esto que se planteó para esta investigación seleccionar el WEAP, entre la gran variedad de modelos hidrológicos que se han desarrollado para analizar su viabilidad en la generación de escurrimiento confiable, y con ello certificar que puede ser de uso adecuado durante el proceso de la planificación de los recursos hidráulicos, en este caso se mide su potencialidad en la cuenca del río Motatán, a nivel del sitio de presa Agua Viva, en el estado Trujillo.

### 1.5. Alcance

El estudio se basó en la aplicación del modelo de simulación WEAP, para la determinación de caudales producidos por la cuenca del río Motatán, dividiéndola para su estudio, en dos subcuencas, río Carache y Motatán, respectivamente, las cuales presentan características físico

naturales con diferencias marcadas, que justifican ser separadas para la estimación de caudales.

Los caudales generados en ambas subcuencas por el modelo calibrado, se suman y luego se hace la comparación con los registros históricos, medidos en la estación hidrométrica ubicada a nivel del embalse Agua Viva.

Es importante tener una buena estimación de gastos en este sitio específico, porque el embalse es fundamental para la irrigación de gran parte de la planicie aluvial del río Motatán, zona considerada potencia para el desarrollo del estado Trujillo, es por esto y por su extensión que la cuenca del río Motatán es considerada la más importante del estado Trujillo.

El estudio será abordado de manera tal que, a partir de su desarrollo permita el conocimiento, comprensión, análisis y aplicación del modelo WEAP, enfocado hacia la viabilidad de su uso en procesos de planificación de los recursos hidráulicos en la cuenca del río Motatán del estado Trujillo.

En primer lugar se realiza la evaluación de la información contenida en los registros de las estaciones meteorológicas, Guamas de Monay para la subcuenca Carache y la estación Escuque para la subcuenca Motatán, que permitan construir el archivo de entrada al modelo WEAP. Luego se elabora un mapa conceptual hidrológico de la zona, que posteriormente permite modelar, obteniendo así los caudales simulados, cuyos resultados se comparan con los históricos y los obtenidos en investigaciones anteriores, simulados usando el modelo SIHIM; esto permite establecer comparaciones en cuanto a la facilidad y flexibilidad del uso entre ellos, analizando y discutiendo su potencialidad en el uso de la planificación de los recursos hidrológicos en la cuenca del río Motatán.

## 1.6. Limitaciones

Los inconvenientes que pudieran presentarse durante la investigación, están concentrados en la gran cantidad de información básica que requieren algunas subrutinas de WEAP, el desconocimiento en el país del manejo del modelo WEAP. Por otro lado, la extensión de registros históricos de los parámetros meteorológicos y de escorrentía, problema muy particular en nuestro país, en cual lejos de incrementarse la red de medición, la misma se ha reducido drásticamente en los últimos años.

## CAPÍTULO 2

### MARCO REFERENCIAL

#### 2.1. Antecedentes

El Grupo de Investigación de Suelos y Aguas (GISA) del NURR-ULA (1997) efectuó una recopilación de los resultados obtenidos en evaluaciones realizadas por MARNR (1970), CORPOANDES – ECOSA (1975) y ERSHT (1996) sobre la totalidad de los recursos hídricos disponibles para el desarrollo integrado de la zona baja del estado Trujillo, los cuales están representados por las aguas superficiales y subterráneas allí existentes. Obtuvieron que la red hidrográfica del sector donde, está representada por cursos de agua con régimen permanente destacándose principalmente el río Motatán con un caudal medio de 34,84 m<sup>3</sup>/s.

En cuanto al río Motatán – Carache, según los registros existentes en el departamento de hidrografía del MARNR (1970) citado por GISA (1997), presenta un gasto medio de 75,2 m<sup>3</sup>/s para el periodo 1966-1970. Sin embargo, una simulación del balance hidrológico del lago de Maracaibo realizada por la Universidad del Zulia (1986), citada por Caura (1997), determinó para el periodo 1973-1983, un caudal medio de 42,1 m<sup>3</sup>/s. Se caracteriza por presentar periodos de aguas altas y estiaje, consecuentemente con el patrón y régimen de pluviosidad bimodal característico de la región.

Se señala que las aguas subterráneas en el delta del río Motatán existen cuatro zonas hidrológicas:

Al este en la zona de los conos del piedemonte la infiltración es importante y que ocurre sobre todo desde el fondo de los lechos de los ríos y es susceptible de alimentar una capa semiprofunda, debajo de los aluviones recientes.

A lo largo de los ríos y caños que atraviesan la zona deltaica, la infiltración existe, pero es lenta y poco profunda. En caso de precipitaciones intensas hay desagües en la superficie hacia las depresiones.

En las zonas deprimidas y arcillosas del delta en particular en la zona marginal del lago y en la depresión noreste, la infiltración es imposible, la saturación superficial es permanente y las inundaciones son frecuentes y prolongadas.

Por otra parte en las zonas deprimidas y arcillosas del delta, en particular en la zona marginal del lago y en la depresión noreste, destacan que la infiltración es imposible; la saturación superficial es permanente, resultando las inundaciones, frecuentes y prolongadas.

## 2.2. Modelos de simulación hidrológica empleados en la zona

CIDIAT (1992) realizó el estudio a nivel de prefactibilidad sobre la Planificación del Uso y Evaluación del Embalse Agua Viva, teniendo como objetivo principal la planificación del aprovechamiento integral de este embalse, mediante el mejor uso de los recursos de agua y suelos. Para la ejecución de este trabajo se realizó la caracterización integral del área, luego se demarcó de acuerdo a los estudios de suelo la zona potencial de desarrollo agrícola de la planicie alcanzando una superficie de 58704 ha y se definieron las etapas de riego. Posteriormente se planificó el aprovechamiento agrícola del embalse Agua Viva, para esto se definieron dos escenarios. El escenario I, el cual suponía continuar con el patrón predominante de cultivos en la zona y el escenario II planteaba producir un cambio en el patrón actual de acuerdo a la política agrícola nacional. Se definieron las demandas agrícolas al embalse, así como las demandas para uso urbano, demanda ecológica y demanda recreativa.

Con las demandas y las disponibilidades de agua del reservorio, se procedió a realizar los movimientos de embalse para determinar el área potencial a irrigar para cada alternativa.

Realizados los movimientos de embalse, se compararon otras alternativas diferentes de aprovechamiento. De estas, el aprovechamiento del embalse tanto la I como II etapa supera al uso de fuentes subterráneas y a la derivación directa del río Motatán sin uso de la presa.

En cuanto a los requerimientos de agua del embalse de Agua Viva estos eran originados para los usos proyectados del Embalse y en este caso para satisfacer en principio las demandas de riego que se originan del uso de la planicie de Motatán y como usos secundarios se consideraron el abastecimiento urbano, hidroelectricidad, requerimientos ecológicos entre otros.

En este plan se hace mención especial al análisis del manejo de conservación de la cuenca del río Motatán dicho análisis se refiere a un conjunto de medidas en la cuenca que tienen por finalidad reducir el impacto ambiental de esta sobre el embalse, específicamente en los sedimentos que reducen la vida útil. Para tal fin se estimó la producción de sedimentos actual, se determinaron, dimensionaron y estimaron costos de prácticas de conservación de suelos. Adicionalmente, se discutió sobre programas de extensión conservacionista, capacitación de técnicos y educación ambiental, como medidas complementarias a realizar en la cuenca.

En cuanto a la metodología para la estimación de la demanda de riego, esta se utilizó la propuesta por la FAO a través del uso del programa IRSIS (Irrigation Scheduling Information System), desarrollado por la Universidad Católica de Lovaina, Bélgica. Se determinó que las demandas de agua para uso pecuario son despreciables en comparación a las demandas para riego del pasto.

Las demandas para uso urbano (demandas aguas arriba del embalse), según este plan la fuente de abastecimiento del sistema proviene directamente del río Motatán, siendo mucho mayor las demandas agrícolas que las demandas urbanas.

Se estimó la población de la zona para el año 2015 en 67.267 habitantes, la cual requerirá suponiendo una dotación de 350 lpd de una entrega de agua de 272,5 lps. Se recomendó para el abastecimiento de la población la construcción de pozos en las cercanías de las mismas.

En este estudio se estimó un 10 % del caudal medio anual como el caudal ecológico de la región. El caudal medio anual del río Motatán en agua viva es de 34,84 m<sup>3</sup>/s y el caudal ecológico a utilizar como demanda del río se fijó en 3,5 m<sup>3</sup>/s.

Por su parte, Mejías (2005) realizó la evaluación de la disponibilidad de agua subterránea en la planicie aluvial del río Motatán, mediante la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual, aplicando técnicas geoestadísticas para el estudio de variables espaciales, en el caso particular de espesores litológicos y niveles piezométricos. Para esto realizó la simulación de la escorrentía generada en la cuenca del río Motatán específicamente aguas arriba del Embalse Agua Viva utilizando el modelo de Simulación Hidrológica Mensual (SIHIM). El modelo fue calibrado, alcanzándose un coeficiente de correlación lineal de 0,943 y una diferencia de 0,22 % en volumen entre la escorrentía simulada y observada. El autor concluye que el modelo SIHIM explica en un 94%, la escorrentía generada en la cuenca.

Huiza (1987) realiza un balance preliminar con fines de disponibilidad y demandas de agua en la cuenta alta del río Motatán en una superficie de 29.686 ha, a través del método isoyético, determinando la precipitación media anual para la cuenca en un valor de 842 mm. Estimó una lámina de escorrentía media anual igual a 253 mm (253x10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>), un volumen de escorrentía media anual de 75.105.580 m<sup>3</sup> y un caudal medio anual de 2.382 l/s.

Las demandas por distintos usos produjeron los siguientes resultados; el uso agrícola 1.315 l/s, uso residencial 488 l/s y el uso turístico 2,08 l/s Generándose un consumo estimado de 1.805 l/s que en comparación con la disponibilidad total, el caudal efectivo anual para la cuenca se reduce a 577 l/s.

El Atlas Hidrológico elaborado por Terán (2009) en la cuenca del río Motatán, presenta un resumen de las actividades ejecutadas para el desarrollo de mapas temáticos de la cuenca y del acuífero de la planicie aluvial del río Motatán. Los mapas fueron digitalizados en formato de un Sistema de Información Geográfica (SIG). La información sintetizada se presenta en forma digital para el fácil manejo futuro de la información espacial. Para fines del presente estudio se obtuvo de este Atlas, el área de la subcuenca Carache.

### 2.3. Experiencias en simulación hidrológica usando el modelo WEAP

Monge (2007) elaboró un documento en el cual presentó el desarrollo de la modelación hidrológica realizada para la cuenca del río Jiboa con la aplicación del modelo WEAP, además del análisis de los escenarios de cálculo de demandas domésticas y agrícolas de los recursos hídricos.

Para esto se precisaron los parámetros físicos e hidrológicos del área como la demanda poblacional, la demanda agrícola, la precipitación media mensual, caudales promedios mensuales del río Jiboa, evapotranspiración promedio de la cuenca, infiltración del agua en el terreno hacia el acuífero y la capacidad del mismo.

Fue posible determinar a través del modelo WEAP que las demandas de aguas poblacionales siguen una tendencia rápida y creciente y en el caso del riego, y analizar que aunque la tasa de crecimiento es pequeña por las condiciones de vulnerabilidad en la zona, su influencia es muy alta en las demandas totales.

Se indicaron las proyecciones de demandas de agua anuales totales para cada cinco años en el área de este estudio, y se observó un crecimiento elevado del año 2000 al 2010. Se resalta que la condición de la reducción de la tasa de requerimientos de agua para los últimos diez años de la simulación, se definió bajo el supuesto de que la demanda agrícola alcanza su máximo potencial de desarrollo en el 2012, repercutiendo esto en una disminución en la tasa de crecimiento de requerimientos totales de agua.

En este estudio se determinó el almacenamiento máximo del acuífero existente en la zona y fue comparada con la considerada con el Plan Maestro de Desarrollo y Abastecimiento de los Recursos Hídricos de El Salvador (1980), observándose un escenario preocupante de sobreexplotación del acuífero.

En cuanto a la validación de los resultados generados por la simulación de la demanda, se realizó una comparación entre los resultados presentados por el estudio Diseño del Módulo de la Demanda (2007) de la cooperación entre NIPPON KOEI CO, LTD, ANDA Y SNET y los resultados usando WEAP, observándose que los resultados obtenidos por este modelo son muy buenos y cercanos a los obtenidos en el estudio de diseño del módulo de la demanda.

Se concluye que el modelo WEAP es muy útil en cuanto al análisis de las proyecciones de demandas, cuantificación del abastecimiento y capacidad de cobertura.

Vargas (2009), analizó los impactos del cambio climático en la cuenca andina del río Teno, usando el modelo WEAP, logra este objetivo a través del uso un modelo de simulación hidrológica WEAP. El modelo fue calibrado y validado a partir de datos históricos mensuales representativos de la cuenca, disponibles entre abril de 1975 y marzo de 2005.

Los parámetros calibrados y validados fueron utilizados para simular la disponibilidad futura del recurso a base de escenarios futuros de las variables meteorológicas de entrada (precipitación y temperatura), necesarias para la operación del modelo, derivados de datos obtenidos con el modelo PRECIS del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para el escenario A2 en los períodos 2036-2065 y 2071-2100. Los resultados mostraron una baja de los caudales medios mensuales futuros del río Teno de un 30% y 40% para los periodos 2036-2065 y 2071-2100, respectivamente; y un aumento en el número y prolongación de periodos secos en la cuenca, causados principalmente por la disminución de la precipitación anual y del aumento de la temperatura anual. A pesar de los cambios en las magnitudes del caudal, el régimen mixto nivo-pluvial del río Teno no varió sustancialmente, salvo un desplazamiento del caudal pico de primavera del mes de noviembre a diciembre.

Proaño (2010) realizó un trabajo de investigación sobre la modelación entre la oferta y la demanda hídrica de la cuenca alta del río Guayllabamba y en las cuencas que abastecen de agua a la ciudad de Quito, con la ayuda de la herramienta WEAP, a una escala de tiempo mensual, en un modelo semidistribuido. En este trabajo se consideró y representó, la variabilidad tempo-espacial de la respuesta hidrológica y del clima de la cuenca, tomando en cuenta las condiciones naturales y antrópicas de la misma. Fueron usados dos métodos de riego con el fin de realizar comparaciones entre ambos métodos de cálculo propuestos por WEAP y de esta forma escoger el que más se acople a la cuenca en estudio.

El autor concluye que al comparar los resultados de ambas representaciones de riego, el modelo de la humedad del suelo, no calcula de manera adecuada una demanda hídrica para los sectores que son regados, pero satisface el requerimiento hídrico solamente con la precipitación producida en esta zona, por lo que esta representación no es válida para este estudio, debido a que en la realidad los sistemas de riego de los diferentes perímetros de riego no funcionan de esta forma.

Riquelme (2010) cuantificó la variación que sufren las series de caudales medios mensuales, producto de los datos meteorológicos y configuraciones adoptadas en la modelación del río Pangal, el cual se encuentra ubicado en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile, usando el modelo de gestión WEAP.

Para el análisis de la variabilidad e incertidumbre de los resultados, consideró un conjunto de parámetros, siendo éstos: i) división espacial de la cuenca, ii) gradientes meteorológicos, iii) series alternativas futuras y iv) parámetros del modelo WEAP. Generados los gradientes en base a registros de estaciones existentes en el área de interés, y utilizando el modelo de humedad del suelo, implementó simulación hidrológica de la cuenca en WEAP, considerando tres escenarios consistentes en una, dos y seis bandas de altura, los cuales fueron calibrados y validados en el escenario actual utilizando el coeficiente de Nash Sutcliffe. Observó que a medida que la cuenca se modela de manera más concentrada, el valor del coeficiente disminuye desde 0,82 a 0,62, lo que se vio reflejado en una subestimación importante de los caudales del deshielo.

Los resultados de la modelación indicaron que al seleccionar de las 20 series generadas con cada gradiente, aquella con mayor disminución de precipitación y mayor aumento de la temperatura, produce un descenso promedio de los caudales medios anuales de un 16 %.

Reyes (2012) en su estudio de la proyección de variables hidrológicas diarias a largo plazo en la cuenca del río Tinguiririca en bajo Los Briones, con escenarios A1B y A2 de cambio climático, utilizó el modelo WEAP con solo dos variables forzantes, precipitación y temperaturas, dado que en la cuenca en estudio, la disponibilidad de registros de otras variables es pobre o inexistente. Para la calibración y validación del modelo WEAP, se utiliza el período 1988-1992. Con estos registros, se calibró y validó el modelo utilizando el índice de eficiencia, Nash-Sutcliffe, obteniendo coeficientes de determinación de 0,69 y 0,64, respectivamente.

Con el modelo WEAP calibrado y validado, simuló los caudales futuros para los períodos de mediano y largo plazo, comprendidos entre los años 2046-2065 y 2081-2100, respectivamente.

Los resultados de las proyecciones futuras bajo escenarios de cambio climático, se compararon con el período base modelado 1978-1992, para analizar la evolución de las variables hidrometeorológicas en estudio y determinar el efecto del cambio climático en la cuenca bajo los escenarios A1B y A2. Estos resultados se traducen en disminuciones progresivas de las precipitaciones, llegando a finales del siglo XXI a tener solo un 60 % de las precipitaciones de la línea base en ambos escenarios, mientras que el aumento de temperaturas llega a 3 °C, lo que tiene como consecuencia una disminución en los caudales en la cuenca, que llega a un 60 % de la actual como promedio para el período de largo plazo, lo que implica también, cambios en la distribución mensual de los caudales, presentándose un adelanto del período de deshielo y reducción del mismo.

Por su parte, Castro (2014) utilizó el software de modelación para la evaluación y planificación del agua con el fin de modelar el comportamiento hidrológico de las corrientes de las que se abastece la vereda La Bella para el servicio de riego (río Consota) y acueducto (quebradas Cabuyal y San Pablo) aplicando el método de lluvia-escorrentía de la FAO que ofrece WEAP; así mismo se generaron cuatro escenarios: calibración, caudales ecológicos, regulación captación San Pablo y reducción concesión acueducto, a partir de la información primaria que se obtuvo en el marco del proyecto. Para el escenario de calibración se observó una marcada diferencia entre el caudal modelado y el medido, concluyendo que puede atribuirse a la irregularidad de la información registrada por la REDH. Sin embargo, la proximidad entre los dos caudales durante el mes de marzo, también puede explicarse teniendo en cuenta la información suministrada por la REDH, lo cual demuestra que el caudal simulado sí estuvo ajustado a las condiciones reales de la zona.

Respecto a la demanda insatisfecha tras comparar los escenarios “Calibración” y “Regulación Captación San Pablo” se observó que en el primero, la demanda insatisfecha alcanzaba un 20 % aproximadamente con 7 l/s como máximo volumen, en el segundo ésta aumentó al 90 %, siendo el mayor volumen alcanzado de 11 l/s.

Y por último para el escenario de reducción de pérdidas se observó que disminuyendo las pérdidas en el sistema, la cobertura de la demanda aumenta comparado con el escenario de Calibración.

Labrador *et al* (2016) desarrolló un modelo para la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Aipe, Huila, Colombia utilizando el modelo WEAP, a fin de conocer el impacto de los escenarios de cambio climático sobre la oferta hídrica para el período (2011-2050), como herramienta para apoyar la toma de decisiones en la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Aipe, Huila, Colombia.

El modelo WEAP fue calibrado y validado comparado el caudal simulado y observado en el punto de cierre de la cuenca (estación: puente carretera). Los resultados muestran la

habilidad del modelo para simular el comportamiento hidrológico de la cuenca a escala diaria ( $R^2 = 0,75$ ). Respecto a la simulación de los escenarios, la línea base o datos históricos (1980-2011) permitieron estimar un caudal medio de  $15,31 \text{ m}^3/\text{s}$ , el escenario I estimó un caudal de  $14,88 \text{ m}^3/\text{s}$  (-2,81 %), el escenario II hace referencia a un cambio de clima de  $10,87 \text{ m}^3/\text{s}$  (-29 %), escenario III tendencia climática húmeda de  $18,98 \text{ m}^3/\text{s}$  (+23,97 %) y el escenario IV de  $5,24 \text{ m}^3/\text{s}$  (-65,77 %).

El autor concluye que el modelo hidrológico desarrollado representa una herramienta útil que asiste el proceso de planeamiento hidrológico a partir de escenarios multicriterios que tienen en cuenta los múltiples y opuestos usos del recurso hídrico. Además, el modelo contribuye a mejorar el sistema de gestión integral del recurso hídrico y apoyar la toma de decisiones, a través de conocimiento confiable de cómo responden las cuencas en términos hidrológicos, ante distintos escenarios climáticos y de demanda hídrica.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## CAPÍTULO 3

### MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Sistema hidrológico general y regional

En la Figura 3.1 se muestra la representación del ciclo hidrológico general, con el proceso de circulación del agua entre los distintos compartimientos de la hidrósfera. Se pudiera admitir que la cantidad total de agua que existe en la Tierra, en sus tres fases: sólida, líquida y gaseosa, se ha mantenido constante desde la aparición de la humanidad.

El agua de la Tierra que constituye la hidrósfera, se distribuye en tres reservorios principales: los océanos, los continentes y la atmósfera, entre los cuales existe una circulación continua. El movimiento del agua en el ciclo hidrológico es mantenido por la energía radiante del sol y por la fuerza de la gravedad.

La transferencia de agua desde la superficie de la Tierra hacia la atmósfera en forma de vapor de agua, se debe a la evaporación directa, a la transpiración por las plantas y animales y por sublimación (paso directo del agua sólida a vapor de agua).

El vapor de agua es transportado por la circulación atmosférica y se condensa dando lugar a la formación de nieblas, nubes y posteriormente a precipitación.

La precipitación puede ocurrir en la fase líquida (lluvia) o en la fase sólida (nieve o granizo), incluye también el agua que pasa de la atmósfera a la superficie terrestre por condensación del vapor de agua (rocío) o por congelación del vapor (helada) y por intercepción de las gotas de agua de las nieblas (nubes que tocan el suelo o el mar).

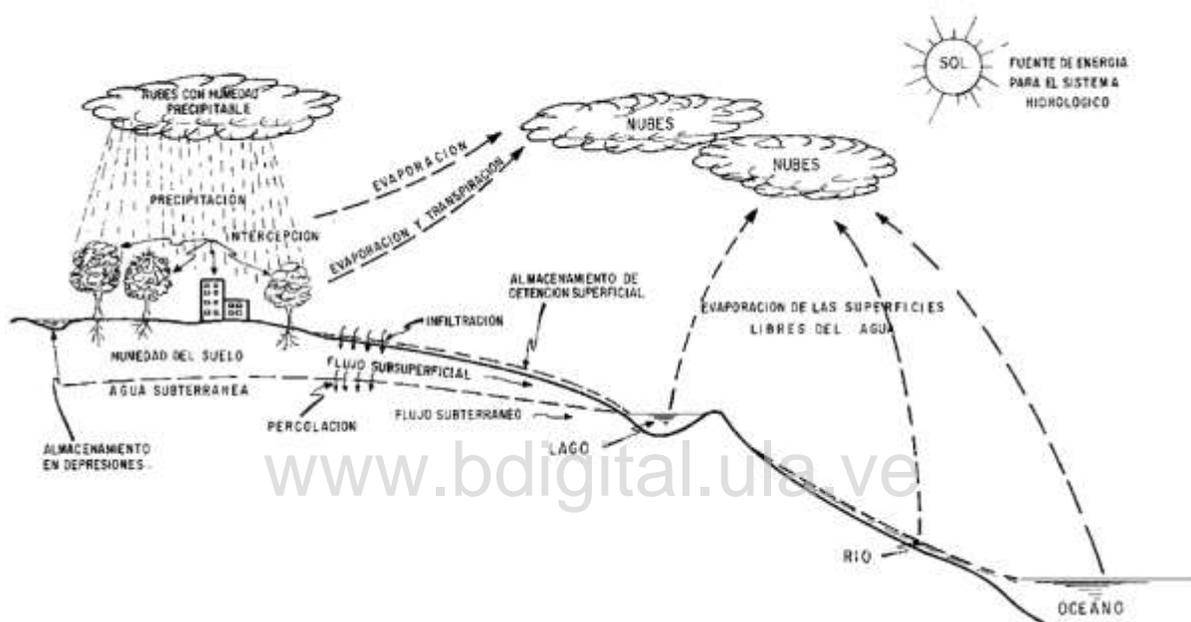
El agua que precipita en tierra puede tener varios destinos. Una parte es devuelta directamente a la atmósfera por evaporación; otra parte escurre por la superficie del terreno, escorrentía superficial, que se concentra en surcos y va a originar las líneas de agua.

Del agua que llega a la superficie del suelo, una parte se infiltra y el resto va a estar sujeto a la evaporación, al almacenamiento en las depresiones del terreno y al almacenamiento de detención superficial. De este último almacenamiento el agua puede escurrir y llegar al cauce de un río donde formará la escorrentía.

El agua que se infiltra pasa a formar parte del almacenamiento de humedad del suelo, de donde puede moverse por percolación hacia el almacenamiento del agua subterránea, fluir subsuperficialmente hacia el cauce de un río o hacia un punto donde puede reaparecer superficialmente, o estar sujeta a la evaporación y a la transpiración de las plantas.

El agua que llega al almacenamiento subterráneo puede salir a la superficie del suelo, al cauce de un río o a un lago como caudal base, o puede pasar por percolación profunda a un almacenamiento permanente del agua subterránea.

El escurrimiento, flujo subsuperficial y caudal base que forman la escorrentía de los ríos, eventualmente llega a los océanos completando de esta forma el ciclo hidrológico. Tanto el escurrimiento superficial como el agua subterránea alimentan los cursos de agua que desaguan en lagos y en océanos.



**Figura 3.1.** Ciclo hidrológico general. Fuente: Duque (1991)

Según Duque (1991) el sistema hidrológico general puede conceptualizarse en dos procesos fundamentales: uno de almacenamiento y el otro de transferencia de masa de agua entre los almacenamientos. A continuación se presenta la Figura 3.2 donde se muestra la representación conceptual del mencionado sistema, en donde aparecen los procesos de almacenamiento y de transferencia.

Entendiendo todo este proceso del sistema hidrológico general, se puede concluir que el mismo es aplicable a toda la superficie terrestre, sin embargo, en la mayoría de los casos las zonas de estudio se encuentran en áreas menos extensas y con límites bien definidos. En este caso se habla del sistema hidrológico regional, el cual es un subsistema del general.

A continuación se muestra en la Figura 3.3 la conceptualización del sistema hidrológico regional, en la cual su principal diferencia con respecto al general, son los procesos de entrada y salida del sistema. En esta figura se puede ver que el sistema hidrológico es un sistema

continuo regido por el principio de conservación de la masa, en donde las entradas y el sistema mismo dan cuenta de las cantidades de agua que constituyen sus salidas.

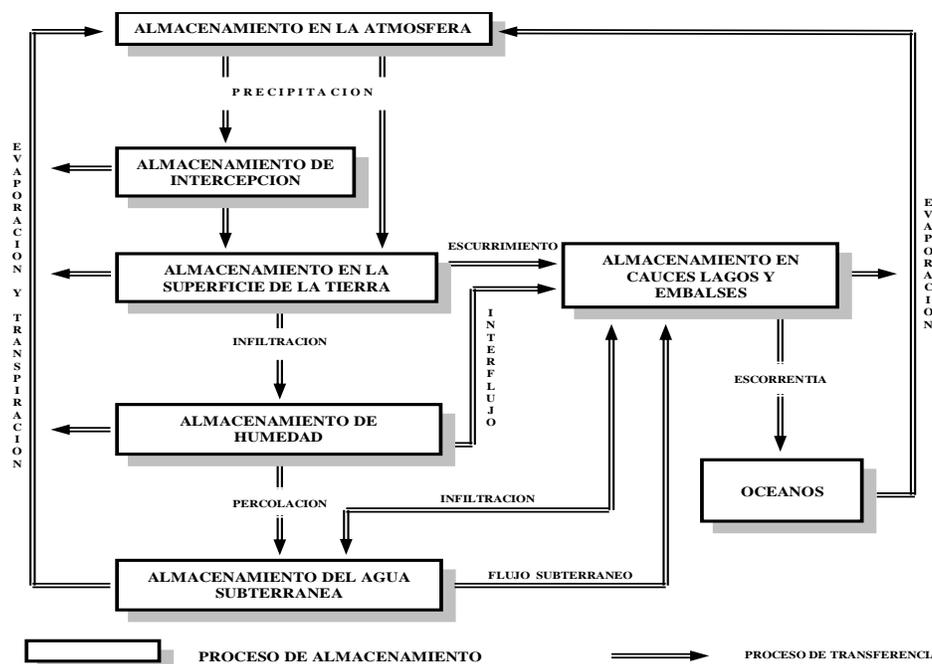


Figura 3.2. Conceptualización del sistema hidrológico general. Fuente: Duque (1991)

### 3.2. Cuenca hidrográfica

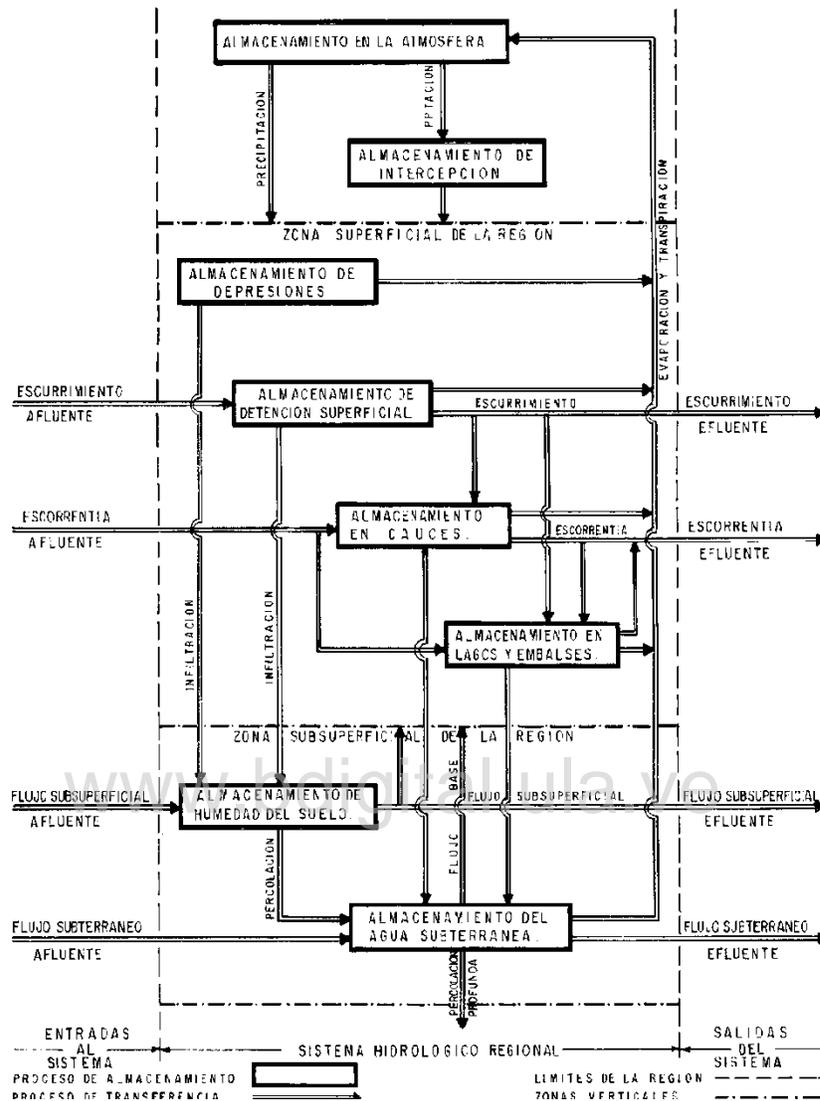
La cuenca hidrológica es la unidad básica de estudio de la hidrología. Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde las gotas de agua que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

Una cuenca hidrográfica y una cuenca hidrológica se diferencian en que la cuenca hidrográfica se refiere exclusivamente a las aguas superficiales, mientras que la cuenca hidrológica incluye las aguas subterráneas.

#### 3.2.1 Tipos de cuencas

Dependiendo de la dirección en la que drenan, las cuencas se pueden clasificar en:

- Cuenca Endorreica: Es la cuenca en la que el flujo va en dirección de un lago o almacenamiento, en esta el recurso hídrico no sale de la cuenca.
- Cuenca Exorreica: Es la cuenca en la que todos los flujos se dirigen a un cauce principal que está direccionado a un punto de salida de la cuenca, en esta el recurso hídrico sale de la cuenca.



**Figura 3.3.** Conceptualización del sistema hidrológico regional. Fuente: Duque (1991)

### 3.3. Modelos hidrológicos

Para evaluar la respuesta hidrológica de un sistema, regularmente es indispensable la elaboración de algún tipo de esquema, por medio del cual se pueda representar en forma simplificada, un sistema real; en otras palabras: un modelo. El mismo podrá ser utilizado para reconstruir eventos pasados y predecir futuros Puricelli, (2003).

Según Tucci (1998) “el modelo es la representación de algún objeto o sistema, en un lenguaje o forma de fácil acceso y uso, con el objetivo de entenderlo y poder generar sus respuestas para diferentes entradas” p. 18.

Un modelo hidrológico es una herramienta que la ciencia desarrolló para entender mejor y representar el comportamiento de la cuenca hidrográfica y prever condiciones diferentes a las observadas.”

Con la presentación del modelo agregado conceptual Stanford Watershed Model Crawford y Lindsay, (1996), se inició el desarrollo de muchos modelos, partiendo de los más simples modelos lineales con parámetros concentrados hasta los más complejos modelos no lineales con parámetros distribuidos. Por ende se puede afirmar que los modelos son de diferentes tipos y fueron desarrollados para distintos propósitos.

La simulación matemática es una técnica para producir una serie de eventos a través de expresiones matemáticas que representan las situaciones del mundo físico bajo estudio; las simulaciones generalmente son efectuadas por computadoras que aplican iterativamente esas expresiones, a partir de ciertas condiciones iniciales, y progresan en el tiempo, repitiendo las relaciones funcionales entre los diferentes elementos del sistema.

La simulación numérica de los procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca ha surgido como un método potencialmente útil para la previsión de eventos hidrológicos, y como una herramienta para mejorar notablemente la comprensión de tales procesos.

### 3.3.1. Elementos de un modelo de simulación

En el campo de la hidrología, los elementos de un modelo matemático pueden clasificarse en cuatro categorías:

- Componentes.
- Variables.
- Relaciones funcionales.
- Parámetros.

Componentes: son los elementos escogidos para integrar el modelo en función de los objetivos del mismo y de la importancia que se presume que estos elementos tengan sobre el sistema en conjunto; entre los componentes más comunes de modelos de simulación hidrológica se encuentran: lluvia, escurrimiento superficial, evapotranspiración, demanda de agua para consumo humano, demanda de agua para irrigación, reservas de agua en embalse, demandas de agua para otros fines (generación hidroeléctrica).

Variables: son una medida o representación cuantitativa de los componentes del sistema hídrico, que tienen representación espacial o temporal, entre estas se tiene: precipitación horaria dentro de un área específica, escurrimiento medio mensual en una sección, consumo

horario de agua potable, demanda mensual de agua para irrigación, demanda instantánea de una planta hidroeléctrica.

Pueden clasificarse estas variables dentro de tres grupos:

- Variables exógenas: son las variables independientes o de entrada al modelo y se suponen conocidas previamente, son independientes del sistema representado por el modelo, es decir actuantes en el sistema, pero no influidas por él. Estas variables se pueden representar de dos maneras: como parámetros, dados por las condiciones del problema y previamente determinados y leídos por el computador; como datos de entrada, o como variables estadísticas que pueden ser generados internamente por el computador en el desarrollo del modelo.
- Variables endógenas o de salida: son las variables dependientes del sistema, generadas por la interacción entre las variables exógenas y las variables de estado de acuerdo con las características operacionales del sistema.
- Variables de estado: son las que describen el estado de un sistema o de uno de sus componentes a través del tiempo. Estas variables interactúan con las dos anteriores siguiendo las relaciones funcionales establecidas previamente. Por lo tanto, dependen no solo de los valores de una o más variables exógenas, relativas a un corto periodo de tiempo anterior, sino también de ciertas variables de salida del sistema en intervalos de tiempo anteriores.

Relaciones funcionales: se pueden presentar bajo dos formas: las identidades y las características operacionales.

Las identidades son definiciones o proposiciones relativas a las componentes del modelo. Las características operacionales corresponden a hipótesis generalmente expresadas a través de ecuaciones matemáticas que relacionan las variables exógenas y de estado de un sistema con sus variables endógenas.

Parámetros: son elementos cuya función es expresar cuantitativamente el proceso estudiado, pueden ser determinados por tentativas; como en el caso del ajuste de modelos matemáticos pluvio-hidrológicos a una región determinada, o calculados por inferencia estadística en el caso de modelos de transformación pluvio-hidrométrica basados en una región múltiple.

### 3.3.2. Utilidad de los modelos en hidrología

a.- Conocimiento del comportamiento del sistema ante secuencias de acciones:

En muchas ocasiones los científicos o los técnicos conocen con mayor o menor incertidumbre, los fundamentos del comportamiento de ciertos elementos del medio, pero han de recurrir a

los modelos para poder visualizar la evolución del sistema. Un ejemplo de este tipo de aplicación es el presentado por Blair *et al.*, citado por Anderson (1992).

b.- Predicción sobre situaciones futuras:

La posibilidad de plantear situaciones hipotéticas de futuro puede permitir conocer que alcance tendrían estas, y diseñar posibles soluciones en función de la probabilidad de ocurrencia de dichas situaciones.

c.- Optimización de la gestión del sistema:

Cuando en un sistema hídrico complejo los objetivos que se pretenden son variados, e incluso contrapuestos los modelos de optimización pueden permitir obtener las soluciones mejores para cubrir todos los objetivos.

### 3.3.3. Protocolo para el desarrollo de un modelo

En la Figura 3.4 se presentan los pasos requeridos en el protocolo a seguir para el desarrollo de un modelo, según lo propone Anderson (1992).

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

### 3.3.4. Avances académicos producidos durante el desarrollo de un modelo

a.- Mejora del conocimiento de los sistemas naturales

La realización de un modelo permite el contraste de las hipótesis del funcionamiento del sistema, un mejor ajuste y definición de las relaciones entre parámetros, así como de la sensibilidad del sistema a las variaciones de estos.

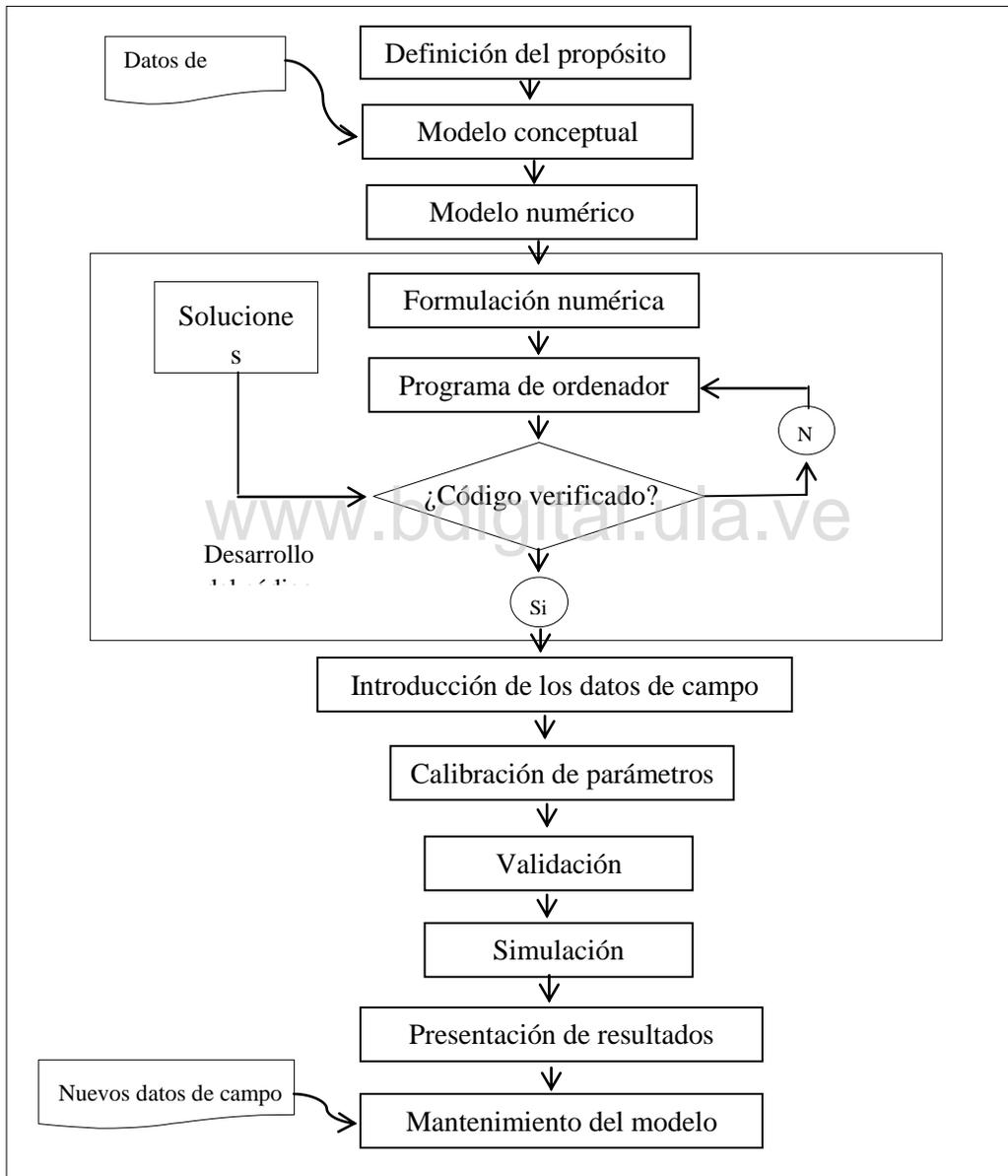
b.- Estudio de situaciones especiales:

Cuando se presenta algún problema científico singular la modelización puede servir para comparar distintos diseños conceptuales del funcionamiento o del sistema, para obtener cuál de estos se ajusta más a la realidad.

Los modelos, en especial los matemáticos son unas herramientas fundamentales para el hidrólogo que se enfrenta a sistemas del mundo real, complejos y con interacción de un buen número de elementos. Estos han de servir para comprender y gestionar los sistemas.

### 3.3.5. Clasificación de modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos categorías: modelos físicos y modelos matemáticos (Chow *et al.*, 1994). Los primeros incluyen modelos a escala que representan el sistema en una escala reducida, tal como un modelo hidráulico del vertedero de una presa; y modelos análogos, que usan otro sistema físico con propiedades similares a las del prototipo.



**Figura 3.4.** Pasos en el protocolo de desarrollo de un modelo Fuente: Anderson (1992)

Los modelos matemáticos representan el sistema hidrológico en forma abstracta, mediante un conjunto de ecuaciones que relacionan las variables de entrada y de salida. Estas variables pueden ser funciones del espacio y del tiempo, y también pueden ser variables probabilísticas o aleatorias que no tienen un valor fijo en un punto particular del espacio y del tiempo. Estas variables están descritas a través de distribuciones de probabilidad.

Desde el punto de vista de la aleatoriedad los modelos hidrológicos se clasifican en determinísticos y estocásticos.

En un modelo determinístico el problema se reduce básicamente a la determinación y ajuste de los parámetros que describen el sistema; por tal motivo estos modelos son llamados también paramétricos. Debe notarse, sin embargo, que en realidad no es posible formular un sistema hidrológico natural en términos estrictamente determinísticos por cuanto:

- a) Existe variabilidad de los sistemas hidrológicos en el tiempo, debido a los cambios introducidos por el hombre directa o indirectamente, y a los procesos naturales de erosión, cambios climáticos y otros que constituyen la evolución geomorfológica de la tierra.
- b) Existe incerteza con respecto a las magnitudes y distribución espacial y temporal de las entradas y salidas de los sistemas hidrológicos y con respecto a los estados y propiedades de sus elementos interiores.
- c) Existen dificultades en la formulación matemática de los complejos procesos no lineales de transferencia de masa y energía que constituyen el ciclo hidrológico. La variabilidad temporal o no estacionalidad, es de importancia en el estudio de sistema hidrológicos puesto que en un sistema en proceso de cambio no puede producir relaciones invariables entrada-salida.

Por lo tanto, mientras estos modelos operan de un modo determinístico sobre los datos de entrada que se le suministran, se puede a lo sumo hacer afirmaciones probabilísticas respecto a las salidas correspondientes. En otras palabras, el hecho de que el modelo sea determinístico no significa que el comportamiento del sistema hidrológico natural por el representado lo sea.

El segundo gran camino de la simulación es la determinación de los parámetros estadísticos que describen la respuesta del sistema, para ser usados posteriormente en la generación de series de datos estadísticamente y distinguibles de las series observadas; esto es la llamada simulación estocástica.

Los modelos determinísticos admiten una segunda clasificación según se atiende a la variabilidad espacial de los parámetros y las variables. Así se distingue entre:

- Modelos agregados: estos modelos son de naturaleza cuasi-física. Son modelos que trabajan con valores integrados espacialmente. Suelen ser de utilidad cuando es necesario obtener, simular o predecir el hidrograma de salida o el caudal pico de una cuenca, con fines de diseño y en pequeñas obras hidráulicas.

- Modelos distribuidos: este tipo de modelos consideran las ecuaciones de conservación de masa, energía y movimiento, para describir el movimiento del agua en superficies y el subsuelo (zona saturada y no saturada), usando técnicas de discretización numérica, tal como el método de las diferencias finitas o de elementos finitos. El cálculo se realiza para cada celda de la grilla que representa la cuenca.

Los modelos distribuidos se pueden discretizar basándose en la definición de una grilla regular donde se realiza el cálculo distribuido, o teniendo como base las líneas de escurrimiento y las curvas de nivel. La aplicación de modelos distribuidos está enfocada a definir las escala de representación espacial y temporal de los fenómenos hidrológicos de interés, teniendo en cuenta los datos existentes o los posibles de recopilar.

Algunas limitaciones características de los modelos distribuidos son:

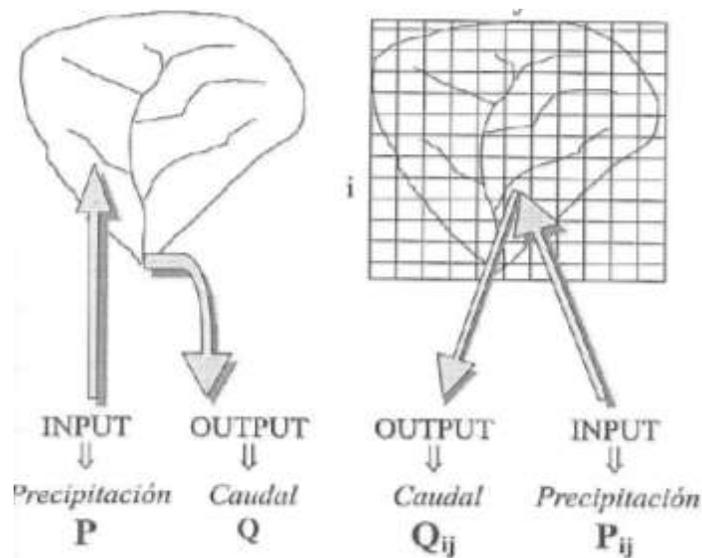
- La representación de la heterogeneidad topográfica y climática.
- La variación entre la escala espacio-temporal de las observaciones y la utilizada en el modelo.
- La definición de la escala de análisis y validez de resultados con distinta precisión.
- El elevado número de parámetros, no siempre de preciso significado físico.

Por último es indispensable precisar que en los modelos distribuidos los resultados dependen de la evaluación de los parámetros que se ingresan al modelo, adicionalmente un punto clave del análisis es la calibración y validación del modelo.

En la Figura 3.5 se muestra un ejemplo de discretización para una cuenca hidrográfica. La primera cuenca corresponde a una cuenca sin discretización, modelos agregados, donde los datos tanto de entrada como de salida se refieren a la totalidad de la cuenca. La segunda cuenca se modela con mayor detalle el espacio se ha dividido según la determinada malla, y corresponde a un modelo distribuido. Cada celda en particular tendrá sus propios valores de las variables y parámetros.

Los modelos pueden ser probabilísticos a diferencia de los modelos determinísticos se usan cuando se desea que a igualdad de estado inicial, la respuesta sea aleatoria; por lo tanto, para una misma entrada puede obtenerse salidas diferentes, siguiendo una determinada distribución de probabilidades. El sistema será llamado estocástico si además existe una relación secuencial entre las ocurrencias del fenómeno.

Un modelo estocástico es un tipo de modelo probabilístico. En los modelos determinísticos se pretenden simular de manera continua en el tiempo una sucesión de eventos hidrológicos, y la comprobación de la validez del modelo se hace por comparación con la sucesión de eventos observados; con los modelos estocásticos el objetivo es, en general, la generación de series no observadas de igual probabilidad de ocurrencia que las observadas.



**Figura 3.5.** Ejemplo que muestra dos grados de discretización para una cuenca hidrográfica.  
Fuente: Anderson (1992)

Cada uno de los criterios expuestos tiene ventajas y limitaciones que los hacen aconsejables para distintos tipos de problemas. Los modelos paramétricos generalmente requieren datos de entrada con intervalos de tiempos cortos y sintetizan bien respuestas para incrementos de distintos orden (datos horarios o diarios), razón por la cual se usan ampliamente para simular eventos hidrológicos con intervalos cortos de tiempo.

Finalmente según su continuidad en el tiempo los modelos de simulación determinística pueden ser:

- **Eventos:** Este tipo de modelos están diseñados para simular eventos lluvia-escorrentía aislados. Su objetivo es evaluar la escorrentía por lo que se centra en el cálculo del escurrimiento e infiltración. Estos modelos no calculan almacenamiento de humedad del suelo entre eventos, por lo que no sirven para simular periodos secos (sin lluvia).
- **Continuos:** Los modelos continuos realizan simulación de periodos de tiempo largos, donde existen varios eventos separados por periodos secos. Estos modelos toman en cuenta todos los procesos del flujo superficial, subsuperficial y subterráneo. Los modelos continuos simulan también la evapotranspiración y otros procesos que intervienen en la dinámica del almacenamiento de humedad en el suelo durante periodos secos.

### 3.4. Calibración de los parámetros del modelo

Antes de la aplicación propiamente dicha del modelo seleccionado debe procederse a ajustar formalmente el modelo en función del comportamiento hídrico de la cuenca, esto implica

considerar las condiciones meteorológicas, hidráulicas y morfológicas particulares de la zona a estudiar. Este procedimiento implica que se debe tener un cierto nivel de confiabilidad en los parámetros escogidos. En este punto donde comienza la calibración, e implica medir la calidad del modelaje en función de los parámetros.

Llamas (1993) indica que “la calibración es la etapa en la cual se calculan o se estiman los parámetros del modelo, con criterios deductivos o con ayuda de observaciones anteriores, considerando las demandas y las respuestas”. p. 21. Según Schwar (2001) el objetivo de la calibración consiste en minimizar la diferencia entre las respuestas observadas del sistema y las respuestas simuladas por el modelo utilizado.

Por su parte, Thyer (1999) se refiere a la calibración de modelos conceptuales precipitación-escurrentía, indicando que “la calibración consiste en estimar un grupo probable y único de parámetros, que calculen la escurrentía de la forma más precisa dada la información observada”. p. 43.

Los valores de los parámetros de los modelos son raramente conocidos en su totalidad, y en ocasiones son desconocidos por completo. Esto significa elegir la combinación para la cual la correlación entre los valores de las variables de salida generadas por el modelo y las medidas en el sistema real es la mejor estadísticamente.

Para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y los valores modelados se pueden utilizar una gran cantidad de indicadores. En este trabajo de investigación se trabajará con dos índices/métricos utilizados normalmente en la calibración de modelos hidrológicos:

- El índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe, el sesgo (Bias) o desviación relativa de los caudales.
- El coeficiente de correlación lineal.

A continuación se procede a explicar cómo se emplean estos indicadores

- Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E)

El criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados en Hidrología. Se define como se muestra en la Ecuación 3.6.

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (3.6)$$

Donde:  $Q_{s,i}$  y  $Q_{o,i}$  corresponden a caudales simulados y observados para cada paso tiempo  $i$ , y  $n$  corresponde al número total de pasos de tiempo.

Esta ecuación mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta,  $E = 1$ ; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces  $E = 0$ . Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la siguiente Tabla 3.1.

**Tabla3.1.** Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe

<b>E</b>	<b>Ajuste</b>
<0,2	Insuficiente
0,2-0,4	Satisfactorio
0,4-0,6	Bueno
0,6-0,8	Muy bueno
>0,8	Excelente

- Bias o sesgo

Esta Ecuación 3.7, examina la diferencia entre la medición promedio observada y un valor de referencia. Se define como:

$$Bias = 100 * \left[ \frac{[(\bar{Q}_s - \bar{Q}_o)]}{\bar{Q}_o} \right] \quad (3.7)$$

Donde:  $\bar{Q}_s$  y  $\bar{Q}_o$  a caudales medios simulados y observados para casa paso tiempo.

Entre menor es el porcentaje de Bias, mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados. Un Bias positivo indica sobre estimación y uno negativo indica sub estimación de caudales.

- Coeficiente de correlación lineal

Es un índice que mide de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. Se define como el cociente entre la covarianza y el producto de las desviaciones típicas de ambas variables, tal como se muestra en la Ecuación 3.8.

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (3.8)$$

Algunas de las características del coeficiente de correlación lineal se resumen a continuación:

- El coeficiente de correlación lineal no varía al hacerlo la escala de medición.
- El signo del coeficiente de correlación es el mismo que el de la covarianza:
- Si la covarianza es positiva, la correlación es directa.

- Si la covarianza es negativa, la correlación es inversa.
- Si la covarianza es nula, no existe correlación.
- El coeficiente de correlación lineal es un número comprendido entre  $-1 \leq r \leq 1$ .
- Si el coeficiente de correlación lineal toma valores cercanos a -1 la correlación es fuerte e inversa, y será tanto más fuerte cuanto más se aproxime el valor de r a -1.
- Si el coeficiente de correlación lineal toma valores cercanos a 1 la correlación es fuerte y directa, y será tanto más fuerte cuanto más se aproxime el valor de r a 1.
- Si el coeficiente de correlación lineal toma valores cercanos a cero, la correlación es débil.
- Si  $r = 1$  ó  $-1$ , los puntos de la nube están sobre la recta creciente o decreciente. Entre ambas variables hay dependencia funcional.

Es un indicador completamente ineficiente aunque las variables estén estrechamente relacionadas si esta relación no es lineal, lo cual, si es aplicado sin criterio puede llevar a errores graves.

### 3.5. Validación del modelo

La validación consiste en comprobar el adecuado funcionamiento del modelo con una serie de mediciones reales no utilizadas en proceso de calibración. Para Kelton y Law (1991) “la validación consiste en determinar si el modelo conceptual de simulación, es una representación exacta del sistema que está bajo estudio”. **pág**

Por su parte, Bendient y Huber (2002) afirman que “la validación es el acto documentado de probar si cualquier procedimiento, proceso, equipo, material, actividad o sistema, conlleva realmente al resultado esperado o definido”. **pag**

Por último Llamas (1993) menciona que la calidad de un modelo se mide por los resultados de su validación. Esta consiste en comparar la respuesta teórica obtenida mediante el modelo de simulación, con esta misma respuesta obtenida por observaciones directas, este resultado obtenido es lo que se llama calidad de predicción

### 3.6. Revisión de los principales modelos que permiten la simulación hidrológica continua

Cada modelo hidrológico tiene dentro de su formulación características particulares que lo hacen más adecuado, con respecto a otros modelos, para cierto tipo de simulación.

Luego de la revisión bibliográfica, se presenta a continuación una breve revisión de algunos modelos de simulación que permiten la simulación continua, con el fin de conocer sus características, capacidades y limitaciones para luego compararlos y seleccionar el que mejor se adapte a la investigación.

Los modelos a comparar serán los siguientes:

- SWAT
- AQUATOOL
- SIHIM
- WEAP

### 3.6.1. Modelo SWAT (United States Department of Agriculture)

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo semi-distribuido de base física. Fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en el agua, pérdida de sedimentos y la producción de sustancias químicas provenientes de la agricultura en cuencas extensas y complejas con gran variedad de suelos, uso de la tierra y condiciones de manejo, en un periodo prolongado de tiempo.

Requiere información específica sobre el clima y tiempo, propiedades de los suelos, topografía, vegetación y prácticas de tierra y agua que acontecen en las cuencas.

Los procesos asociados a la circulación del agua y de los sedimentos, desarrollo de cosecha, ciclo de nutrientes entre otros son modelados directamente con el modelo SWAT.

Por la forma en que se desarrolló el modelo SWAT, es más un modelo de manejo de suelos que un modelo hidrológico, ya que tiene un enfoque más específico. Por ello y por requerir mucha información no necesariamente ligada a procesos hidrológicos no es directamente aplicable a estudios hidrológicos, ya que no es su objetivo principal. En este sentido, no es apto para optimizar la distribución del agua entre diferentes usos.

Uno de los grandes atractivos del modelo SWAT es la forma en que se ha desarrollado con acceso libre y código abierto para permitir el acceso al modelo a un gran número de usuarios alrededor del mundo, especialmente en los países en vías de desarrollo. Por ello se implementaron las interfaces para el usuario compatibles con programas libres.

### 3.6.2. Modelo AQUATOOL (Universidad Politécnica de Valencia)

El área de Ingeniería de Recursos Hídricos del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), ha desarrollado un sistema soporte de decisión (SSD) en materia de planificación de recursos hidráulicos denominado AQUATOOL.

Es un modelo conceptual semi-agregado con el que se pueden analizar de forma integrada y a escala de cuenca hidrográfica aspectos cuantitativos, cualitativos, económicos y ambientales, incorporando también otros aspectos, como prioridades y reglas de gestión.

Así mismo permite tener toda la información en una sola aplicación, evaluar múltiples alternativas para distintos escenarios, obtener los intercambios entre los distintos objetivos, y estimar los riesgos asociados a las decisiones y al análisis de sensibilidad.

Consta de una serie de módulos que están integrados en un sistema único en el que la unidad de control del usuario permite la definición gráfica del esquema del sistema de recursos hídricos, el control de las bases de datos, la utilización de los módulos mencionados y el análisis gráfico de los resultados.

Estas aplicaciones demuestran la robustez de las herramientas y su flexibilidad para modelar gran variedad de sistemas. Los distintos módulos han sido diseñados con orientación a metodologías consolidadas de análisis de sistemas de recursos hídricos. Dentro de los módulos disponibles se pueden mencionar entre otros:

**SIMGES:** Simulación de gestión de cuencas. Está orientado hacia la gestión integral de recursos hídricos, incluyendo elementos como tramos de río, canales, acuíferos, embalses, demandas consuntivas, demandas hidroeléctricas, entre otros.

**GESCAL:** Simulación de la calidad del agua. Permite modelar parámetros como la temperatura del agua, materia orgánica, oxígeno disuelto, ciclos de nitrógeno y fósforo y problemas de eutrofización.

**OPTIGES:** Optimización para la gestión de recursos hídricos. Este módulo permite la resolución del problema de la asignación de recurso hídrico mediante la optimización de la gestión mensual para largos periodos de tiempo.

**AQUIVAL:** Modelo discreto de acuíferos lineales mediante autovalores. Este método permite una modelación distribuida con gran eficiencia computacional de los acuíferos.

**ECOGES:** Consideración de aspectos económicos en la gestión. Permite la evaluación económica de las alternativas de estrategias de gestión de recursos hídricos.

### 3.6.3. Modelo de Simulación Hidrológica Mensual (SIHIM)

- Generalidades sobre el modelo

SIHIM es un modelo de simulación mensual elaborado por Duque en el Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT), que permite obtener información similar a la recogida en una estación de medición de caudales; información ésta sobre caudales medios y volúmenes mensuales, en los sitios de interés.

El modelo considera la cuenca dividida en subcuencas, en las cuales se supone homogeneidad tanto en los procesos hidrológicos como en las condiciones que los afectan. Presenta la ventaja de tener un reducido número de parámetros y se puede calibrar automáticamente.

Para la automatización del proceso de calibración se aplica un algoritmo o método de búsqueda directa que optimiza el valor de una función objetivo: el algoritmo modificado de Hooke y Jeeves. A través de este algoritmo se logra dar solución al modelo de manera iterativa y sistemática, variándose inteligentemente los valores de los parámetros del modelo hasta que se logra el óptimo valor de los parámetros del modelo hasta que se logra el óptimo valor de una función objetivo o criterio de evaluación de la calibración.

- Estructura del modelo

El orden o secuencia en que se calculan los diferentes procesos que conforman el sistema hidrológico, es lo que define la estructura del modelo. En éste, en particular, la estructura viene dada según los siguientes pasos:

1. Se calcula la precipitación media, la evaporación media y evapotranspiración potencial.
2. Se determina la fracción del almacenamiento en la vertiente que pasa por infiltración al interior del suelo, y el almacenamiento superficial que posteriormente saldrá como escurrimiento
3. Se determina la fracción de la infiltración que percola hacia el almacenamiento del agua subterránea y la fracción que es retenida en el almacenamiento de humedad del suelo
4. Se calcula tanto la fracción de la humedad que sale del almacenamiento de humedad del suelo en forma de evapotranspiración, como el contenido final de este almacenamiento
5. Considerando la percolación, el flujo subterráneo afluente y el almacenamiento inicial del agua subterránea, se calcula el caudal base, el flujo subterráneo efluente y el contenido final del almacenamiento del agua subterránea
6. Por último a partir del almacenamiento superficial se determina el escurrimiento, que sumado al caudal base formará la esorrentía total.

- Entradas al modelo

Las variables de entrada al modelo y su significado se muestran en la Tabla 3.2.

- Salidas del modelo

Este modelo presenta dos tipos de salidas que son los resultados intermedios y los resultados finales, estas pueden visualizarse en la Figura 3.6 que corresponde el diagrama de bloques de operaciones que se realizan en el Modelo de Simulación Mensual para la generación de las salidas.

En el diagrama de bloques se observa que para los resultados intermedios se imprime: la precipitación y la evaporación promedia para cada mes, la escorrentía total simulada para cada mes, evapotranspiración real, flujo superficial afluente, escorrentía total, escurrimiento, caudal base, flujo subterráneo efluente, balance y los valores finales de los diferentes almacenamientos. Estos resultados intermedios se imprimen para cada subcuenca y son de gran utilidad en la fase de calibración

**Tabla 3.2.** Variables de entrada requeridas por el modelo SIHIM.

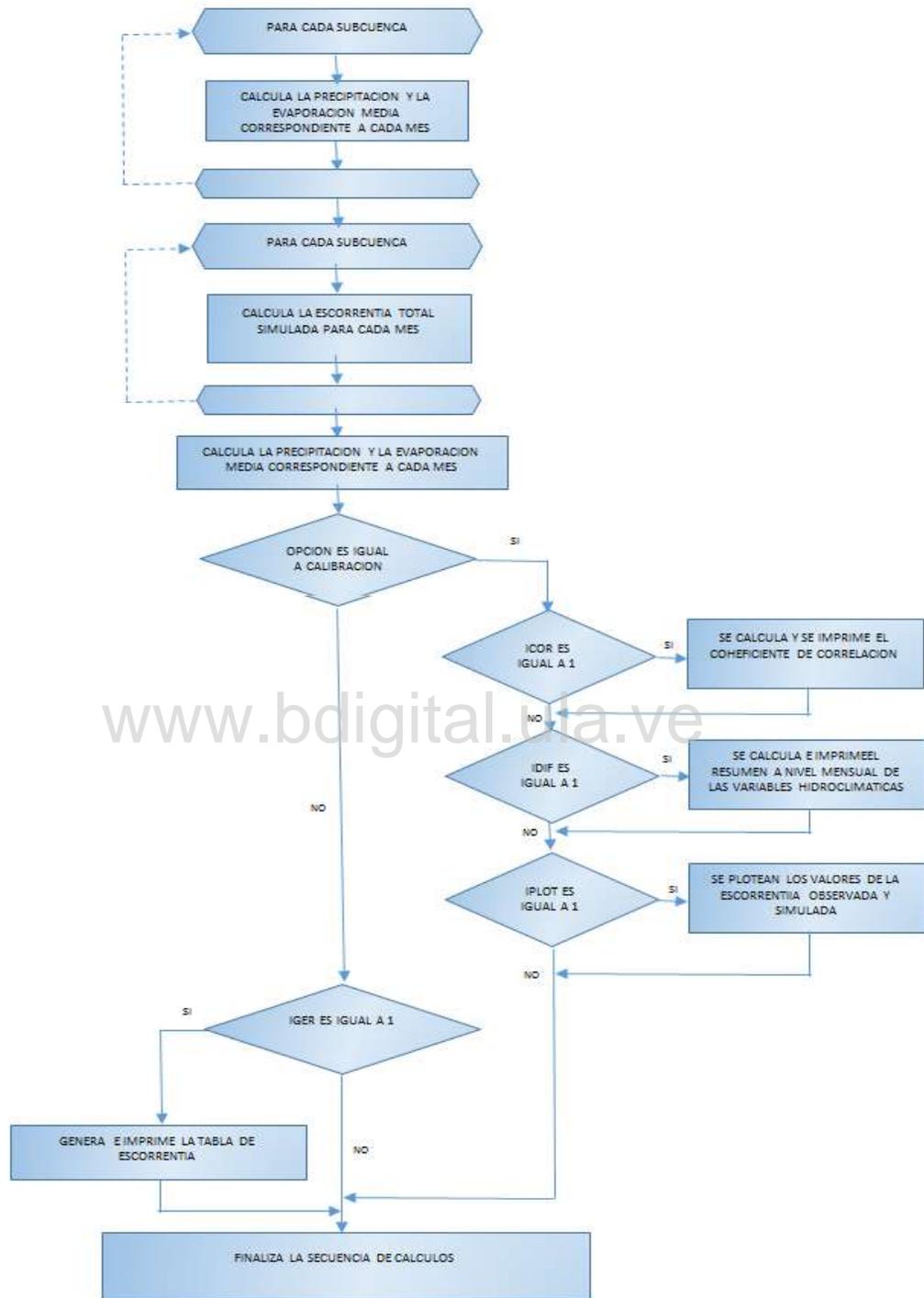
<b>Variable</b>	<b>Significado</b>
CINF	Capacidad de infiltración
CT	Capacidad nominal de almacenamiento de humedad del suelo
PQB	Coefficiente para convertir evaporación de tina a evapotranspiración potencial
PFSE	Fracción del almacenamiento de agua subterránea que sale como caudal base
PESC	Fracción del almacenamiento de agua subterránea que sale como flujo subterráneo efluente
AIHS	Almacenamiento inicial de humedad del suelo
AIAS	Almacenamiento inicial superficial

Fuente: Duque(1991)

Como puede observarse en el diagrama de bloques, el modelo considera las opciones en la que se está trabajando, es decir, si se opera bajo la fase de calibración o simulación.

Si la opción seleccionada corresponde a la de calibración se imprimirán los valores de la escorrentía total tanto observada como simulada, la diferencia entre ellas en porcentaje y el coeficiente de correlación lineal para la correspondiente gratificación de los valores de escorrentía mensual observados y simulados. También muestra el resumen a nivel mensual de las variables hidrológicas. Dentro de estas salidas también se tiene el resumen a nivel mensual de las variables hidrológicas, es decir, caudal observado (Q-obs), caudal simulado (Q-sim), precipitación, evaporación, evapotranspiración potencial y evapotranspiración real.

Si se está trabajando con la fase dos, es decir opción de simulación, se genera e imprime la tabla de escorrentía simulada.



**Figura 3.9.** Diagrama de bloques donde se muestran las salidas del modelo. Fuente: Modificado de Duque (1991)

#### 3.6.4. Sistema de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP)

- Descripción del modelo

Como se sabe, un modelo es una representación esquemática o conceptual de un fenómeno, que representa una teoría o hipótesis de cómo dicho fenómeno funciona. Los modelos normalmente describen, explican y predicen el comportamiento de un fenómeno natural o componentes del mismo.

Los modelos que simulan fenómenos relacionados con recursos hídricos se pueden clasificar en tres grandes categorías: hidráulicos, que corresponden a aquellos que simulan el comportamiento de flujos en los cauces para distintos escenarios; hidrológicos, que simulan la relación entre las características meteorológicas y la escorrentía de una cuenca; y de planificación, que modelan la operación de los sistemas de recursos hídricos de una cuenca.

WEAP (Water Evaluation And Planning System) corresponde a un modelo semi distribuido desarrollado por el Instituto del Medio Ambiente SEI (Stockholm Environment Institute). Este modelo funciona utilizando el principio básico de balance de masas, combina características de los modelos hidrológicos y de planificación.

Proporciona un marco comprensivo, flexible y de fácil uso para la planificación y análisis de políticas. Se distingue por integrar a la simulación componentes naturales (demandas por escorrentía, flujo base) y componentes humanos (demanda humana, embalses).

Los datos meteorológicos y fluviométricos deben ser ingresados al modelo, discretizados mensualmente, a diferencia de las características del suelo que generalmente no presentan una Variación importante y son ingresados a nivel anual o como una constante para todo el periodo.

- Hidrología superficial

La hidrología física del modelo consiste de varios componentes conceptualmente simples que se combinan para ser eficientes en el cálculo, pero con la suficiente especificación para capturar los procesos hidrológicos importantes y evaluar asuntos claves en los aprovechamientos hídricos.

Para un cierto intervalo, el módulo de hidrología se corre para actualizar el estado hidrológico de la cuenca y proporcionar las constantes del balance de masa empleados en el problema lineal de asignación del agua, en un segundo procedimiento dentro del mismo intervalo.

Usa un esquema unidimensional con dos almacenamientos que contabilizan el agua en el suelo, emplea funciones empíricas que describen la evapotranspiración, el escurrimiento superficial, el escurrimiento sub-superficial o inter-flujo y percolación profunda. (Figura 3.10).

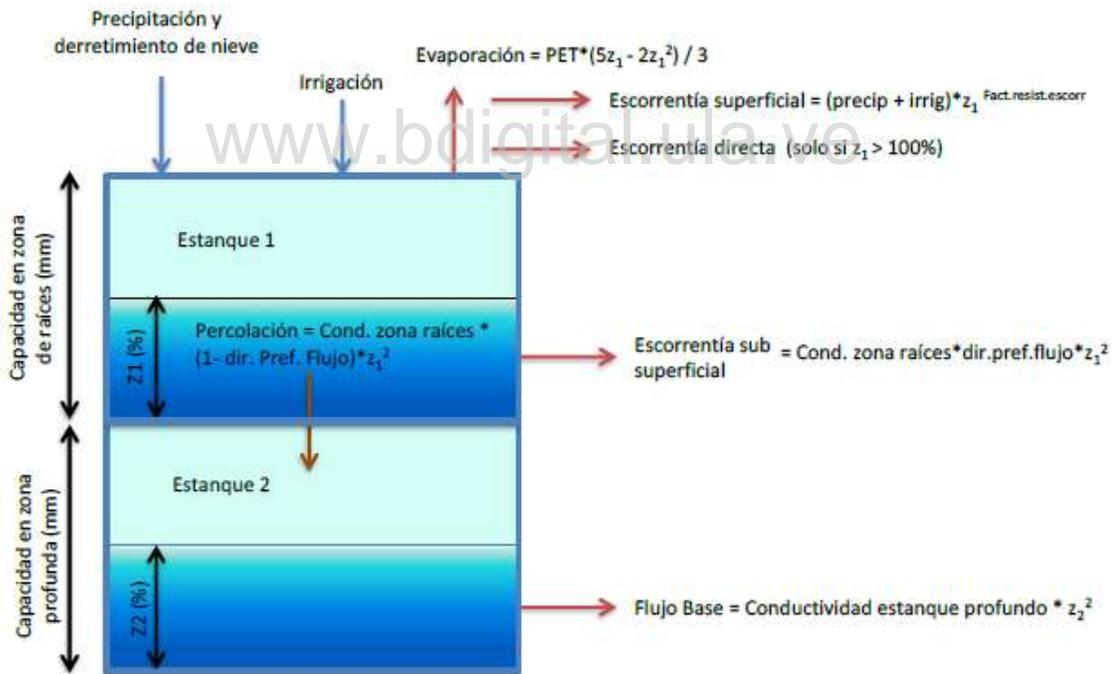
Las ecuaciones que rigen el método que aplican a los estanques de cada elemento son:

$$Sw_j \frac{dz_{1j}}{dt} = Pe(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left( \frac{5z_{1j} - 2z_{1j}^2}{3} \right) - Pe(t)z_{1j}^2 - f_j k_j z_{1j}^2 - (1 - f_j) k_j z_{1j}^2 \quad (3.10)$$

Con el almacenamiento relativo del agua en el suelo dado como una fracción del almacenamiento total efectivo y cuya variación está entre 0 y 1, donde 0 representa el punto de marchitamiento permanente y 1 la capacidad de campo.

El almacenamiento total efectivo de la capa superior se aproxima por una estimación de la capacidad del suelo de mantener el agua  $Sw_j$  en mm, prescrito para cada fracción de la cubierta vegetal  $j$ . La lluvia  $Pe$  en este caso se calcula como se muestra en la Ecuación 3.11.

$$Pe = P_i m_c + m_r \quad (3.11)$$



**Figura 3.12.** Almacenamiento de la humedad en dos capas de suelo mostrando las distintas entradas y salidas para una cierta cubierta vegetal o tipo de cultivo. Fuente: Castro (2014)

El término  $PET(t)$  se refiere a la evapotranspiración del área fraccionada  $j$ , donde  $PET(t)$  es la evapotranspiración potencial de referencia del cultivo dado por Penman-Montieth, en mm/día y  $k_{c,j}(t)$  es el coeficiente del cultivo/planta para cada fracción de cubierta vegetal.

Cuando el modelo se corre con intervalos grandes,  $PET(t)$  se escala a una relación apropiada de lámina/tiempo.

El término  $Pe(t)z_{1,j}^{\frac{LAI_j}{2}}$  representa al escurrimiento superficial donde  $\frac{LAI_j}{2}$  es el índice del área de zona con follaje, con el valor más bajo de  $\frac{LAI_j}{2}$  asignado a la cubierta vegetal que produce la mayor respuesta del escurrimiento como sucede con los suelos desnudos.

Los términos  $f_j k_j z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_j z_{1,j}^2$  se refieren al interflujo y a la percolación profunda, respectivamente, donde el parámetro  $k_j$  es una estimación de la conductividad del almacenamiento superior (mm/tiempo) y  $f_j$  es un parámetro de ajuste relacionado con el suelo, la cubierta vegetal y la topografía que fracciona en partes al agua ya sea horizontalmente  $f_j$  o verticalmente  $(1 - f_j)$ .

Las contribuciones del escurrimiento superficial y del interflujo del almacenamiento superior,  $Ro$ , de cada subcuena en el tiempo es (Ecuación 3.13).

$$Ro(t) = \sum_{j=1}^N A_j \left( Pe(t)z_{1,j}^{\frac{LAI_j}{2}} + f_j k_j z_{1,j}^2 \right) \quad (3.13)$$

Donde:  $A_j$  es el área que contribuye de cada clase de cubierta vegetal  $j$ . Para las subcuencas sin un acuífero, la ecuación del balance de masa para el segundo almacenamiento está dada por la Ecuación 3.14.

$$Dw \frac{dz_{2j}}{dt} = (1 - f_j) k_j z_{1,j}^2 - k_2 z_{2j}^2 \quad (3.14)$$

Donde: la afluencia a este almacenamiento profundo es la percolación profunda del almacenamiento superior dado por la ecuación:  $Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt}$ ;  $k_2$  es la tasa de conductividad del almacenamiento inferior (mm/tiempo), el cual está dado como un valor único para la cuenca; y  $Dw$  es la capacidad del almacenamiento de agua profundo (mm). Las Ecuaciones  $Dw \frac{dz_{2j}}{dt}$  y  $Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt}$  se resuelven empleando un algoritmo de cuarto orden de Runge-Kutta.

El flujo base se determina por la Ecuación 3.15.

$$Bf(t) = \sum_{j=1}^N A_j (k_2 z_{2j}^2) \quad (3.15)$$

Cuando un acuífero aluvial se introduce en el modelo, el segundo término del almacenamiento se elimina y la recarga desde la subcuena es el término de la percolación desde el almacenamiento superior del acuífero,  $P$  (volumen/tiempo). Ecuación 3.16.

$$Pf(t) = \sum_{j=1}^N A_j (k_2 z_{2j}^2) \quad (3.16)$$

- Descripción de las variables de uso de suelo que considera el modelo
- Coeficiente del cultivo (Kc): es relativo a cada cultivo y tipo de suelo.
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (Sw): capacidad de almacenar agua efectiva en la capa superior del suelo (representada en mm).
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (Dw): capacidad de almacenar agua efectiva en la zona más profunda del suelo (balde 2), representada en milímetros. Este parámetro es un valor único para el cada unidad hidrológica y no varía según el tipo de suelo.
- Factor de resistencia a la escorrentía (RRF): es usado para controlar la respuesta de la escorrentía superficial. Está relacionado con factores como el índice de área foliar y la pendiente del terreno. La escorrentía tenderá a disminuir con valores más altos (entre 0.1 y 10). Este parámetro puede variar entre los diferentes tipos de suelo.
- Conductividad de zona de raíces (Ks): tasa de conductividad en la zona superior (balde 1) con total saturación, que se dividirá según la dirección flujo preferida, entre el flujo subsuperficial y el flujo de la capa inferior del suelo. Este parámetro puede variar entre diferentes tipos de suelo.
- Conductividad de zona profunda (Kd): tasa de conductividad (longitud/tiempo) de la zona profunda (balde 2) con saturación total, que controla la transmisión del caudal base. Esta variable es un valor único para cada unidad hidrológica y no varía según el tipo de suelo.
- Dirección preferencial de flujo (f): es usado para la división del flujo de la zona de raíces entre el flujo subsuperficial y el flujo hacia la parte más baja del suelo (balde 2) o las aguas subterráneas. Sí el valor es 1,0 = 100 % horizontal y sí es 0 = 100 % flujo vertical. Este parámetro puede variar entre diferentes tipos de suelo.
- Nivel de humedad en la zona de raíces (Z1): el valor de la inicial 1 se da al inicio de la simulación. Es el porcentaje del almacenamiento efectivo de la zona de conductividad de las raíces.
- Nivel de humedad en la zona profunda (Z2): el valor de la inicial 2 se da al inicio de la simulación. Es el porcentaje del almacenamiento efectivo de la zona del suelo más profunda. Este parámetro no varía según el tipo de suelo.

- **Elementos del modelo**

Dentro de las definiciones del modelo se cuenta con sitios de requerimiento de agua, así como con sitios fuente, los cuales en general son denominados “nodos” y tienen una simbología única según el tipo de nodo. En el siguiente listado se muestra el símbolo y la definición de cada nodo.

● **Sitios de demanda:** Es un conjunto de usuarios que comparten un sistema de distribución, se encuentran todos en una misma región definida y ocupan el mismo punto de abastecimiento. Las características necesarias para registrar un sitio de demanda son: tipo de actividad, dotación, variación mensual del consumo y porcentaje de agua que se consume, este último no afecta la cantidad de agua que se entregará al sitio, es decir solo es una cantidad de agua que sale del sistema.

→ **Río:** dibuja la línea de flujo de un cauce que corre en el sentido de la flecha, la unión de un río con otro se hace especificando cual río será el tributario. Las características que se tienen que definir son: gasto, ya sea en el principio del río o describiendo el flujo en cada punto marcado sobre éste, también se puede calcular con ayuda del módulo de hidrología superficial; la relación que se tiene con agua subterránea, especificando si el río recibe agua del subsuelo ó si se infiltra y se va al acuífero; la evaporación, medida en mm ó como porcentaje del flujo sobre el río; la longitud que el río que se encuentra en contacto con un acuífero.

▲ **Embalse:** este sitio es considerado un punto de demanda de agua, su demanda se ve definida en su capacidad antes de la obra de excedencias, los datos básicos requeridos para usar estas estructuras son: capacidad de almacenaje, almacenaje inicial, curva volumen vs elevaciones, evaporación neta, filtración y una política de operación definida en tres niveles que son: nivel de tope (top of conservation), este es el nivel al que se encuentra la obra de excedencias; nivel de soporte (top of buffer), se define como un nivel al que se restringe la entrega de agua a los sitios de demanda; nivel de inactividad (top of inactive), es el nivel reservado para el volumen de azolves, por último se solicita un coeficiente de soporte, (buffer coefficient), que sirve para restringir la entrega de agua cuando el nivel se encuentra por debajo del buffer, mientras más cercano es a cero más se restringe la extracción.

■ **Agua subterránea:** son sitios de almacenamiento de agua, en estos nodos se puede dibujar un número ilimitado de links de abastecimiento a sitios de demanda, el usuario deberá ordenar la lista de preferencias para controlar las extracciones. Los datos solicitados en estos nodos son: capacidad de almacenaje, es la capacidad en  $Mm^3$  que tiene el acuífero; almacenamiento inicial, la cantidad de agua que existe dentro del acuífero al momento de comenzar la simulación; extracción máxima mensual, este dato restringe la extracción mensual debido al diseño de la extracción; recarga natural, la cantidad de agua que entra en el periodo de tiempo de cálculo por infiltración sin considerar aumentos de nivel por agua proveniente de centros de captación; método de cálculo, especificando los flujos y relaciones con ríos o usando el módulo de simulación de relación entre agua subterránea y agua superficial

→ Link de transmisión: señala la unión entre los nodos de abastecimiento y las demandas finales, es necesario definir la capacidad de conducción, las pérdidas que se tienen durante la conducción, ya sea por filtraciones, evaporación o fugas. Una pérdida dentro de un link o enlace de transmisión provocara un aumento en la cantidad de agua necesaria para abastecer el sitio de demanda.

→ Link de retorno: todo sitio de demanda debe tener un punto de descarga de agua residual o de sobrante de agua, este enlace se encarga de devolver esta cantidad de agua ya sea a una planta de tratamiento o directamente a algún cuerpo de agua, dentro de este también se consideran pérdidas y relación con aguas subterráneas.

📍 Medidor de flujo: son puntos colocados sobre el cauce de un río para hacer una comparación fácil y automatizada de los datos calculados por el programa y los datos históricos recopilados, no influye en ningún cálculo.

– ⦿ Nodo de requerimiento de flujo: es un punto que se coloca sobre el cauce de un río y exige que pase un gasto determinado por ese punto, funciona como un sitio de demanda y se le debe asignar la prioridad que tendrá.

- Proceso de aplicación de un modelo WEAP

El desarrollo de un modelo WEAP incluye generalmente las siguientes etapas:

- Definición del estudio: En esta etapa se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.
- Búsqueda de información: En esta etapa se hace una recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido. Esta etapa puede ser iterativa, y generalmente se realiza en dos partes: una etapa de recolección de datos generales, y una etapa de recolección de datos específicos una vez se ha montado el modelo y se han identificado necesidades adicionales de información.
- Desarrollo del modelo: En esta etapa se construye el esquema, se realiza la entrada de datos y se realizan corridas iniciales del modelo para observar su comportamiento preliminar y para eliminar posibles inconsistencias y errores.
- Calibración: Aquí se desarrolla una caracterización de la oferta y demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema.
- Uso del modelo y generación de escenarios: Una vez que el modelo está calibrado, se pueden explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre las políticas futuras, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación.

- Métodos para simular escorrentía

WEAP cuenta con cuatro métodos para simular los procesos internos de una cuenca, los que consideran las demandas evapotranspirativas, la escorrentía superficial, la infiltración y las demandas para riego u otro tipo de demanda que pueda tener la cuenca. Los métodos son los siguientes:

- Demanda de riego: este método se basa en cálculos de las demandas de evapotranspiración de los cultivos para determinar la demanda de riego. No calcula los procesos de escorrentía o infiltración ni realiza un seguimiento de la humedad del suelo.
- Precipitación - Escorrentía: calcula las demandas de evapotranspiración, pero las precipitaciones que no se consumen por los cultivos las modela como escorrentía en un río o las dirige a las aguas subterráneas mediante un enlace directo.
- Humedad del suelo: corresponde al método más complejo de los cuatro y es el utilizado para hacer el modelamiento en la cuenca de estudio.
- MABIA: este método separa las demandas evapotranspirativas de los cultivos y la evaporación directa desde el suelo. Corresponde a una implementación para WEAP del software MABIA desarrollado por el Institut National Agronomique de Tunisie.

www.bdigital.ula.ve

- Método de la Humedad del Suelo

Es el más complejo de los cuatro métodos para generar escorrentía, ya que representa las captaciones en dos capas del suelo.

A continuación se describen los parámetros agronómicos/hidrológicos que se requieren en el uso del suelo.

- Coeficiente del cultivo ( $K_c$ ): es relativo a cada cultivo y tipo de suelo.
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces ( $S_w$ ): capacidad de almacenar agua efectiva en la capa superior del suelo (representada en mm).
- Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda ( $D_w$ ): capacidad de almacenar agua efectiva en la zona más profunda del suelo (balde 2), representada en mm. Este parámetro es un valor único para el “Catchment” y no varía según el tipo de suelo.
- Factor de resistencia a la escorrentía (RRF): es usado para controlar la respuesta de la escorrentía superficial. Está relacionado con factores como el índice de área foliar y la

pendiente del terreno. La escorrentía tenderá a disminuir con valores más altos (entre 0,1 y 10). Este parámetro puede variar entre los diferentes tipos de suelo.

- Conductividad de zona de raíces (Ks): tasa de conductividad en la zona superior (balde 1) con total saturación, que se dividirá según la dirección flujo preferida, entre el flujo subsuperficial y el flujo de la capa inferior del suelo. Este parámetro puede variar entre diferentes tipos de suelo.
- Conductividad de zona profunda (Kd): tasa de conductividad (longitud/tiempo) de la zona profunda (balde 2) con saturación total, que controla la transmisión del caudal base. Esta variable es un valor único para el “Catchment” y no varía según el tipo de suelo.
- Dirección preferencial de flujo (f): es usado para la división del flujo de la zona de raíces entre el flujo subsuperficial y el flujo hacia la parte más baja del suelo (balde 2) o las aguas subterráneas. Sí el valor es 1,0 = 100% horizontal y sí es 0 = 100% flujo vertical. Este parámetro puede variar entre diferentes tipos de suelo.
- Nivel de humedad en la zona de raíces (Z1): el valor de la inicial 1 se da al inicio de la simulación. Es el porcentaje del almacenamiento efectivo de la zona de conductividad de las raíces.
- Nivel de humedad en la zona profunda (Z2): el valor de la inicial 2 se da al inicio de la simulación. Es el porcentaje del almacenamiento efectivo de la zona del suelo más profunda. Este parámetro no varía según el tipo de suelo

### 3.6.5. El WEAP y la planificación

Este paquete computacional provee una estructura común y transparente para organizar la información de recursos hídricos a cualquier nivel deseado, bien sea cuenca local, regional o río internacional, puede además fácilmente desarrollar escenarios para explorar posibles futuros del agua y desarrollar distintas políticas para posteriormente evaluarlas.

- Capacidades del WEAP

A través de esta herramienta es posible desarrollar una planificación de alto nivel a escalas locales o regionales, manejar las distintas demandas y distribución del agua, logrando así una planificación de alto nivel a escalas locales o regionales, apropiada distribución del agua, y evaluación de infraestructura.

En cuanto a las limitaciones del programa se tienen que no es posible realizar operaciones a escalas menores que diarias y optimización de la oferta y la demanda, es decir, minimización de costos o minimización del bienestar social.

- Módulos del programa

El programa cuenta con los siguientes módulos:

- Módulos de Escenarios: con el modelo para la cuenca completamente calibrado se pueden realizar una serie de estudios específicos. Una clase de estos estudios corresponde a la evaluación de diferentes escenarios potenciales futuros. Los escenarios futuros pueden ser de diferentes tipos: escenarios de crecimiento o cambio en la población, escenarios de uso de suelo y escenarios de clima (cambio climático).
- Módulo de calidad de agua: En este módulo es posible la modelación de plantas de tratamiento de aguas residuales, el registro de actividades generadoras de contaminación para los sitios de demandas, y el desarrollo de actividades como el registro de datos de calidad de agua y la utilización de restricciones de afluentes de calidad de agua para un sitio de demanda.
- Módulo de hidrología: en el cual es posible generar escorrentía a través del modelo de lluvia/escorrentía y el modelo de humedad del suelo, también es viable la simulación de la interacción entre el agua superficial y subterránea.
- Módulo financiero: el cual permite modelar costos e ingresos.

- Descripción general del sistema

El balance hídrico de una cuenca corresponde al conjunto de relaciones que se establecen entre las entradas y las salidas que ocurren en una cuenca durante un periodo de tiempo determinado. Es el resultado de la interrelación entre la disponibilidad y las necesidades de agua, incluyendo su cantidad y calidad, así como otros factores que se derivan del desarrollo socioeconómico, el bienestar social y la sostenibilidad ambiental. El balance hídrico es básico para la toma de decisiones para el manejo de los recursos hídricos.

Fundamentalmente el sistema WEAP, está constituido por tres componentes que son: insumos o datos de entrada, el producto o datos de salida y el operador o función de transferencia que es el encargado de interrelacionar y procesar los dos anteriores.

La disponibilidad de agua a una cuenca hidrográfica puede darse de las siguientes formas:

- Precipitaciones: lluvia, nieve, granizo y/o condensaciones.
- Aporte de aguas subterráneas desde cuencas hidrográficas colindantes, puesto que los límites de los acuíferos subterráneos no siempre coinciden con los límites de los parte agua que separan las cuenca hidrográficas.
- Traspase de agua desde otras cuencas

Las salidas de agua pueden darse de las siguientes formas:

- Evapotranspiración, bosques y/o áreas cultivadas con o sin riego.
- Evaporación desde superficies líquidas, como lago, estanques, pantanos, entre otros.
- Infiltraciones profundas que van a alimentar acuíferos.
- Derivaciones hacia otras cuencas hidrográficas.
- Derivaciones para consumo humano e industria.
- Salida de la cuenca hacia un receptor o hacia el mar.

El sistema opera bajo el principio básico de balance de masa y puede abordar además un amplio rango de argumentos tales como demandas de análisis sectorial, conservación del recurso hídrico, prioridades de demanda locales, simulaciones de flujo superficial y subterráneo, operación de reservorios, generación hidroeléctrica, seguimiento de contaminantes y requerimientos medioambientales.

El sistema WEAP como herramienta de planificación exige que el área de estudio debe ser caracterizada detalladamente en la medida de la disponibilidad de datos, definiendo cada uno de los elementos físicos que la constituyen, incluyendo el sistema de demanda y suministro de agua y su interrelación espacial, el periodo de tiempo de unidades, patrón hidrológico y en caso de ser necesario, calidad de los componentes de agua.

El sistema permite incorporar a los proyectos de suministros de agua, tanto el tema de calidad de agua como la preservación de los ecosistemas, para lo que se requiere disponer de datos de generación de contaminantes, concentraciones de oxígeno (BOD y DO) y/o cualquier otro constituyente o característica que el usuario desee analizar, que impacten en la calidad del agua.

Además, cuenta con un módulo de análisis financiero también que permite que el usuario investigue comparaciones de costo-beneficio para cada nodo de abastecimiento, análisis de costos de tratamiento de calidad de agua, análisis de costo-beneficio del agua reutilizada.

En el caso de sistemas de embalse, el sistema WEAP permite incorporar las características físicas del sistema, de operación, de generación hidroeléctrica, calidad de agua y prioridades de entrega al reservorio.

### 3.7. Análisis comparativo entre los modelos de simulación hidrológica

En este análisis se comparan en detalle algunos de los modelos previamente presentados.

### 3.7.1. Criterio económico

El factor económico es relevante en el momento de elegir un programa para modelar una cuenca ya que puede ser limitante dado los precios elevados de las licencias de los programas comerciales.

En el momento actual, los programas SIHIM, SWAT, son de libre acceso y de código abierto, lo que permite a cualquier usuario experimentado hacer sus propias modificaciones.

Los programas AQUATOOL y WEAP necesitan una licencia para su obtención y uso, la cual es gratuita, solo en el caso de instituciones gubernamentales o sin fines de lucro, para países que no estén en la OCDE.

### 3.7.2. Criterios operativos

- Soporte técnico

El tema del soporte técnico también es relevante está vinculado a la naturaleza del programa libre o comercial, ya que por lo general los programas libres carecen de un soporte técnico formal y los usuarios tienen que acudir a foros para resolver sus problemas. Caso contrario ocurre con los programas comerciales que tienen incluido en el precio de la licencia un servicio de soporte técnico que permite al usuario solucionar rápidamente los problemas encontrados.

En este sentido una de las desventajas del modelo SIHIM, es que no cuenta con soporte técnico. El programa SWAT que también es libre, propone al usuario un soporte técnico mínimo a través del intercambio de correo electrónico con el equipo desarrollador del programa y la participación en el foro que une usuarios de todo el mundo.

En el caso de AQUATOOL sólo las licencias pagadas disponen de un soporte técnico por correo electrónico durante la vigencia de la licencia.

El programa WEAP dispone de un soporte técnico, limitado por correo electrónico al equipo desarrollador (para licencias gratuitas y pagadas) y ofrece un foro de usuarios, así como también la posibilidad de solicitar un apoyo adicional personalizado por el equipo.

- Manuales para capacitación de usuario

Para entender cómo funciona un programa y familiarizarse con su uso es importante que el usuario tenga un manual de asistencia técnica o un manual de usuario que contenga ejercicios

de aplicación del programa. En el caso de los programas SWAT, AQUATOOL, y SIHIM, cuentan con un manual de usuario traducido al castellano.

WEAP cuenta con varios documentos traducidos al español entre estos se pueden mencionar: La Guía Metodológica - Modelación hidrológica y Recursos Hídricos con el modelo WEAP, editada por el Centro de Cambio Global - Universidad Católica de Chile, en colaboración con Stockholm Environment Institute (2009), y un tutorial también en español, donde se muestra a través del desarrollo de un ejemplo cómo funcionan y para que se utiliza cada uno de los módulos del programa.

- Operación de modelos

En cuanto a la operación de modelos, el análisis que aquí se presenta toma en consideración la existencia de pre y post- procesadores y de una interfaz SIG para facilitar la implementación del modelo y la representación de los resultados.

Los programas AQUATOOL, y WEAP cuentan con pre-procesador y post-procesador e interfaz SIG integrada.

En cuanto al modelo SIHIM no cuenta interfaz SIG integrada, mientras que el modelo SWAT cuenta con una extensión de ArcGis comercial o Map Windows libre.

### 3.7.3. Criterios técnicos

En cuanto a los criterios técnicos para evaluar la adecuación de los modelos a la representación de los fenómenos se busca analizar:

- Modelación de la hidrología de aportes de cuencas

Los modelos SIHIM, SWAT, y WEAP incluyen un modelo de precipitación- escorrentía

En el modelo AQUATOOLS las series temporales de caudales de las cuencas de cabecera e intermedias constituyen datos de entrada.

- Grado de complejidad de la modelación de acuíferos

La forma de modelar los acuíferos en el modelo SWAT es bastante básica, mientras que los programas HEC-HMS, WEAP, AQUATOOLS permiten elegir desde una modelación básica hasta una modelación sofisticada, en función del tipo de problema y nivel de detalle y de la información que se disponga.

El modelo de simulación SIHIM no modela acuíferos. Una de las potencialidades del modelo WEAP es la posibilidad de acoplarlo de forma dinámica al modelo de aguas subterráneas Modflow que permite presentar cualquier acuífero.

- Cálculo de demandas de cultivos

En el caso de los modelos SWAT y WEAP, el método de cálculo de la demanda de las zonas cultivadas es interno. En el caso de los modelos AQUATOOL el cálculo es externo.

Para el caso de SWAT Y WEAP se necesitan un mínimo de 3 parámetros: evapotranspiración potencial (ETP), coeficiente de cultivo y precipitación efectiva sobre la zona de riego.

En el modelo WEAP se puede sofisticar el cálculo, considerando grado de desarrollo de la planta, y grado de humedad del suelo, entre otros.

En el caso del modelo SIHIM, no calculan demandas.

#### 3.7.4. Otras características que se desprenden de la revisión

Casi todos los modelos analizados permiten trabajar con modelos de calidad de aguas, al ser modelos de planificación de recursos hídricos y no solo de simulación hidrológica como el modelo SIHIM.

Los modelos AQUATOOL, WEAP permiten evaluar económicamente cada escenario corrido. El modelo SWAT está más enfocado al tema suelo y permite cuantificar la erosión, analizar problemas de transporte de sedimentos y de contaminación complejos.

Una de las grandes ventajas de los modelos WEAP es la posibilidad de personalizarlos con la edición de scripts y la posibilidad de acoplarlos a otros programas como MODFLOW (modelo de aguas subterráneas) y aunque no cuenta con un módulo propio de autocalibración acepta el resultado de usar el módulo y PEST de calibración

#### 3.8. Selección de modelo WEAP

Luego de analizar los programas de simulación hidrológica descritos anteriormente se ha seleccionado el modelo semidistribuido WEAP, programa de tipo comercial que se encuentra libre para países en vías de desarrollo, que permite interactuar con todos los módulos del programa sin restricción alguna y que está siendo empleado por la mayoría de las instituciones internacionales que financian proyectos en América Latina, tales como el BID, ONU, FAO, entre otros.

En Venezuela no se tiene conocimiento de estudios serios que empleen el WEAP y este punto influyó a favor de su uso en esta investigación de forma de generar conocimiento sobre este tema.

WEAP cuenta con grandes potencialidades proporcionando herramientas para la planificación integral de los recursos hídricos incluidos el análisis de políticas de gestión. Es un instrumento efectivo para examinar diferentes escenarios que facilitan la gestión de los recursos hídricos. En cuanto a sus capacidades se ha visto que es un modelo que tiene un gran potencial con un enfoque integrado hacia el desarrollo del agua que posiciona los proyectos de abastecimiento del recurso en un contexto del sitio de demanda, y la preservación y protección de la calidad del agua y de los ecosistemas. En WEAP es posible generar escenarios, como por ejemplo simular demandas, suministros, escorrentías, caudales, almacenamientos, tratamiento para la calidad del agua y descarga de contaminantes y calidad en las corrientes a partir del análisis de políticas, y evaluar una gama completa de opciones para el desarrollo y gestión de los recursos hídricos ya que considera los usos múltiples y competitivos de estos sistemas.

El modelo proporciona un sistema de información de oferta y demanda de agua caracterizado por su enfoque integral al simular tanto los componentes naturales (demandas por evapotranspiración, escorrentía, flujo base) como los componentes de infraestructura entre estos están embalses, bombeo de agua subterránea, de los sistemas de agua, permitiendo al planificador una mirada más comprensiva de la amplia gama de factores que deben ser considerados en el manejo de los recursos hídricos para el uso presente y futuro.

Hoy en día cuando la asignación de recursos hídricos es limitada, las preocupaciones con respecto a la calidad ambiental, la planificación frente a la variabilidad e incertidumbre climática y la necesidad de implementar estrategias sustentables para el uso del agua son temas cada vez más importantes para los planificadores de los recursos hídricos el poder contar con una herramienta que facilite este tipo de análisis es un aspecto muy valioso para los planificadores.

## CAPÍTULO 4

### CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### 4.1. Ubicación de la cuenca hidrográfica

Peña (2000) “la cuenca del río Motatán se encuentra ubicada en la parte occidental de Venezuela, se ubica entre los  $08^{\circ} 48' 05''$  y  $10^{\circ} 03' 21''$  de latitud norte y entre los  $70^{\circ} 05' 00''$  y  $70^{\circ} 52' 45''$  de longitud oeste. Forma parte de los municipios: Urdaneta, Trujillo, Carache, Valera, Motatán, Escuque, La Ceiba, Sucre Bolívar; parte de los municipios: Rafael Rangel, Miranda, Andrés Bello y Monte Carmelo del estado Trujillo y Miranda del estado Mérida”. p. 74.

Sus principales afluentes son el río Momboy y quebrada Seca por su margen izquierda; quebradas de Dury y Cuevas, ríos Jiménez, Monaquito, Carache, Botey, Bonilla y Jirajara por su margen derecha.

La cuenca desde el punto de vista agroecológico se ha sectorizado en cinco subregiones: Planicie (2-200 msnm), Zona Baja (200-600 msnm), Zona Media (600-1600 msnm), Zona Alta (1600-4200 msnm), y los Llanos de Monay (depresión a 200msnm).

El área de estudio está comprendida entre la cota 200msnm que corresponde al área aguas arriba del Embalse Agua Viva, hasta los 4200 msnm, nacimiento del río Motatán. Cubre una superficie aproximada de  $4454 \text{ km}^2$ . Para efectos de este estudio la cuenca se dividió en dos sub áreas identificadas como subcuenca Carache y subcuenca Motatán. Ver Figura 4.1.

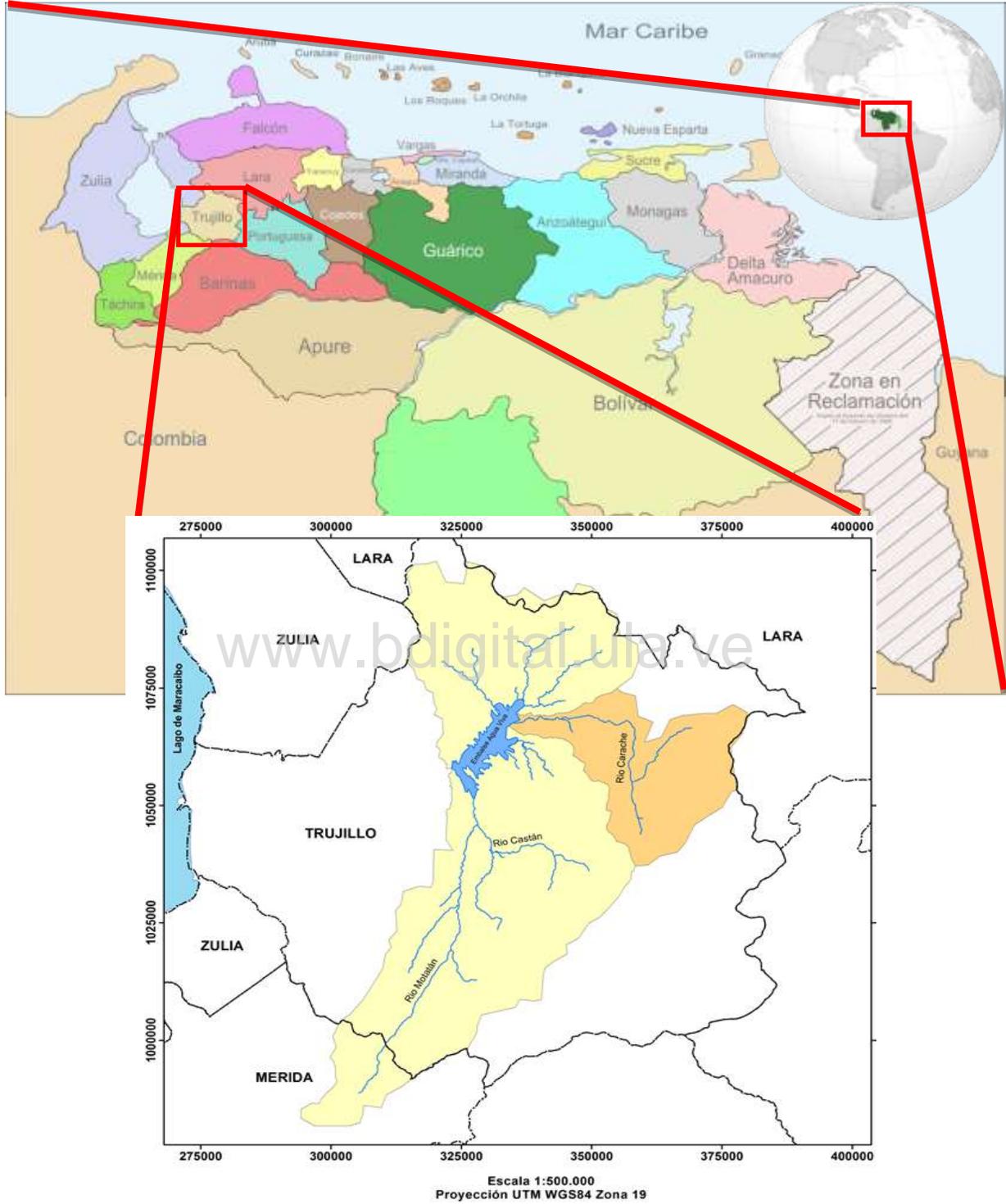
#### 4.2. Aspectos físico- naturales

##### 4.2.1. Clima

El clima está influenciado por el régimen pluviométrico bimodal, característico de la zona noroccidental del país, con valores máximos entre los meses, abril y mayo; y otro en el mes de octubre.

La red de estaciones no mide en su totalidad datos de temperatura, no obstante se estima que la temperatura media anual presenta una gran variedad desde los  $6^{\circ} \text{C}$  en los páramos de la subregión alta de la cuenca, hasta superiores a  $30^{\circ} \text{C}$  en la planicie. Para el presente estudio se tomaron las estaciones de precipitación y temperatura Guamas de Monay para la subcuenca Motatán y Escuque para la subcuenca Carache.

A continuación se muestran, en la Tabla 4.1, los datos de serial, latitud, longitud, altitud y periodo de las estaciones de precipitación, temperatura, evaporación y escorrentía que se encuentran en el área de estudio y en la Figura 4.2, su ubicación dentro de la misma.



**Figura 4.1.** Ubicación relativa del área de estudio. Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.1.** Información acerca de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

<b>Variable</b>	<b>Estación</b>	<b>Serial</b>	<b>Latitud (° ' ")</b>	<b>Longitud (° ' ")</b>	<b>Altitud (msnm)</b>	<b>Período (años)</b>
Precipitación	Guamas de Monay	2146	09 38 07	72 50 00	272	42-70
	Escuque	2162	09 18 23	70 39 43	1001	42-70
Temperatura	Guamas de Monay	2146	09 38 07	72 50 00	272	42-70
	Aeropuerto-Valera	NI	09 17 24	70 39 43	1001	42-70
Evaporación	Agua Viva	2132	09 33 35	70 37 31	110	42-70
Escorrentía	Agua Viva	2132	09 33 35	70 37 31	110	42-70

Fuente: Elaboración propia.

La variación estacional de la evaporación está asociada con la variación estacional de la precipitación y la altitud, con valores que varían en 50 y 100 mm, en el Páramo del Águila; hasta 150 a 200 mm mensuales, en los Llanos de Monay y la Planicie del río Motatán.

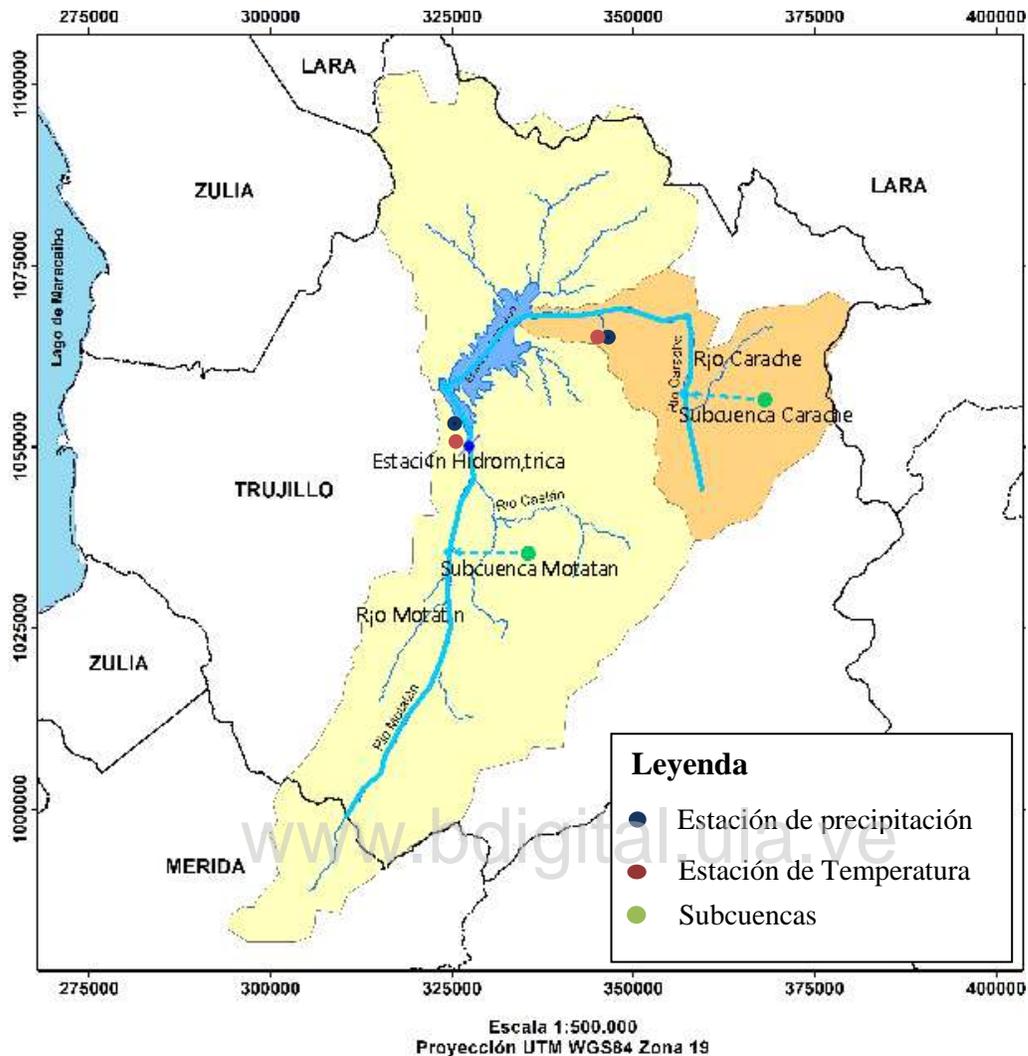
Uno de los aspectos más importantes que caracteriza a la cuenca del río Motatán es la gran intervención antrópica que existe aguas arriba del Embalse Agua Viva, la cual se debe a la cantidad de Estación de precipitación pequeñas zonas de riego y de explotación agrícola asentados en el área, que ha originado un cambio sustancial de la cobertura vegetal sin la adopción de prácticas conservacionistas.

Esto ha generado un incremento en la erosión hídrica y por lo tanto pérdida de suelo y producción de sedimentos en la cuenca que aporta al Embalse Agua Viva, disminuyendo en forma progresiva la capacidad de regulación de esta obra hidráulica.

#### 4.2.2. Geología y geomorfología

Desde el punto de vista geológico en la cuenca afloran rocas que van desde la más antiguas de los Andes Venezolanos (Precámbrico) hasta los sedimentos más recientes depositados durante el Cuaternario Reciente, los cuales se agrupan en diferentes formaciones geológicas siendo las más representativas: la Formación Sierra Nevada, Los Torres, Momboy, Mucuchachí, Palmarito, Carache, intrusiones graníticas de Chachopo y Timotes, La Quinta, Río Negro, Aguardiente, Peñas Altas, Cogollo, Apón, La Luna, Humacoro, Ranchería, Valle Hondo, Motatán, Trujillo, Paují, Caús, Palmas, Isnotú, Betijoque, Carvajal y Aluviones del Cuaternario.

El área está influenciada por numerosos fallamientos antiguos y recientes, entre ellos: las fallas de Motatán, Tuñame, Río Momboy, Piñango, El Zamuro, Trujillo, Valera y Agua Viva, el sistema de fallamiento del piedemonte Andino Oriental y el corrimiento de Las Virtudes, la mayoría de ellos con rumbo noreste al igual que la zona de falla de Boconó.



**Figura 4.2.** Ubicación de las estaciones de precipitación y temperatura en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Topográficamente la cuenca está conformada por unidades de vertiente de diversos grados de pendientes y crestas agudas que se levantan abruptamente, atravesadas por valles longitudinales y transversales generalmente en forma de V, típicos de ciclos erosivos en estado juvenil y terrazas antiguas bien desarrolladas, frecuentes en la región andina y la llanura sur-lacustre.

De las unidades geomorfológicas el modelado periglacial se encuentra desde el Paso El Águila hasta los alrededores del centro urbano Timotes, así como también en los páramos de Las Cruces, Miranda, Llano Grande, La Estrella, El Monge, El Pajarito, El Tostado, El Chorro Blanco, entre otros.

El origen del modelado periglacial se relaciona con intensos movimientos tectónicos (levantamientos y fallamientos) desarrollados durante el Pleistoceno, generándose las condiciones para las manifestaciones glaciares, las cuales modelaron el actual relieve de la Cordillera Andina, caracterizado por tener un relieve escarpado, accidentado con acumulaciones de depósitos glaciares, periglaciares y aluviales.

Estos están representados por morrenas, conos de derrubios, conos de deyección, terrazas, cono terraza y formas de erosión como circos, valles suspendidos en forma U, crestas, rocas aborregadas, lagunas, entre otros todos ellos calizados en los valles transversales y longitudinalmente que conforman el complejo Núcleo Andino Trujillo.

La masividad del relieve montañosa de la cuenca, es interrumpido a lo largo de su eje principal y perpendicularmente a él, por una serie de surcos correspondientes a los valles longitudinales de los ríos Motatán, Jirajara, Bonilla, Jiménez y valles transversales de los Carache, Monaicito, Botey, Beticó, Castán, Pocó, Buena Vista, Cheregué y La Vichú.

El modelado de las vertientes presentan una compleja situación geomorfológica, debido a lo abrupto del relieve, las diferencias litológicas, el grado de alteración y fracturamiento de las rocas, el uso irracional que se le está dando a los suelos y los cambios de condiciones climáticas reinantes. Esta complejidad físico-geográfica configura en las vertientes diferentes grados de erosión, variando desde las muy erosionadas, erosionadas, poco erosionadas hasta la no erosionadas o sin intervención.

Las áreas poco erosionadas se distribuyen regularmente en la cuenca, sin embargo cubre grandes extensiones en los alrededores de la parte baja de las Quebradas Tafallés, Charamú, El Poterro y en algunas áreas que por accesibilidad se hace difícil la intervención antrópica. Estas áreas se caracterizan por presentar procesos hídricos de moderados a bajos, disminuyendo el escurrimiento concentrado. Se observan desprendimientos de materiales, deslizamientos, reptación incipiente, debido a la poca intervención del hombre.

Las áreas no erosionadas o no intervenidas no presentan aparentemente indicio de intervención, deterioro o desencadenamiento de procesos erosivos, predominando un escurrimiento débil. Comprende áreas cubiertas de vegetación original de bosques y especies parameras.

Es importante señalar que aproximadamente el 74 % del área de la cuenca está sometida a los escurrimientos moderados y difusos que realmente no causan graves problemas en las vertientes; sin embargo, en el 26 % restante existen escurrimientos concentrados e intensos, reptación, remoción en masas, coluvionamientos, entre otros, área en la cual se deben implementar políticas de protección, conservación y uso racional para mitigar y disminuir el deterioro.

#### 4.2.3. Hidrología

El río principal del área de estudio lo constituye el río Motatán localizado en el occidente del país. Nace en el páramo de Mucuchíes, a 4077 m de altitud, en la cordillera andina, dentro del estado de Mérida, aunque discurre por el territorio del estado de Trujillo principalmente.

El río Motatán tiene rango de tercer orden en Venezuela y pertenece a la vertiente del mar Caribe a través del lago de Maracaibo. De acuerdo a un Inventario Nacional de Aguas Superficiales realizado por COPLANARH (1971), el volumen de escurrimiento anual es de  $1153 \times 10^6 \text{ m}^3$ , lo que equivale a un gasto medio de  $36,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que su nivel más bajo (estiaje) a la altura del Puente Peraza, ha sido de  $3,444 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Las crecidas de este río, en los meses lluviosos, son impetuosas y destructivas por el violento descenso de su perfil, más de 3000 m en sólo 70 km que separan su nacimiento de su paso por la ciudad de Valera. Mantiene un caudal considerable todo el año. Abandona los andes a través de una zona de fallas, en el sector de Agua Viva, donde existe un embalse, para, finalmente, desaguar en el lago de Maracaibo. Sus aguas son utilizadas para el riego en áreas de horticultura, floricultura y fruticultura comercial.

- Afluentes directos de la cuenca del río Motatán
  - Quebrada Los Aguacates: situada en el municipio Urdaneta parroquia Jajó. Cabecera: Nace al norte de la localidad de Jajó. Desembocadura: río Motatán
  - Quebrada Boquerón: situada en el municipio Urdaneta parroquia Tuñame. Cabecera: Nace en el páramo Monigote. Desembocadura: quebrada Tuñame.
  - Quebrada El Burrero: situada en el municipio Urdaneta parroquia Santiago. Cabecera: nace en la vertiente norte del cerro El Chuchuco. Desembocadura: río Jiménez.
  - Río Cabimbú: situado en el municipio Urdaneta parroquia Cabimbú. Cabecera: Nace en la vertiente norte del páramo Cabimbú. Desembocadura: río Jiménez.
  - Río Castán: situada en el municipio Trujillo parroquia Pampanito. Cabecera: nace en la vertiente norte del páramo Corazón. Desembocadura: río Jiménez.
  - Quebrada de Cuevas: situada en el municipio Urdaneta parroquia La Quebrada. Cabecera: nace en la vertiente Norte de la Fila de Niquitao. Desembocadura: río Motatán.
  - Río Carache: situado en el municipio Carache nace en los páramos de Cendé. Tiene 135 km de recorrido y desemboca en el río Motatán un poco antes del embalse de Agua Viva.

- Quebrada Chiquita: situada en el municipio Urdaneta parroquia Jajó. Nace en la vertiente Noreste de la fila El Paramito. Desembocadura: Quebrada Los Aguacates.
- Quebrada de Durí: situada en el municipio Urdaneta parroquia La Mesa de Esnujaque. Cabecera: Nace al este de la localidad La Mesa. Desembocadura: río Motatán.
- Río Escuque: nace en el sector Las Palmas y después de recorrer 20 km desemboca en el río Motatán
- Río Jiménez: situado en el municipio San Rafael de Carvajal parroquia Antonio Nicolás Briceño. Cabecera: nace en la vertiente este del cerro El Chuchuco. Desembocadura: río Motatán.
- Río Momboy: situado en el municipio Valera parroquia Mendoza. Cabecera: se forma de diversas corrientes de agua de los páramos Las Siete Lagunas y La Puerta. Desembocadura: río Motatán.

CIDIAT (1971) divide a la cuenca del río Motatán en dos unidades con las siguientes características:

Una subcuenca interior, controlada por la garganta Agua Viva, la cual se debe a los efectos orogénicos del sistema de fallas de Valera, que desarrollaron las cadenas de montañas que se extienden desde Valera hasta las cabeceras del río Jirajara.

Una subcuenca exterior que es una llanura aluvional extensa conocida como Llanos de El Cenizo, que se desarrolla a partir de la garganta de Agua Viva, presenta numerosos meandros y está sujeta a inundaciones periódicas.

El río Motatán, según FAO (1966), nace en lo que se conoce como hoya del Alto Motatán en el sector La Mesa - Pico El Águila, alcanzando alturas hasta 4300 msnm, en un valle que muestra la topografía característica de glaciación de montaña resultando en un buen régimen fluvial.

El río Motatán corre por la falla que ocupa todo el centro de la hoya y que determina su curso hasta los Llanos de Monay.

Los registros históricos del río Motatán en Agua Viva comienzan en abril de 1941 y terminan en el año 1970. Las principales características de esta cuenca, hasta la estación fluviométrica de Agua Viva son:

Área hasta la estación Agua Viva = 4454 km<sup>2</sup>

Caudal medio anual = 34,84 m<sup>3</sup>/s.

#### 4.2.4. Suelos

Los suelos de la cuenca media alta se agrupan en dos grupos:

Suelos poco profundos y esqueléticos: ubicados en un ambiente montañoso y colinar, de relieve accidentado que va de ondulado a escarpado. Estos suelos ocupan la mayor parte de la cuenca alta, totalizando aproximadamente el 87 % de la cuenca media alta.

La mayor parte de estos suelos no son propicios para uso agropecuario por tener deficiencias muy graves e irremediables, tales como abruptez, rocosidad, profundidad limitada. Dentro de esta superficie, se han identificado, aproximadamente 40550 ha, con suelos más profundos menos pedregosos y localizados en posiciones poco accidentadas que tienen una cierta aptitud para ser usados para fines agropecuarios bajo riego.

Suelos moderadamente profundos: pocos gravosos situados en vegas de ríos de montaña, terrazas, conos de deyección, conos de terrazas, de relieve algo plano a ligeramente ondulado. Estos suelos en superficie total de aproximadamente 13 % de la cuenca tienen buen potencial agrícola bajo riego y son capaces de sostener una amplia variedad de cultivos.

El problema principal relacionado a los suelos de la zona alta, lo constituye el permanente deterioro de este recurso, causado tanto por la explotación abusiva e irracional en las áreas planas, como por el laboreo indiscriminado y la carencia de cualquier medida de protección de suelo en áreas de relieve accidentado.

#### 4.2.5. Zonas de vida

En la cuenca del río Motatán existe una amplia variabilidad de las características climáticas y de pisos altitudinales. Dentro de estas divisiones naturales climáticas existe una variación en la fisionomía de la vegetación conocida como Zonas de Vida o Zonas Bioclimáticas.

En toda la parte baja y media de la cuenca, hasta alturas de 600-800 msnm, predomina el Bosque Seco Tropical y Bosque Seco Premontano. Con el cambio de las condiciones de clima hacia posiciones más altas, cambian también las zonas de vida a Bosques Húmedo Premontano y Montano Bajo, llegando a Bosques muy Húmedo y Premontano y Bosque Pluvial Montano en el suroeste de la cuenca. En las zonas altas parameras con altitudes mayores a 2800 msnm se mantiene la zona de vida de Páramo Subalpino de clima frío.

#### 4.2.6. Vegetación

La cuenca del río Motatán presenta una gran variedad de formaciones florísticas del tipo arbóreas y herbácea.

Las comunidades arbustivas representadas por matorral, espinar, cardonal y vegetación de páramo arbustivo, son las formaciones vegetales predominantes en cuanto a superficie contribuyendo también a desplazar de su hábitats naturales las formaciones boscosa, lo cual es un proceso de erosión genética vegetal que debe tratar de ser revestido.



pueden señalar (por encima de los 1000 msnm) seis tipos de clima (Andressen, 2005), tres de los cuales se localizan en la cuenca del río Carache: Mesotérmico Semiárido, cuyos rangos pluviométricos y térmicos están entre 400 mm<sup>3</sup> y 800 mm<sup>3</sup> y 16 a 22 °C, respectivamente; Mesotérmico Subhúmedo, con rango de lluvias entre 800 mm<sup>3</sup> y 1200 mm<sup>3</sup> y valores de temperatura entre 10 a 22 °C y, Páramo Sub-húmedo, con rango de precipitaciones entre 500 mm<sup>3</sup> y 800 mm<sup>3</sup> y temperaturas entre 2 y 10 °C. Por debajo de los 1000 metros de altitud, el clima que predomina en la cuenca es Megatérmico Húmedo de Bosque Tropicófilo y Sabanas (Andressen, 2005).

En relación con lo anterior, la distribución geográfica del clima en la cuenca, vendría dada por tres sectores. El primer sector, correspondiente al espacio demarcado entre la cota de los 150 y 800 msnm, con predominio de clima de Sabana; el segundo sector es el ámbito comprendido entre las curvas de los 800 m y 1400 m de altitud, con dominancia de clima Semiárido; y el tercero, a partir de este último valor hasta los 3600 m aproximadamente, con preponderancia del clima Templado de Altura, extensible hasta la parte más alta, donde se hallan enclavadas pequeñas islas de páramos: Las Rosas, Cendé y Jabón.

El comportamiento de los tipos climáticos ya citados, sobretodo el que impera en el sector más alto de la cuenca, no es del todo conocido, pues a pesar de que Venezuela llegó a tener después de los años 50 del pasado siglo, una de las redes de estaciones climatológicas más densas y completas de América Latina, para finales de siglo XX, el desmantelamiento de las mismas fue un hecho que abarcó gran parte del territorio nacional, con lo cual se perdió la posibilidad de obtener una impresionante cantidad de información climática, imprescindible para el estudio del clima y para la puesta en práctica de proyectos socioeconómicos (agrícolas, ganaderos, residenciales y turísticos). Es así como programas de gestión de riesgos y reducción de desastres socio-naturales, se ven sensiblemente afectados al no contar con la data requerida para una mejor planificación. Hasta ahora, los autores que han tratado de caracterizar climáticamente estos ambientes han debido basarse en observaciones esporádicas o en registros por períodos muy cortos.

- Temperatura

El estudio referido a las condiciones de temperatura y precipitaciones se basa en series de datos registrados en la red de estaciones instaladas en la cuenca y en su área de influencia antes de sufrir el desmantelamiento referido en líneas anteriores (ver Tabla 4.2). De estas estaciones de precipitación se consideró para este estudio la estación Guamas de Monay por tener mayor porcentaje de influencia en la zona y contar con un registro más amplio de precipitación registrada.

**Tabla 4.2.** Estaciones pluviométricas instaladas en la subcuenca del río Carache y sus alrededores. Fuente: Andressen y Díaz (2000).

Estación	Serial	Altitud	Precipitación anual (mm)	Municipio	Estado
Trentino–La Pastora	2119	559	937	Carache	Trujillo
Cuicas	2125	994	1232	Carache	Trujillo
Valle Hondo	2126	800	866	Carache	Trujillo
Puente Villegas	2127	621	1036	Carache	Trujillo
La Concepción	2138	1125	714	Carache	Trujillo
Agua de Obispos	2128	2114	867	Carache	Trujillo
Cendé	2148	3000	661	Carache	Trujillo
La Mesa Arriba	7143	2400	1350	Carache	Trujillo
San Antonio	2129	237	1244	Carache	Trujillo
Monay	2133	292	1420	Pampán	Trujillo
Guamas de Monay	2146	272	1543	Pampán	Trujillo

**Tabla 4.3.** Valores de temperatura media anual para siete estaciones localizadas dentro de la subcuenca del río Carache.

Estación	Altitud (m/nm)	Temperatura media anual (°C)
Guamas de Monay	272	28.8
Valle Hondo	800	25.9
Cuicas	994	24.8
La Concepción de Carache	1125	24.1
Carache	1320	23
Mesa Arriba	2400	16.6
Cendé	3000	13.8

Fuente: Andressen y Díaz (2000)

**Tabla 4.4.** Estación hidrométrica del río Carache

Variable	Estación	Serial	Latitud (° ' ")	Longitud (° ' ")
Esorrentía	Carache	0595	09 39 25	70 25 37

Fuente: Andressen y Díaz (2000)

- Precipitación

En la subcuenca del río Carache las precipitaciones se hallan distribuidas desigualmente a nivel espacial y temporal, inclusive hay sectores donde los montos son marcadamente superiores con respecto a otros.

#### 4.3.2. Relieve y geomorfología

En buena medida, parte del relieve sobre el que se emplaza la cuenca, corresponde al estribo andino, en el sector más oriental de los Andes Venezolanos. Se caracteriza por la presencia de formaciones montañosas, con topografía muy escarpada y accidentada; sin embargo, en sus pequeños valles, se asientan terrazas fluvio-glaciares y conos de deyección de origen cuaternario, que en muchos casos se formaron asociadas con actividades y procesos glaciares.

En las partes más elevadas de la subcuenca del río Carache, casi alcanzando el pico Cendé, el Páramo Jabón, Las Rosas y El Guache, se aprecian pequeñísimos valles en forma de "U", que permiten suponer que son de origen glacial, por cuanto estas áreas fueron afectadas, como ya se indicó, por masas de hielo en períodos globales más fríos que la época actual. Igualmente el hallazgo de rocas estriadas son vestigios de las glaciaciones que se hicieron presentes en esta pequeña porción de lo que actualmente forma parte de la geografía trujillana.

Otro significativo sector de la cuenca cuenta con un relieve relativamente plano, de escasa altitud, que se circunscribe a todo el curso bajo del río Carache.

#### 4.3.3. Geología

Está constituida por rocas originadas desde el Precámbrico hasta el Cuaternario; estas rocas, debido a las condiciones climáticas imperantes, presentan un avanzado grado de meteorización, con profundidades considerables que condicionan en buena medida el modelado abrupto del área. En la subcuenca se han presentado procesos de fallamiento, dando origen a fallas geológicas locales. Las laderas montañosas, se caracterizan en la mayoría de los casos, por la presencia de fuertes pendientes, alto grado de fracturamiento de rocas y en otros casos, escasa cobertura vegetal que, asociada a acciones antrópicas indiscriminadas, conforman un escenario morfogenético inestable, con procesos erosivos continuos que cada vez más afectan las vertientes. En esta subcuenca afloran siete formaciones geológicas: Misoa, Luna, Ranchería, Valle Hondo, Carache, Colón y Palmarito (PDVSA, 1997).

La aptitud de los suelos para uso agropecuario en la cuenca en estudio, depende de la pendiente y mayormente del clima, debido a la especialización productiva que éste conlleva. Es así, como en zonas altas (> 1000 m), las condiciones térmicas favorecen el cultivo de café a pesar de la presencia de importantes pendientes topográficas.

Específicamente en la cuenca alta y media del río Carache se encuentran suelos de origen residual y aluvial. Los suelos residuales se hallan principalmente en las colinas que bordean los valles, donde la topografía también juega un papel importante, pues cuando es inclinada o de pendientes moderadas a fuertes, facilita el proceso de erosión natural, perdiéndose la capa más superficial del suelo, que generalmente condiciona su fertilidad natural. A menudo, en esas partes de la cuenca, los suelos suelen ser poco profundos y muy erosionados sobretodo en el sector comprendido entre los 800 y 1400 m de altitud como consecuencia de la escasa vegetación que sostienen y del mal uso al que son sometidos, pues hay que recordar que el

campesino venezolano tiene, por ejemplo, un hábito generalizado desde tiempos inmemoriales, de cultivar en el sentido de la pendiente del terreno, un carácter más, quizás uno de los más dañinos, que identifica su primitivo método de producción.

Los suelos aluviales de diferentes edades, se hallan en los fondos de valle en función de procesos geomorfológicos propios de la dinámica torrencial, están constituidos básicamente por materiales aluviales que, aunados a las condiciones favorables de clima frío, les confiere una alta vocación agrícola para cultivos hortícolas.

En la parte baja de la cuenca, los suelos que predominan son los inceptisoles. Éstos son relativamente jóvenes y por tanto, poco meteorizados, desarrollados en superficies geomórficas recientes, como depósitos aluviales. Debido a su gran proporción de minerales meteorizables poseen una elevada fertilidad inherente. Gracias a la presencia de altas temperaturas e importantes montos de lluvia en gran parte del año, estos suelos se aprovechan para la práctica de otros cultivos, entre ellos, caña de azúcar y maíz. La ganadería mestiza o de tierras bajas también se ve favorecida con estos suelos, por cuanto facilitan el crecimiento tanto de pastos naturales como cultivados.

#### 4.3.4. Hidrología

La subcuenca del río Carache con un gasto medio de 0,64 m<sup>3</sup>/s y volumen de 34 millones de metros cúbicos, reúne las aguas del 25 % de la superficie del estado Trujillo (CORPOANDES, 1975), es decir 1850 km<sup>2</sup>. La parte más alta de esta cuenca es fundamental para la producción y preservación del recurso hídrico, parte del cual surte a muchos centros poblados. Adicionalmente se han reportado importantes cantidades de agua subterránea en la parte baja de la cuenca. La misma se emplea para regar superficies cultivadas de caña de azúcar, así como para otros usos.

A continuación se presenta la información hidrométrica del río Carache

**Tabla 4.5.** Caudales mensuales del río Carache en m<sup>3</sup>/s

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
<b>QO</b>	13,5	7,5	6,0	14,4	17,8	18,5	10,3	17,6	18,1	29,1	54,4	28,1

Fuente: Andressen y Díaz (2000).

#### 4.3.5. El medio biótico

- Formaciones vegetales

En la cuenca en estudio casi todos los pisos térmicos se hacen presentes, a excepción del Piso Gélido; esta situación condiciona una diversidad de paisajes o tipos de vegetación. De acuerdo a esta investigación, los tipos de vegetación que se localizan son los siguientes: Páramo

Andino (Páramos Cendé, Las Rosas, Turmal, Los Nepes y Jabón), Matorral Andino, Selva Nublada, Bosque Deciduo y Semideciduo, Selva Estacional, Bosque Xerófilo y Sabana.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## CAPÍTULO 5

### MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe el tipo de investigación a desarrollar y se presentan secuencialmente las etapas y actividades ejecutadas para lograr cada uno de los objetivos propuestos.

#### 5.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es correlacional: estos estudios miden dos o más variables que se pretenden ver si están o no relacionadas. La utilidad y el propósito principal de los estudios correlacionales es saber cómo se puede comportar una variable conociendo el comportamiento de otra variable relacionada. (Hernández *et al.*, 1996). En esta investigación se relacionan las variables lluvia- escorrentía, pretendiéndose ver cómo están vinculados estos fenómenos entre sí.

#### 5.2. Diseño de la investigación

De acuerdo a la estrategia de la investigación se puede clasificar como una investigación no experimental, se observan los fenómenos tal y como se dan en su contexto natural para después analizarlos. Hernández *et al.*, (1996). En este orden de idea los fenómenos observados en esta investigación fueron: precipitación, caudal, escorrentía.

#### 5.3. Técnicas de recolección de información

Para la recolección de la información es indispensable contar con una técnica de recolección de datos, que representan las distintas formas o maneras de obtener información, mientras que los instrumentos son medios materiales que se emplean para recoger y almacenar la información. Toda medición o instrumento de recolección de datos debe tener dos requisitos esenciales: confiabilidad y validez. Hernández *et al.*, (1996).

Este trabajo de investigación tiene como técnicas de recolección de datos la observación científica indirecta, que ocurre cuando el investigador conoce el hecho mediante observaciones realizadas anteriormente por otras personas, y la observación estructurada que se realiza con la ayuda de elementos técnicos apropiados.

Como medios para obtener la información, se dispuso de cartografía tanto en físico como digitalizada, además de bibliografía e información meteorológica.

## 5.4. Etapas de la investigación

Esta investigación se desarrolló en seis etapas:

### 5.4.1. Recopilación de la información existente

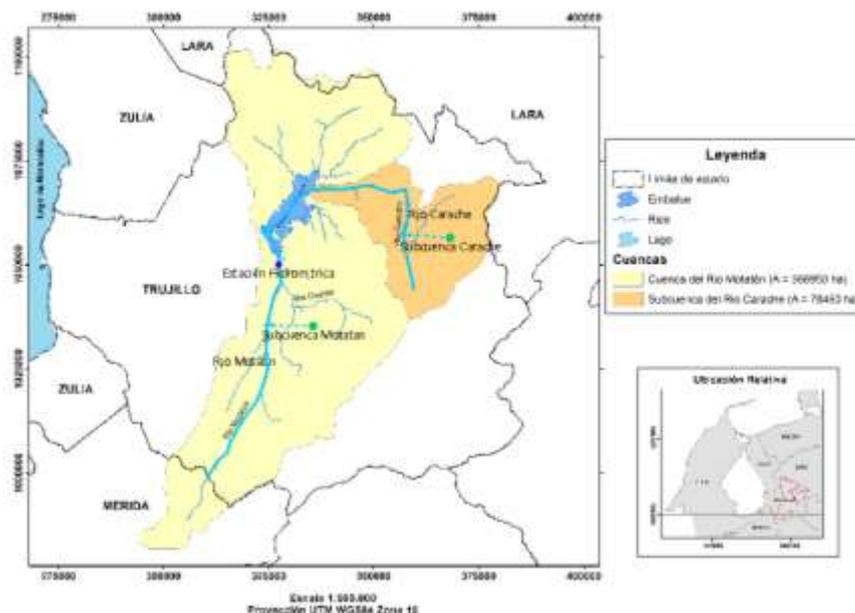
Comprende la revisión de toda la información cartográfica, climatológica, hidrométrica e hidrogeológica de trabajos de investigación elaborados en el área de estudio, tanto por entes públicos como particulares.

### 5.4.2. Diagnóstico

En el proceso de revisión de bibliografía, se encontró un mapa elaborado por Jaimes (2005), en su trabajo Homogeneidad Pedogeomorfológica y Pedogénesis en la cuenca del río Motatán este se usó como mapa base para la digitalización de la cuenca utilizando el programa Arcgis.

Según la bibliografía consultada de trabajos previos en esta misma área, se encontró que la variación de los suelos y su uso en la cuenca son particularmente en la subcuenca Carache, por esta razón se hizo una subestructura de la cuenca: la subcuenca del río Carache con predominio de suelos franco arenosos, y la subcuenca del río Motatán cuyos suelos característicos son de franco a franco limosos.

En la Figura 5.1 se muestra la delimitación de la cuenca del río Motatán hasta el sitio donde se ubica la única estación hidrométrica con información confiable de la cuenca conocida como Agua Viva, y se muestra además la subdivisión de la cuenca.



**Figura 5.1.** Delimitación de la cuenca del río Motatán y subdivisión en las subcuencas Carache y Motatán. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.3. Procesamiento de la información recopilada

- Digitalización de la cuenca del río Motatán.
- Selección del período de registro para efectuar la calibración del modelo WEAP.
- Seleccionar las estaciones medidoras de precipitación, evaporación, y escurrimiento que se usarán en el estudio.

#### 5.4.4. Creación del modelo.

- Preparación de los datos: La información de precipitación y temperatura se encontraban completos para el período de registro, por lo que no fue necesario el proceso de relleno de datos faltantes. Se utilizaron las mismas estaciones meteorológicas señaladas en la Tabla 4.1.
- Discretización de las Cuencas: WEAP al ser un modelo semidistribuido, necesita que los datos sean ingresados a partir de una subdivisión de la cuenca que se quiere analizar. La cuenca en estudio se subdividió en 2 subcuencas, subcuenca del río Carache y subcuenca del río Motatán, las cuales se delimitaron mediante el software ArcGIS.
- Creación de la topología: En WEAP se definen nodos de influencia denominados “catchments” (unidades hidrológicas). Estos representan un área geográfica en la cual las propiedades del suelo son específicas. Las unidades hidrológicas en este estudio están representadas por las subcuencas Carache y Motatán.

#### 5.4.5. Calibración y validación del modelo WEAP.

- Criterios de eficiencia para el modelo WEAP: Para determinar la eficiencia del modelo y su ajuste a los datos observados, se utilizaron los siguientes indicadores Nash Sutcliffe (NS), Bias o sesgo y Coeficiente de correlación lineal (ver capítulo 3).

##### 5.4.5.1. Calibración del modelo WEAP.

La calibración del modelo WEAP se desarrolló para la cuenca del río Motatán, considerando una escala de tiempo mensual y utilizando el periodo comprendido entre los años 1942 y 1960. Se utilizó este periodo, ya que corresponde al periodo con mayor cantidad de datos continuos para la estación hidrométrica Agua Viva (punto de cierre de la cuenca).

El proceso de calibración se realizó en una primera etapa utilizando el módulo de calibración automática Pest y luego se procedió a un ajuste manual que consistió en variar iterativamente los parámetros del modelo hasta alcanzar valores óptimos para los criterios de eficiencia.

#### 5.4.5.2. Validación del modelo WEAP

Para validar el modelo, se utilizaron los parámetros finales de la calibración sin variar sus valores y una serie distinta de tiempo para las variables de entrada, que en este caso corresponden a las del periodo comprendido entre los años 1961 y 1970.

#### 5.4.6. Corridas del modelo, simulación hidrológica y calibración automática (Pest de calibración).

##### 5.4.6.1. Corridas del modelo

Se realizaron las corridas necesarias del modelo hasta obtener valores aceptables de los criterios de eficiencias del modelo, para esto se hizo necesario variar los parámetros agronómicos hidrológicos en cada subcuenca.

##### 5.4.6.2. Simulación hidrológica

Se seleccionó de los cuatro métodos que ofrece WEAP para simular escorrentía el método de la humedad del suelo. Para la simulación de la escorrentía se realizó lo siguiente:

- Creación de las unidades hidrológicas: En este caso corresponden a las subcuencas del río Carache y Motatán.
- Conexión de cada una de las subcuencas a las corrientes respectivas: Las conexiones de las subcuencas Carache y Motatán se realizaron utilizando las líneas de escorrentía/infiltración (líneas punteadas azules en WEAP) a las corrientes del río Carache y Motatán respectivamente.
- Creación de la subestructura de cada unidad hidrológica: El área total de cada subcuenca fue dividida en porcentaje de área según los usos del suelo (cultivos, bosques, pastos, suelos desnudos) en cada una de las subcuencas.
- Entrada de los datos de precipitación, temperatura y usos del suelo: se introdujo en cada subcuenca las estaciones seleccionadas de precipitación y temperatura así como también los valores de cada uno de los parámetros agronómicos/hidrológicos de cada subestructura de la cuenca.
- Resultados de la simulación hidrológica: Se generó en una manera muy detallada el equilibrio de agua para cada clase de utilización de la tierra de cada una de las unidades hidrológicas.

##### 5.4.6.3. Calibración automática (Pest de calibración)

Se utilizó el módulo PEST (estimación de parámetros) para facilitar el proceso de calibración de los parámetros agronómicos/hidrológicos en el modelo WEAP. Para esto se procedió de la siguiente manera:

- Selección de los parámetros a calibrar: Se seleccionaron los parámetros (variables agronómicas/hidrológicas del modelo) para calibrar, dando rangos permisibles para cada uno.
- Observaciones para calibrar: Se tomó la estación hidrométrica en Agua Viva para comparar la escorrentía simulada con la escorrentía observada.

- Selección del periodo a calibrar: Se seleccionó el período comprendido entre los años 1942- 1960 para la calibración del modelo.
- Ejecución del PEST: Se generaron los archivos y se generaron los resultados de la calibración.

#### 5.4.7. Comparación entre el modelo WEAP y SIHIM

- Revisión y estudio de los modelos.
- Recopilación de la información solicitada por el modelo SIHIM.
- Cotejo de las entradas de datos solicitadas por los modelos.
- Comparación de los resultados de la calibración de cada modelo de simulación.
- Discusión y análisis de los resultados obtenidos con el uso de ambos modelos de simulación.

#### 5.4.8. Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos con el uso del modelo WEAP se analizaron para evaluar cuan buenos son y si cumplen con todas las expectativas.

#### 5.4.9. Elaboración de las conclusiones y recomendaciones

Una vez realizado todo el trabajo propuesto se redactaron las conclusiones y recomendaciones.

## CAPÍTULO 6

### SIMULACIÓN HIDROLÓGICA

#### 6.1. Desarrollo de las actividades para la modelación hidrológica

##### 6.1.1. Digitalización de la cuenca del río Motatán

Se digitalizó el mapa de la cuenca del río Motatán a escala 1:500000 utilizando ArcGis versión 10.1. En este mapa se muestran la cuenca en estudio sus principales afluentes y la subestructura de la cuenca y se puede ver en la Figura 5.1 (Capítulo 5).

##### 6.1.2. Selección del período de registro para efectuar la calibración del modelo WEAP

La data histórica de la estación hidrométrica en Agua Viva, comprende el período 1942-1970. La cuenca del río Motatán fue modelada hasta el sitio de presa que coincide con la ubicación de la estación. Esta cuenca ha sido modelada por otros autores con el modelo SIHIM en este sitio haciéndola ideal para la comparación entre SIHIM Y WEAP.

##### 6.1.3. Selección de las estaciones medidoras de precipitación

Mejías (2005) realizó un análisis de consistencia de las estaciones que tienen influencia dentro del área de estudio, evaluando que los registros de los datos fuesen suficientes y representativos de las condiciones climáticas presentes en la cuenca, eligió el período de los años 1942-1996 porque se contaba con la información necesaria y consistente que permitía, alimentar el modelo y a su vez el cálculo de la precipitación media de la cuenca.

Para estimar la precipitación media se utilizó el método de los polígonos de Thiessen y el de las Isoyetas, obteniéndose valores de precipitaciones medias de 1026,4 mm y 1046,5 mm, respectivamente.

A continuación se ubicaron las estaciones climatológicas dentro de cada subcuenca. Se seleccionaron las estaciones Guamas de Monay para la subcuenca Carache y la estación Escuque para la subcuenca Motatán con un promedio de precipitación de 1194,05 mm y de 859,23 mm respectivamente.

En la Tabla 4.1 del Capítulo 4, se mostraron los datos de serial, latitud, longitud, altitud y periodo de las estaciones de precipitación, evaporación, escorrentía y temperatura utilizadas para la simulación hidrológica.

#### 6.1.4. Selección del método de simulación hidrológica en WEAP

De los cuatro métodos a través de los cuales se puede generar escorrentía en WEAP el utilizado para hacer el modelamiento de la cuenca en estudio es el método de humedad del suelo. Se consideró el más completo, ya que considera mayor cantidad de parámetros agronómicos/hidrológicos y representa las unidades hidrológicas en dos capas de suelo, simulando en la superior la evapotranspiración considerando los parámetros climatológicos y usos del suelo, y en la inferior el flujo base del río y los cambios en la humedad del suelo, que logran describir el comportamiento de estos en cada elemento facilitando el proceso de calibración.

### 6.2. Creación del modelo

#### 6.2.1. Configuración de la cuenca

Los suelos en el área de estudio no son uniformes, razón por la cual se hizo necesario para el modelo dividirla en subcuencas para representar de forma separada los procesos que ocurren en cada una de ellas.

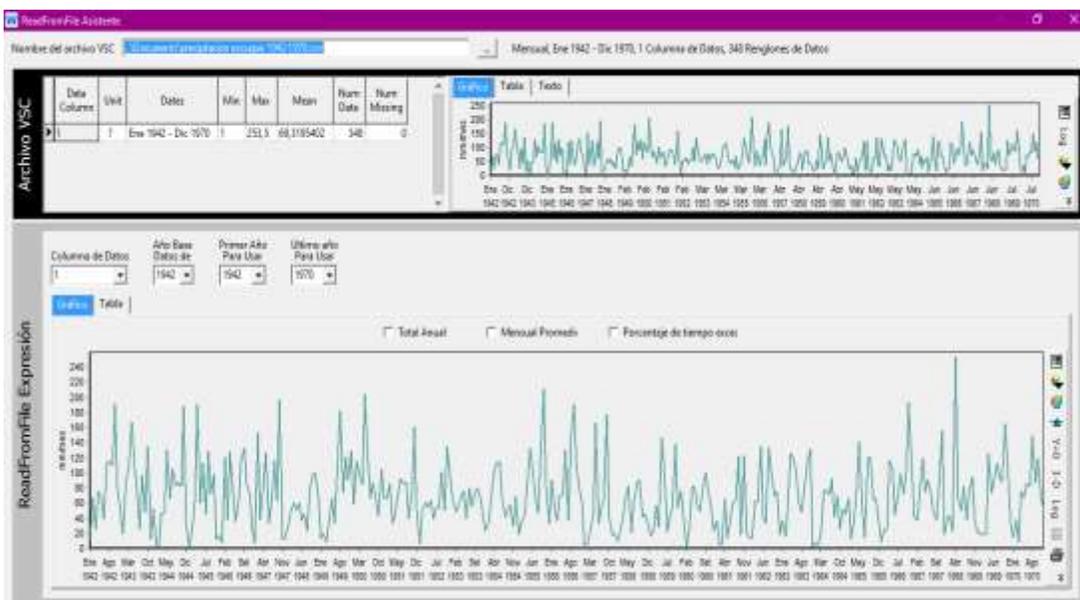
Con la distribución de las zonas, el área de estudio queda dividida hasta Agua Viva en dos subcuencas, identificadas como subcuenca del río Carache y subcuenca del río Motatán. Las cuales quedan finalmente representadas en el modelo WEAP por dos elementos como se observa en la Figura 5.1 del Capítulo 5. En esta Figura se pueden observar los nodos que representan cada una de las subcuencas, así como la unión de estas, a través de las líneas de escorrentía/infiltración hacia la corriente indicada como receptora, es decir, para la subcuenca Carache la corriente receptora es el río Carache y para la subcuenca Motatán la corriente receptora es el río que lleva este mismo nombre.

#### 6.2.2. Datos de entrada para el modelo

Es necesario para cada elemento (en el modelo WEAP, la unidad básica que representa un área, corresponde a un catchment o “elemento”) de la cuenca para introducir las variables de precipitación y temperatura, así como también los parámetros agronómicos/hidrológicos que se consideran en la formulación del modelo, siendo estos específicos para cada tipo de suelo.

En cuanto a la entrada de los parámetros de precipitación se utilizó para la subcuenca Motatán la estación de precipitación Escuque (ver Figura 6.1); y para la subcuenca Carache, la estación Guamas de Monay (ver Figura 6.2).

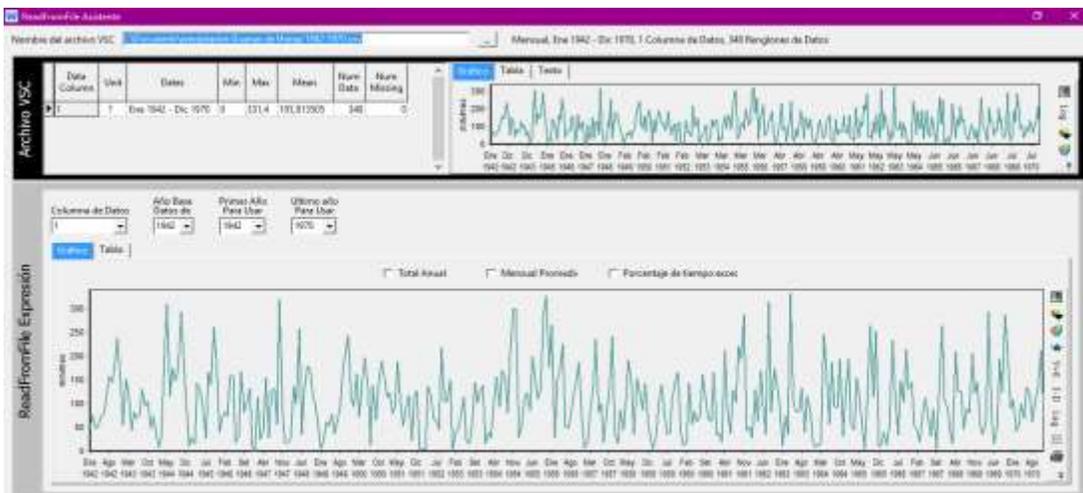
Las estaciones de temperatura seleccionadas corresponden a la estación Valera Aeropuerto y Guamas de Monay, para las subcuencas Motatán y Carache, respectivamente. Ver Figuras 6.3 y 6.4, respectivamente.



**Figura 6.1.** Entrada de datos de precipitación de la estación Escuque para la subcuenca Motatán. Fuente: Elaboración propia.

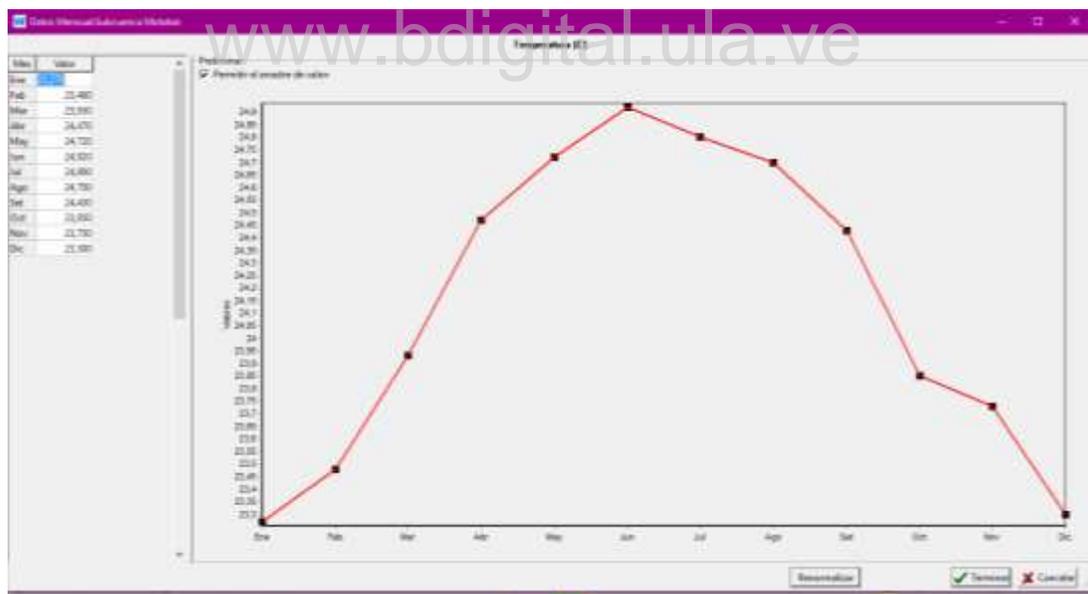
En la Figura 6.1 se pueden observar el tipo de archivo (csv o delimitado por comas) de los datos de precipitación de la estación Escuque para la subcuenca Motatán, correspondiente al período 1942-1970, así como su valor máximo de precipitación 253,5 mm y mínimo de 69,3 mm.

En la Figura 6.2 se pueden observar el tipo de archivo (csv o delimitado por comas) de los datos de precipitación de la estación Guamas de Monay para la subcuenca Carache correspondiente al período 1942-1970 así como su valor máximo de precipitación 331,4mm y mínimo 105,813mm.



**Figura 6.2.** Entrada de datos de precipitación de la estación Guamas de Monay para la subcuenca Carache. Fuente: Elaboración propia.

Para los datos de temperatura se introdujeron los valores promedios mensuales correspondientes a cada una de las estaciones seleccionadas para cada subcuenca, el gráfico de las mismas se muestra en las Figuras 6.3 y 6.4.

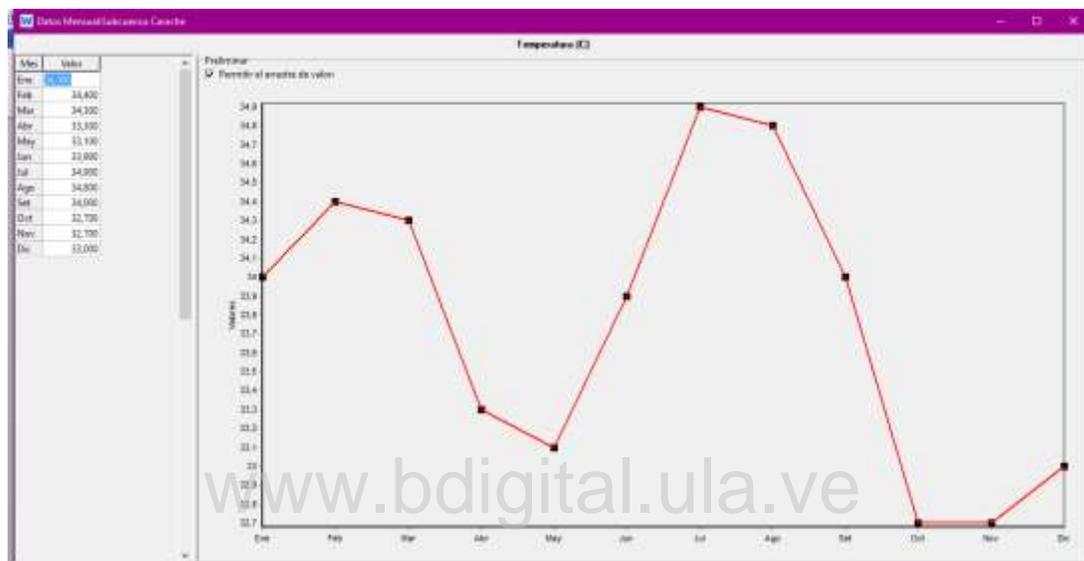


**Figura 6.3.** Entrada de datos de temperatura promedio mensual de la estación Guamas de Monay. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6.3 se puede observar la representación de la curva de temperatura promedio mensual de la estación Guamas de Monay, así como también su valores de temperatura

máxima para los meses de junio y julio, con valores de 24,92 y 24,80 °C, respectivamente; y sus valores mínimos para los meses diciembre y enero, con valores de 23,30 y 23,27 °C, respectivamente.

En la Figura 6.4 se observa la representación de la curva de temperatura promedio mensual de la estación Aeropuerto- Valera, así como también su valores de temperatura máxima para los meses de julio y agosto con valores de 34,90 y 34,80 °C, respectivamente, y sus valores mínimos para los meses diciembre y enero con valores de 33 y 34 °C, respectivamente.



**Figura 6.4.** Entrada de datos de temperatura promedio mensual de la estación Aeropuerto-Valera. Fuente: Elaboración propia.

Los registros de caudales de la estación hidrométrica en Agua Viva se introdujeron en el medidor de caudal, ubicado en el punto de cierre de la cuenca, estos caudales representan los caudales históricos del área en estudio y se utilizarán para calibrar el modelo hidrológico. También se introdujeron los parámetros agronómicos/hidrológicos, los cuales quedan definidos según el tipo de suelo en cada subestructura.

Para la estimación del rango de los valores iniciales de los diferentes parámetros agronómicos/hidrológicos (ver Tablas 6.1 y 6.2), se estudiaron las características de los tipos de suelo en las unidades hidrológicas, con base en Grassi (1988) y FAO 56 (1956), en los cuales se describen las características de los tipos de suelo y el comportamiento de los parámetros del uso del suelo.

**Tabla 6.1.** Usos del suelo y parámetros agronómicos/hidrológicos para cada unidad

Subcuenca	Área (Ha)	Cobertura	Porción del área (%)	Coef. del Cultivo (Kc)	Capacidad de agua en el suelo (mm)	Factor de resistencia a la escorrentía
Carache	78450	Cultivos	15	0,9	200-400	0-10
		Bosques	10	0,9	150-200	0-10
		Pastos	35	1	750-110	0-10
		Suelos al desnudo	40	0	200	0-10
Motatán	366950	Cultivos	30	1,1	200-400	0-10
		Bosques	40	0,9	750-1300	0-10
		Pastos	20	1	150-200	0-10
		Suelos al desnudo	10	0	200	0-10

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.2.** Usos del suelo y parámetros agronómicos/hidrológicos para cada unidad

Subcuenca	Capacidad de agua profunda (mm)	Cobertura	Dirección Preferencial del flujo	Conduct. en la zona de raíces (mm/mes)	Conductividad Profunda (mm/mes)
Carache	500-750	Cultivos	0-1	165-210	50-120
		Bosques	0-1	120-210	
		Pastos	0-1	210-330	
		Suelos al desnudo	0-1	150-350	
Motatán	750-1000	Cultivos	0-1	105-150	200-400
		Bosques	0-1	150-270	
		Pastos	0-1	60-270	
		Suelos al desnudo	0-1	60-200	

Fuente: Elaboración propia

### 6.2.3. Usos del suelo

Según Corpoandes (1971) los usos del suelo en la cuenca del Motatán se pueden resumir en tres grandes bloques, que son: cultivos, bosques y pastizales. A raíz de los procesos de deforestación, degradación de suelos y la carencia de medidas de conservación, se han incrementado las superficies desnudas, por ello se crea en las entradas el uso suelo desnudo

### 6.3. Calibración, validación y análisis de sensibilidad

#### 6.3.1. Criterios de eficiencia del modelo

Para determinar la eficiencia del modelo y su ajuste con los caudales observados se utilizaron los siguientes indicadores:

- Nash Sutcliffe:

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (6.1)$$

- Coeficiente de correlación:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (6.2)$$

- Bias o sesgo:

$$Bias = 100 * \left[ \frac{[(\bar{Q}_s - \bar{Q}_o)]}{\bar{Q}_o} \right] \quad (6.3)$$

#### 6.3.2. Calibración del modelo WEAP

La calibración del modelo se realiza para la parte de la cuenca situada aguas arriba del Embalse Agua Viva en el punto de cierre de la cuenca (estación hidrométrica Agua Viva) considerando una escala de tiempo mensual y utilizando el periodo comprendido entre los años 1942-1960, el cual corresponde al 64 % de los datos registrados de escorrentía, el resto de la serie representa el 36 %, (periodo 1961-1970), se utilizó para la validación del modelo.

La cuenca fue dividida en dos subcuencas (Carache y Motatán), la suma de las escorrentías generadas por cada una de ellas constituye la escorrentía total simulada por el modelo, la cual fue comparada con la escorrentía de los caudales históricos en el punto de control de la estación Agua Viva.

El procedimiento de calibración del modelo se realizó en dos etapas. En la primera se efectuó el análisis de sensibilidad de los parámetros agronómicos/hidrológicos para identificar cuáles reflejan mayores cambios en los resultados de la escorrentía simulada, como consecuencia de las variaciones en los mismos.

Posteriormente se utilizó el módulo PEST (Parámetro Estimación) de calibración automática para tener una primera aproximación de ajuste de los parámetros agronómicos/hidrológicos usados en el modelo. El fundamento del algoritmo PEST es la minimización de una función objetivo sumatoria de las diferencias del caudal simulado y el caudal histórico.

Los datos solicitados para este módulo son los parámetros a calibrar, y el rango de los límites superior e inferior permisibles para cada uno.

En la Figura 6.5 se presenta la pantalla, en la cual se introducen estos datos solicitados por el módulo PEST, se seleccionó en este caso la subcuenca Motatán a manera de ejemplo, pero se realizó el mismo procedimiento para la subcuenca Carache, variando de igual forma cada uno de los parámetros a calibrar, es decir, las variables seleccionadas y los rangos de los límites superior e inferior de cada una.

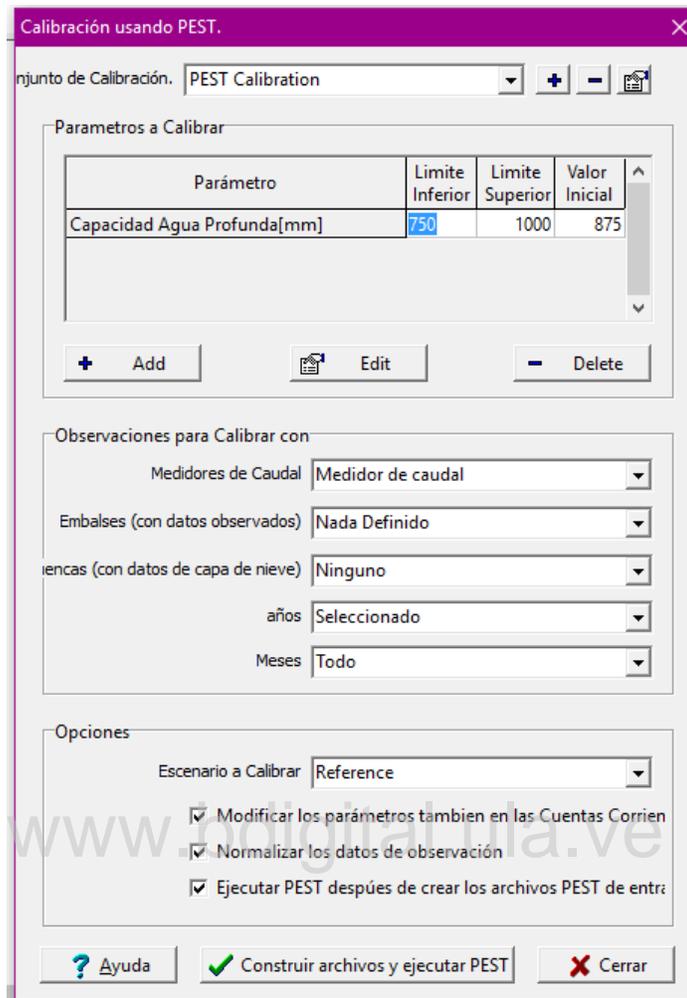
En la Figura 6.5 se puede observar que aparte de los parámetros a calibrar y las variables seleccionadas, es necesario también indicar las observaciones con las que se realizará la calibración. En este caso se seleccionó el medidor de caudal por encontrarse en este nodo registrados los datos históricos de la estación hidrométrica Agua Viva, la cual constituye el punto de cierre de la cuenca. También se indicó el subconjunto de los años para la calibración del modelo el cual corresponde al periodo 1942- 1960.

Con el uso del módulo Pest se obtuvo un valor de ajuste muy bueno entre los valores simulados y observados con un total de 0,7828 para el coeficiente de correlación lineal. En la Figura 6.6 se muestra el resultado gráfico de la calibración automática mostrado en WEAP.

En la segunda etapa se procedió a revisar a través de la calibración manual de los parámetros agronómicos/hidrológicos, la posibilidad de conseguir un ajuste un poco mejor al obtenido con el uso del módulo Pest de la escorrentía simulada y la observada.

Identificados los parámetros agronómicos/hidrológicos más sensibles, se procedió a su manipulación, calculando para cada cambio, los coeficientes de correlación lineal entre las series, (escorrentía simulada y observada), el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y el “Bias o sesgo”, hasta conseguir el máximo valor en cada uno de éstos, que permitan concluir sobre el ajuste entre ambas series.

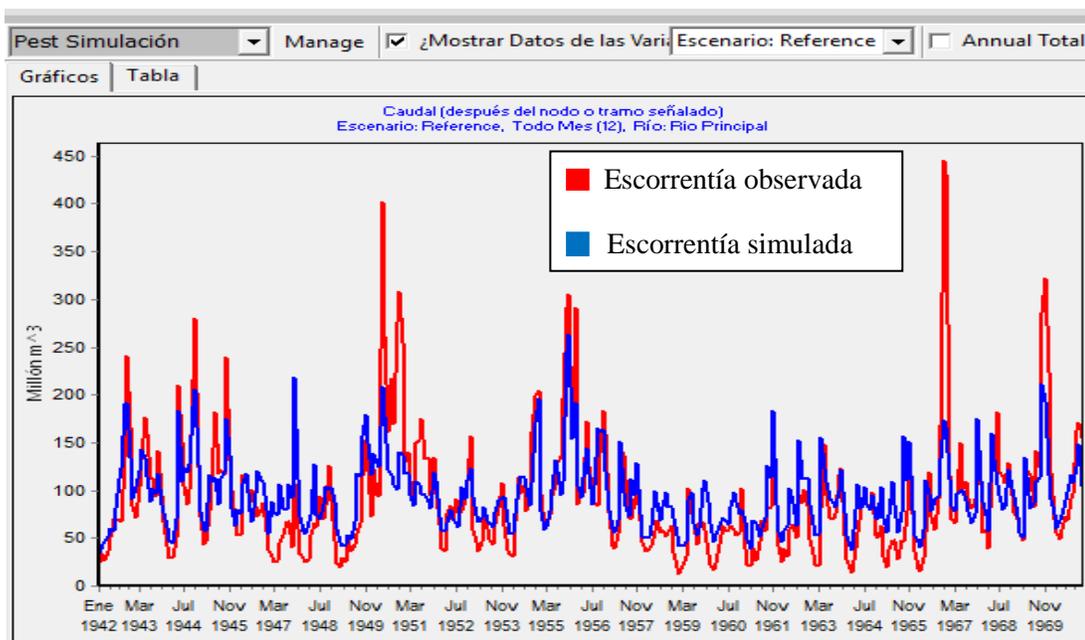
En las Tablas 6.3 y 6.4 se presentan para las subcuencas Carache y Motatán, los valores de cada parámetro para el modelo calibrado que corresponde al mejor resultado obtenido para los indicadores de eficiencia del modelo.



**Figura 6.5.** Calibración usando el módulo Pest. Fuente: Elaboración propia.

### 6.3.3. Análisis de los parámetros agronómicos/hidrológicos alcanzados durante el proceso de calibración

Porción de área: los porcentajes usados se basaron en los estudios previos, levantamientos hechos por Corpoandes (1971), destacando que la subcuenca Carache tiene serios problemas de deforestación y formaciones geológicas susceptibles a la degradación del suelo, por ello los elevados valores de suelo desnudo, menor área de bosques, grandes pastizales que facilitan el desarrollo ganadero, los cultivos tienden a ser anuales y mayormente en las zonas planas, es decir, la cobertura de bosques, cultivos anuales y de ciclo corto es mayor y más homogénea, con un porcentaje muy bajo en áreas con suelo desnudo, que generan mejores condiciones para procesos de infiltración y disminución de la escorrentía en la vertiente.



**Figura 6.6.** Calibración automática de los valores observados y simulados en WEAP. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6.3.** Valores de los parámetros agronómicos/hidrológicos en los que el modelo tuvo un buen ajuste entre las escorrentía simulada y la observada

Subcuenca	Área (Ha)	Cobertura	Porción del área (%)	Coef. del Cultivo (Kc)	Capacidad de agua en el suelo (mm)	Factor de resistencia a la escorrentía	Z1 (%)
Carache	78450	Cultivos	15	0,9	200	2	20
		Bosques	10	0,9	200	2	20
		Pastos	35	1	300	7	20
		Suelos desnudo	40	0	200	2	20
Motatán	366950	Cultivos	30	1,1	400	4	20
		Bosques	40	0,9	990	5,6	20
		Pastos	20	1	300	4	20
		Suelos al desnudo	10	0	200	2	20

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6.4.** Valores de los parámetros agronómicos/hidrológicos en los que el modelo tuvo un buen ajuste entre las escorrentía simulada y la observada

Subcuenca	Capacidad de agua profunda (mm)	Cobertura	Dirección Preferencial del flujo	Conduct. en la zona de raíces (mm/mes)	Conductividad Profunda (mm/mes)	Z2 (%)
Carache	350	Cultivos	0,7	80	100	22
		Bosques	0,6	120		
		Pastos	0,9	80		
		Suelos al desnudo	0,7	150		
Motatán	750	Cultivos	0,5	80	370	12
		Bosques	0,4	150		
		Pastos	0,6	100		
		Suelos al desnudo	0,6	130		

Fuente: Elaboración propia

Capacidad de agua en el suelo: La capacidad de agua en el suelo se toma en cuenta hasta donde se concentra el 75 % de las raíces. La subcuenca Carache por su deterioro y litología, generalmente almacena poco agua a nivel de la zona radical, por ello es que se decidió dividir la cuenca en estudio en dos subcuencas, a objeto de separar esta condición de suelo que sin duda mejora la estimación de caudales.

Los resultados de la calibración son totalmente acordes con las profundidades de suelo presentes en ambas subcuencas, así como con las profundidades alcanzadas por los tipos de vegetación y la textura y estructura de suelo presentes.

Capacidad de agua profunda: Los valores finales de calibración son mayores en la subcuenca del Motatán porque son suelos mejor estructurados, con mayor vegetación y más profundos, lo que permite almacenar en mayor cantidad. Estas condiciones son adversas en la subcuenca Carache, por ello su capacidad de almacenamiento profundo se reduce a valores cercanos a la mitad de lo almacenado en Motatán.

Factor de resistencia a la escorrentía (RRF): es usado para controlar la respuesta de la escorrentía superficial. Está relacionado con factores como el índice de área foliar y la pendiente del terreno. La escorrentía tenderá a disminuir con valores más altos, ocurre en el intervalo entre 0,1 y 10. Este parámetro varía entre los diferentes tipos de suelo.

Observando los valores obtenidos en la calibración se concluye que son acordes, ya que la subcuenca Carache tiene valores más bajos, lo que indica que escurre más superficialmente, ya

que son suelos en su mayoría desprotegidos y con elevadas pendientes que favorecen el proceso de la escorrentía; a diferencia de lo que sucede en la subcuenca Motatán, con situación de cobertura diametralmente opuestas y pendientes más onduladas.

Dirección preferencial del flujo (f): es usado para la división del flujo de la zona de raíces, entre el flujo subsuperficial y el flujo hacia la parte más baja del suelo (balde 2) o las aguas subterráneas. Sí el valor es 1,0 = 100% horizontal y sí es 0 = 100% flujo vertical.

Este parámetro puede variar entre diferentes tipos de suelo. Según los valores de este parámetro en la calibración, se tienen valores más elevados, por arriba del 60%, en la subcuenca Carache, lo que indica un flujo más horizontal y menos infiltración, de hecho es así por la poca cobertura que existe en la mayoría de la superficie, que facilita el proceso de escorrentía y disminuye de manera importante la infiltración, con ello el aporte hacia las partes más profundas del perfil litológico. En la subcuenca Motatán sucede lo opuesto, los valores tienden a estar por debajo del 50%, en su mayoría, debiéndose a que la mejor cobertura del suelo favorece la infiltración y disminuye las opciones a la escorrentía superficial.

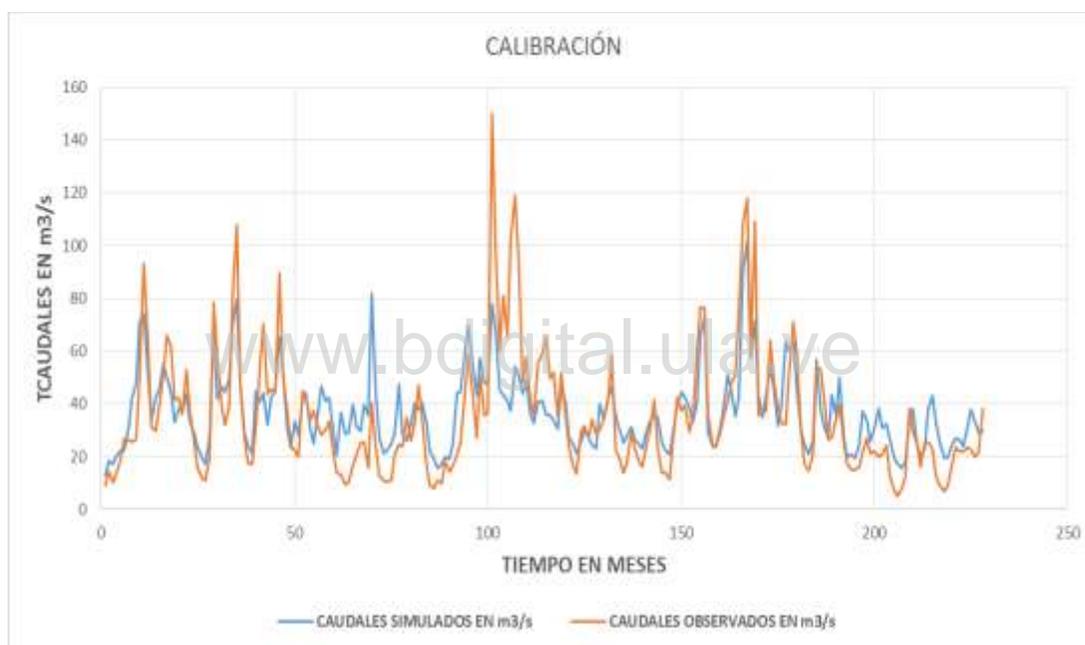
Conductividad en la zona de las raíces (Ks): se entiende como la tasa de conductividad en la zona superior (balde 1) con total saturación, que se dividirá según la dirección de flujo preferida, entre el flujo subsuperficial y el flujo de la capa inferior del suelo. Este parámetro puede variar entre diferentes tipos de suelo. En las dos subcuencas se alcanzaron valores acordes y sin mucha diferencia entre ambas, quizá un poco mayores en Motatán por la presencia de mejor cobertura y mayor área boscosa, que favorece la estructura del suelo y con ello el movimiento del agua en la misma. Suelos más gruesos en la subcuenca Carache logran que la poca agua que infiltra se mueva con cierta rapidez en el perfil.

Conductividad profunda (Kd): es la tasa de conductividad (longitud/tiempo) de la zona profunda (balde 2) con saturación total, que controla la transmisión de caudal base. Esta variable es un valor único para cada subcuenca y no varía según el tipo de suelo. Es lógico y muy real, que el valor de calibración sea mucho mayor en la subcuenca Motatán, debido a que la cantidad de agua infiltrada es significativamente superior que en la superficie de la cuenca del río Carache, debiéndose a la estructura del perfil litológico y a espesores más anchos en la misma.

Nivel de humedad en la zona de las raíces (Z1): el valor inicial se da al inicio de la simulación. Es el porcentaje del almacenamiento efectivo de la zona de conductividad de las raíces. Este valor se asemeja a la condición de capacidad de campo, y por ser un valor inicial, donde por definición no hay restricción para el almacenamiento del agua, es igual para ambas subcuencas, sumado a ello en las mismas predominan las texturas medianas o francosas, por ello su valor similar e igual para ambas subcuencas.

Nivel de humedad profunda (Z2): el valor inicial se da al inicio de la simulación. Es el porcentaje del almacenamiento efectivo de la zona del suelo más profunda. Este parámetro no varía según el tipo de suelo. En este caso resultó ser mayor en la subcuenca Carache, ya que en la misma los suelos son menos profundos y la roca apunta a procesos de escorrentía por las elevadas pendientes. En el caso de la subcuenca denominada Motatán, el balde 2 almacena menos, porque a pesar de que llega más agua al mismo, el flujo efluente hacia las aguas subterráneas es mayor, quedando poca agua almacenada en el mismo.

Los valores obtenidos para las pruebas de bondades de ajuste fueron: coeficiente de correlación lineal 0,80; índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe, 0,60; y Bias 4 %. Estos resultados pueden observarse en las Figuras 6.7, 6.8 y 6,9, respectivamente.

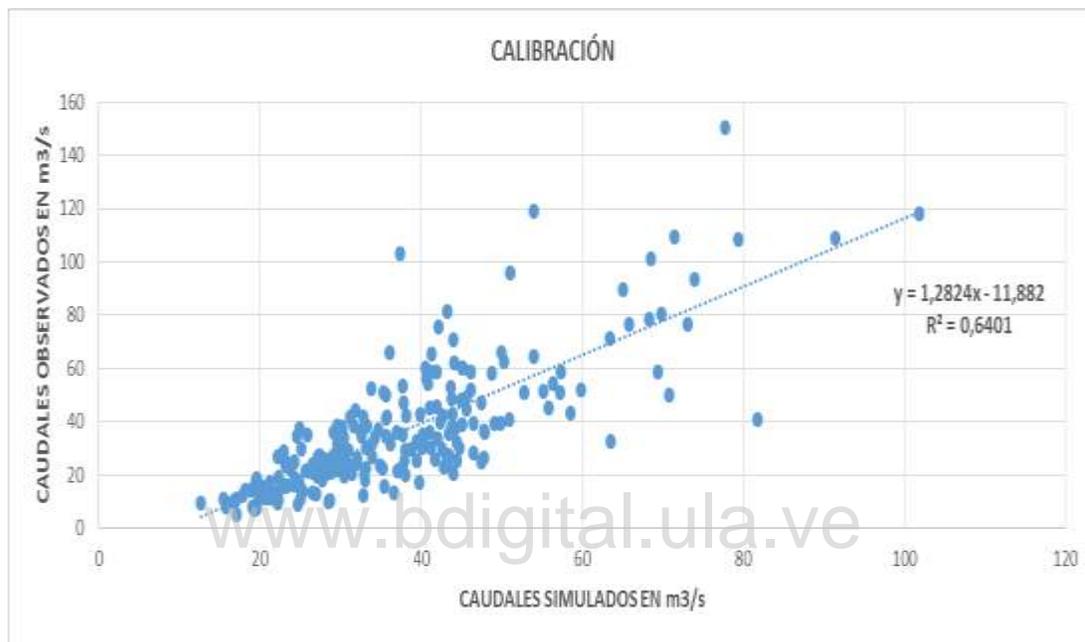


**Figura 6.7.** Calibración. Series de parámetros observados y simulados para el período hidrológico 1942-1960. Fuente: Elaboración propia.

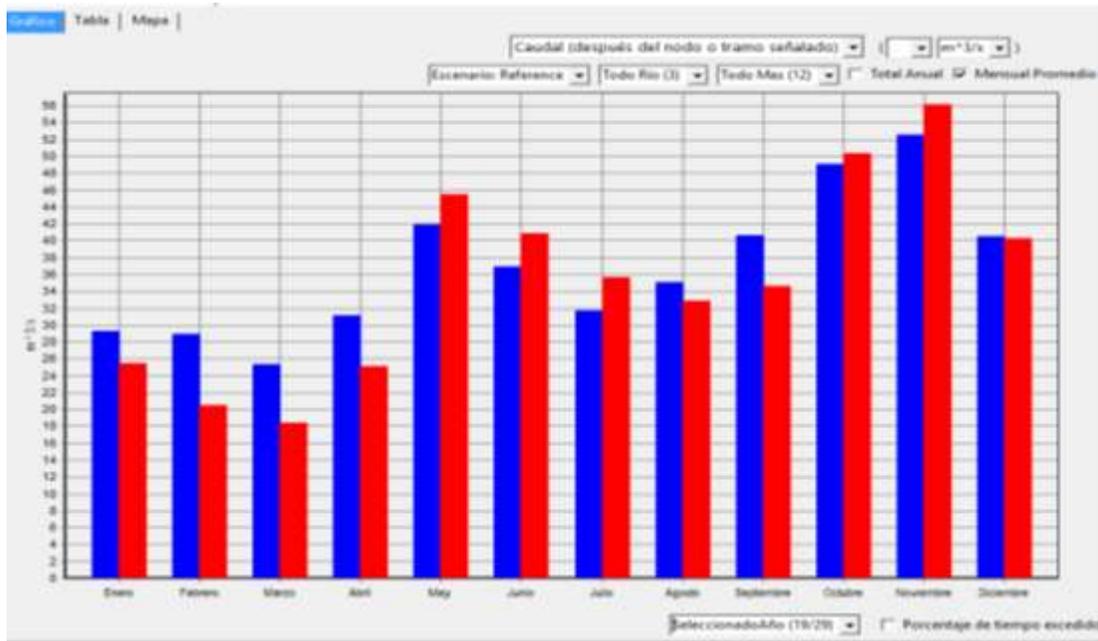
En la Figura 6.7 se puede observar como el modelo WEAP para los primeros cincuenta meses subestima el comportamiento de los caudales simulados, alternándose luego durante los siguientes cien meses, mostrando al final del periodo una sobreestimación en el caudal simulado, sin embargo, el cálculo del coeficiente de correlación lineal arrojó un valor de 0,80, el cual refleja una buena y directa relación lineal entre los caudales observados y los caudales simulados. De igual manera el índice de eficiencia según Molnar (2011) cataloga la calibración como muy buena y el valor positivo del Bias según Stockholm Environment Institute, (2009) indica sobre estimación de caudales simulados.

Se observó que el modelo tiene la misma tendencia a la investigación realizada por Labrador *et al* (2016), que el modelo tiene la tendencia a sobre estimar los caudales base y no representa adecuadamente los caudales pico.

En cuanto al coeficiente de determinación (Figura 6.8) se obtuvo un valor de  $R^2 = 0,64$ , el cuadrado del coeficiente de correlación puesto que es una regresión con una sola variable independiente ( $r= 0,8$ ) valor considerado aceptable.



**Figura 6.8.** Calibración. Correlación entre los caudales observados y simulados para el periodo hidrológico 1942-1960. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6.9.** Valor promedio mensual de caudales simulados y observados para el periodo 1942-1960. Fuente: Elaboración propia.

#### 6.3.4. Salidas del modelo

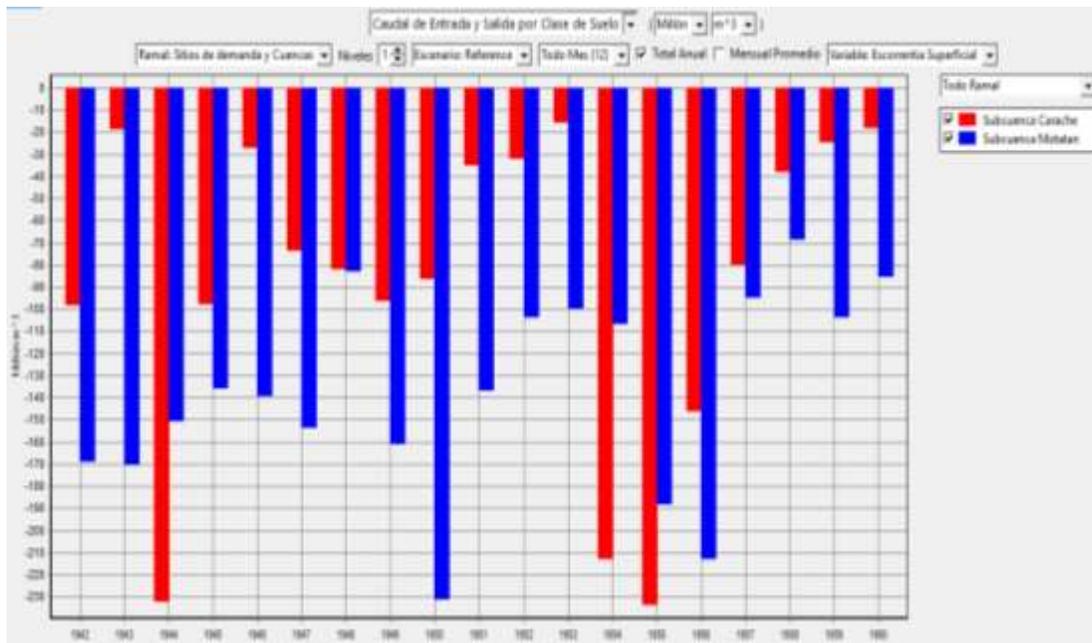
El modelo muestra la escorrentía promedio mensual en  $m^3/s$  (Tabla 6.5) y la escorrentía total generada en millones de metros cúbicos ( $Mm^3$ ), esta se muestra en la Figura 6.10. A continuación se presentan estos resultados.

**Tabla 6.5.** Escorrentía observada y simulada en  $m^3/s$  por mes durante el periodo de calibración

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
<b>QO</b>	27,01	16,64	14,57	23,99	34,53	36,17	30,09	30,69	33,78	46,91	60,74	43,53
<b>QS</b>	29,96	24,79	20,77	33,60	39,13	36,01	30,53	33,66	40,19	46,03	54,59	36,83

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6.5 se observa que los caudales simulados tienen buena aproximación a los caudales observados.



**Figura 6.10.** Escorrentía total anual en millones de metros cúbicos generada durante el proceso de calibración. Fuente: Elaboración propia.

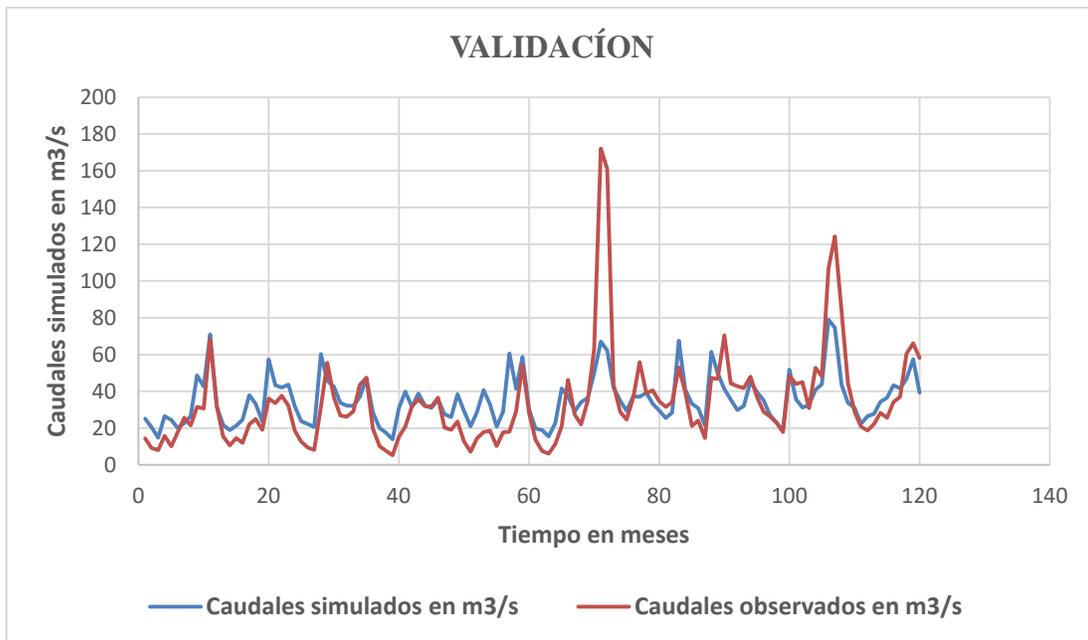
En la Figura 6.10 se observa la escorrentía total simulada durante el periodo de calibración con un total 3421,94 millones de metros cúbicos ( $Mm^3$ ), comparada a la escorrentía histórica con un valor de 3772,96  $Mm^3$  se puede concluir que son bastantes similares.

#### 6.3.5. Validación del modelo

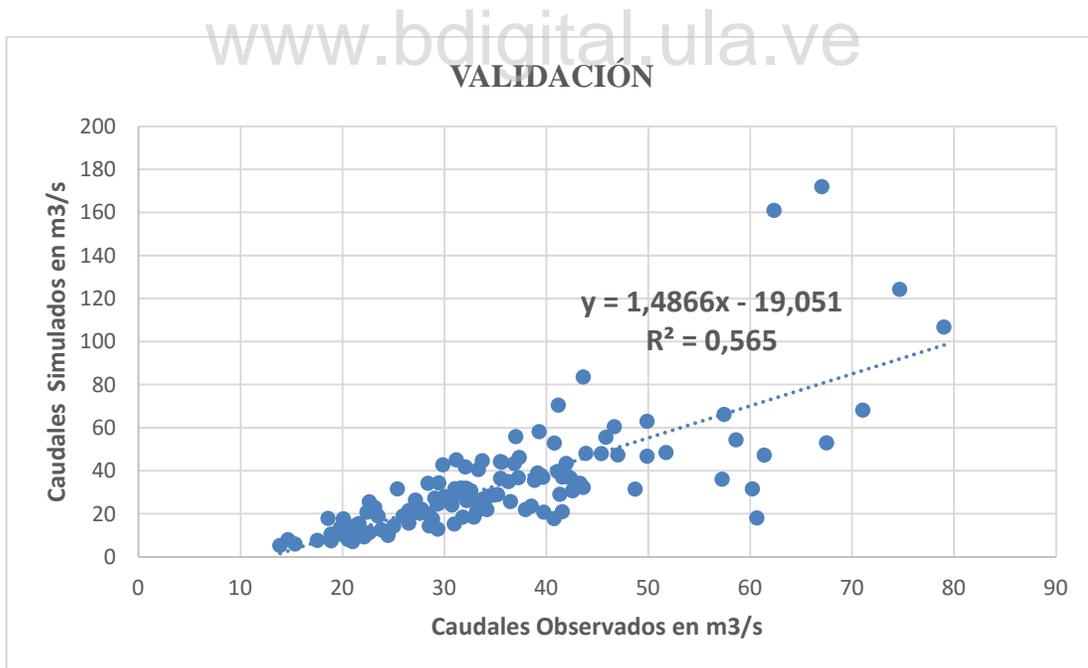
Para la validación del modelo se tomó el 36 % de los datos de la serie, es decir, el período que corresponde a los años 1961-1970.

Se realizó la corrida para este período manteniendo los mismos valores de los parámetros de calibración y se procedió a realizar la evaluación a través de las bondades de ajuste que se consideraron para la evaluación de la calibración.

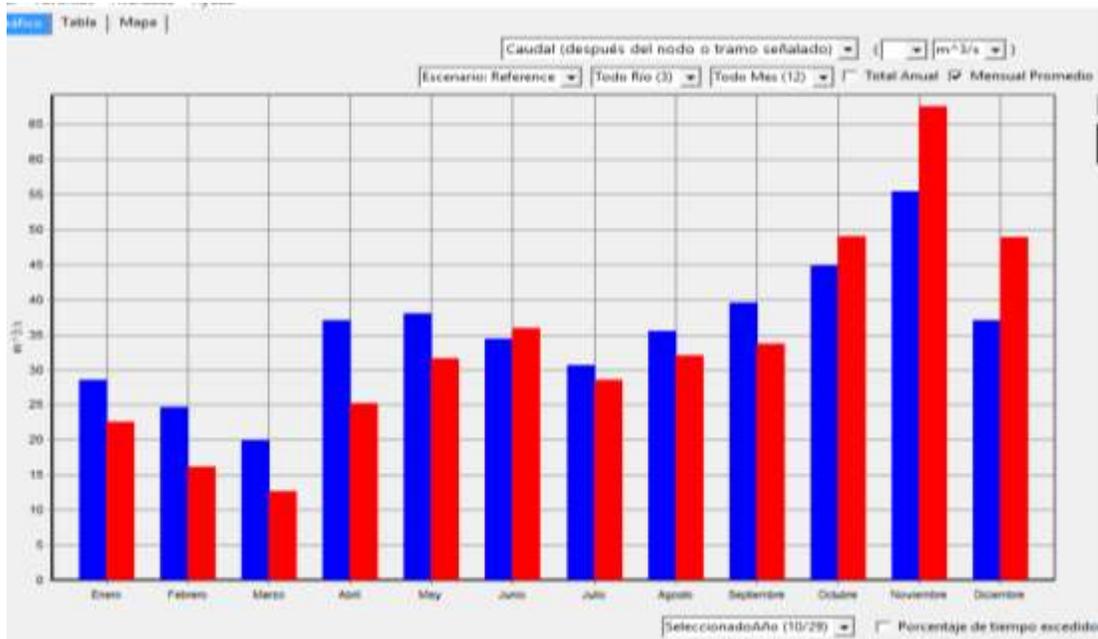
En las Figuras 6.11; 6.12 y 6.13 se observan los resultados obtenidos para la validación del modelo.



**Figura 6.11.** Validación. Series de caudales simulados y observados en el punto de cierre de la cuenca del río Motatán. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6.12.** Validación. Correlación entre los caudales simulados y observados para el período 1961-1970. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 6.13.** Valor promedio mensual de caudales simulados y observados para el periodo de validación 1961-1970. Fuente: Elaboración propia.

La validación se realiza con el objetivo de verificar la calidad de los ajustes de calibración, así como también, la calidad y confiabilidad de la información disponible para la corrida del modelo; para ello se deben usar los parámetros obtenidos en la calibración, pero en un período diferente.

Para este periodo la validación del modelo arrojó un coeficiente determinístico de  $R^2 = 0,56$ , En las Figuras 6.11, 6.12 y 6.13 se puede ver como el modelo durante el proceso de validación muestra sobrestimación en los caudales simulados y la poca sensibilidad a los caudales picos observados.

Los resultados son muy parecidos a los obtenidos en la calibración, por lo cual se decidió trabajar con los parámetros resultantes de la calibración. Ver tablas 6.3 y 6.4.

#### 6.3.6. Análisis de sensibilidad de los parámetros agronómicos/hidrológicos

Se observó durante el proceso de calibración que los parámetros que mejor se ajustaron en el modelo hidrológico fueron: factor de resistencia a la escorrentía (RRF), conductividad en la zonas de raíces ( $K_w$ ), conductividad hidráulica en la zona profunda ( $K_d$ ), dirección preferencial del flujo (DPF) y almacenamiento de agua en la zona de raíces ( $S_w$ ).

La escorrentía superficial es directamente afectada por el factor de resistencia a la escorrentía (RRF) y la conductividad en la zona de raíces ( $K_s$ ); por otro lado, si se quiere afectar los

caudales base se debe ajustar la dirección preferencial del flujo ( $f$ ) y la conductividad en la zona profunda ( $K_d$ ).

La relación entre los diferentes términos de la ecuación es no lineal, por lo tanto al afectar un término, se afectan los otros de forma indirecta.

Otro factor de calibración como la conductividad hidráulica de la zona profunda,  $K_d$ , puede ser incrementado, aumentando la conductividad, y por tanto la descarga de los perfiles profundos, y el consecuente aumento en los caudales base.

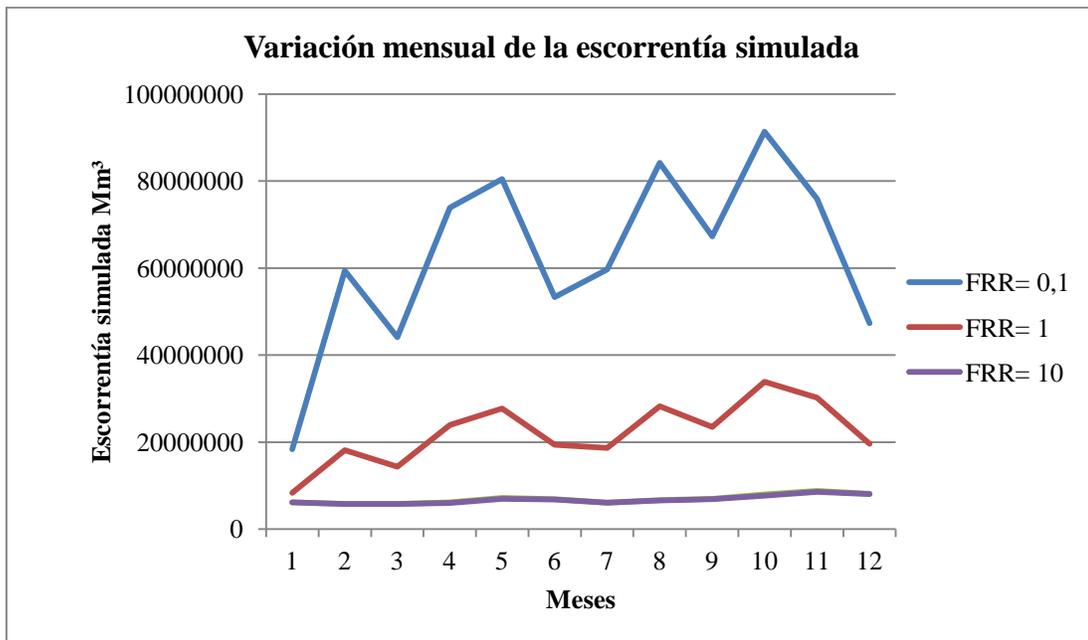
Si se aumenta la capacidad hídrica del perfil superior ( $S_w$ ), se logra un mayor flujo sub-superficial, y por tanto un aumento de los caudales máximos.

Para el parámetro de capacidad de retención de humedad en el perfil profundo ( $D_w$ ), regula la transmisión de los flujos a los caudales base.

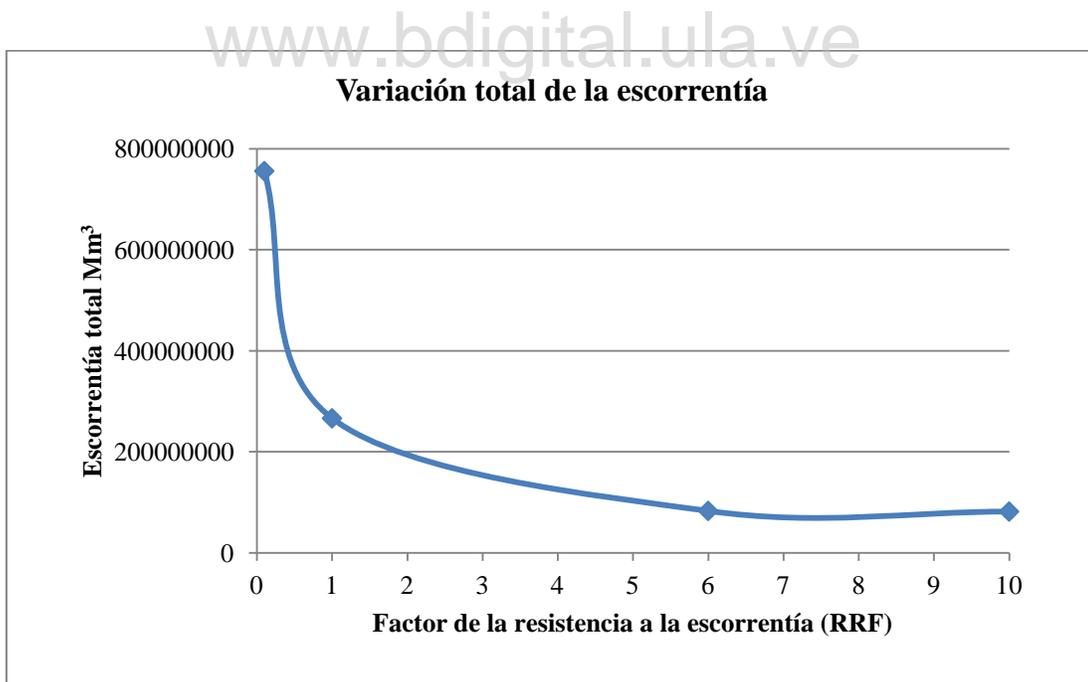
A continuación se muestra gráficamente el análisis de sensibilidad de los parámetros nombrados anteriormente.

- Análisis de sensibilidad del parámetro factor de resistencia a la escorrentía (RRF)

En la Figura 6.14 y 6.15 se presenta la variación mensual y total de la escorrentía para diferentes valores de RRF. En ella se observa que a medida que se incrementa el valor de RRF se produce una disminución en el valor de la escorrentía simulada hasta el punto en que llegan a ser iguales estas escorrentías, tanto a nivel mensual como total.

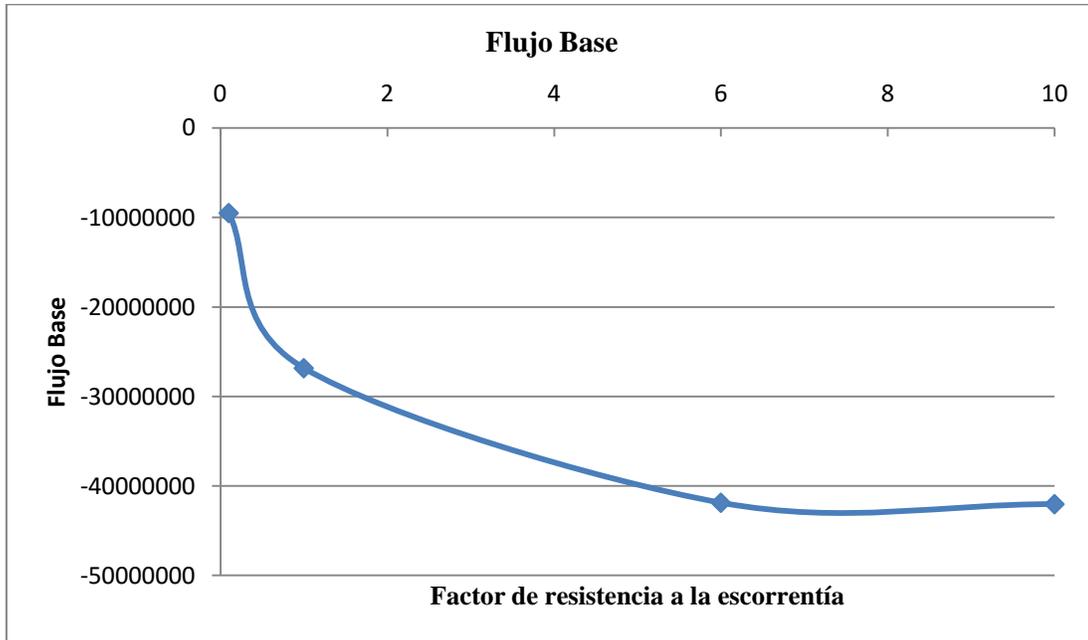


**Figura 6.14.** Variación mensual de la escorrentía. Fuente: Elaboración propia



**Figura 6.15.** Variación total de la escorrentía simulada. Fuente: Elaboración propia

Al incrementarse el valor de RRF disminuye la escorrentía y se incrementa el caudal base, tal como se muestra en la Figura 6.16.



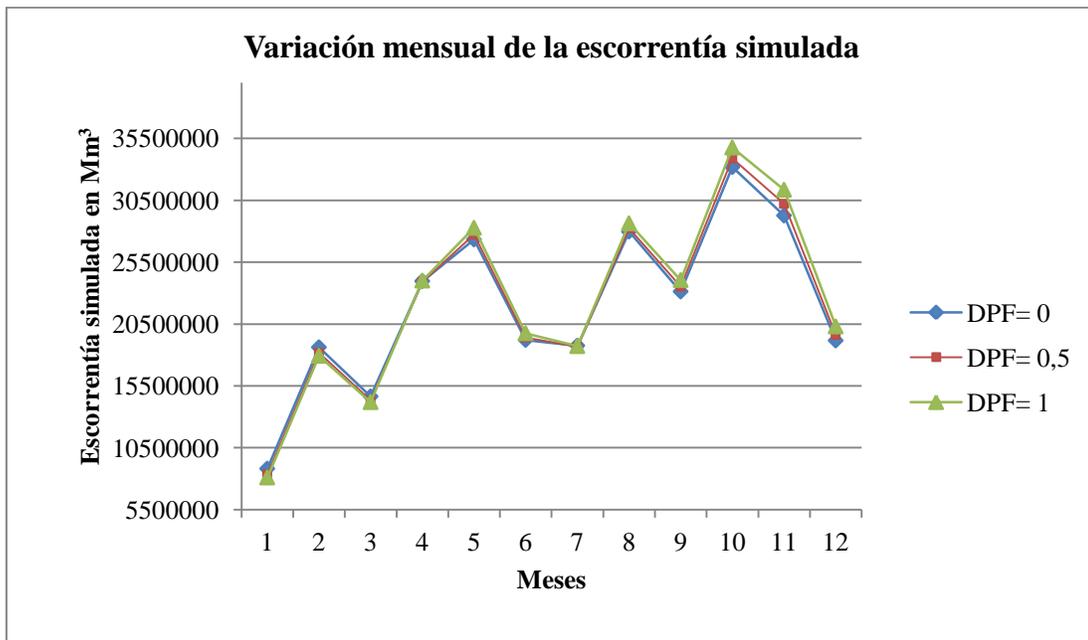
**Figura 6.16.** Variación del flujo base. Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa que los valores del flujo base son negativos, esto se debe a que el modelo WEAP muestra las variables que salen del sistema con signo negativo.

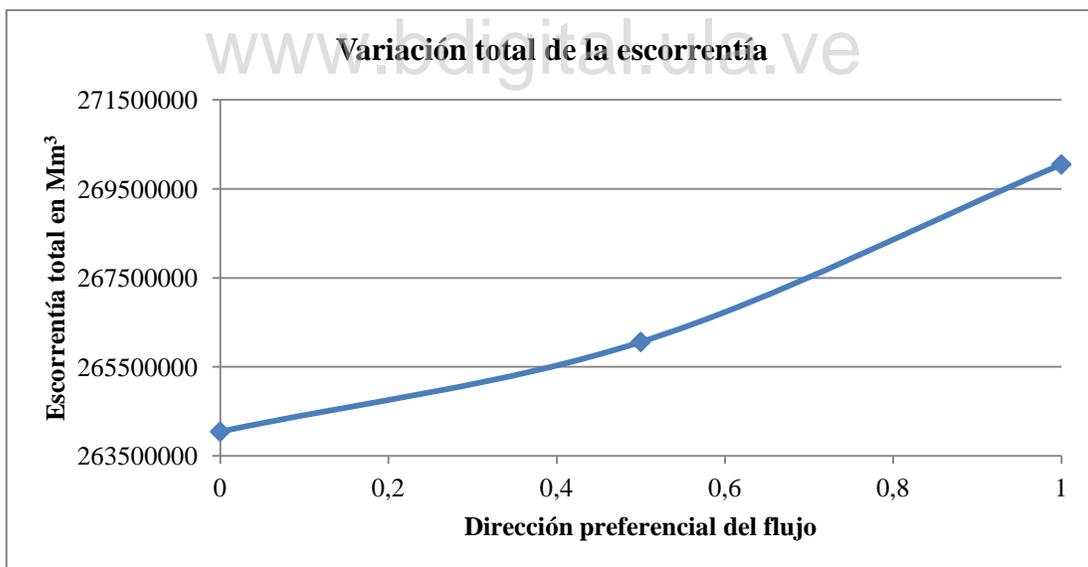
- Análisis de sensibilidad del parámetro dirección preferencial del flujo (DPF)

En la Figura 6.17 y 6.18 se presenta la variación mensual y total de la escorrentía para diferentes valores del parámetro dirección preferencial del flujo (DPF). En ella se observa que a medida que se incrementa el valor de DPF se produce una disminución en el valor de la escorrentía simulada a nivel mensual y un aumento en el valor de la escorrentía total.

Se observa en estas figuras que el parámetro DPF no afecta de manera significativa las escorrentías simuladas pero sí el caudal base.

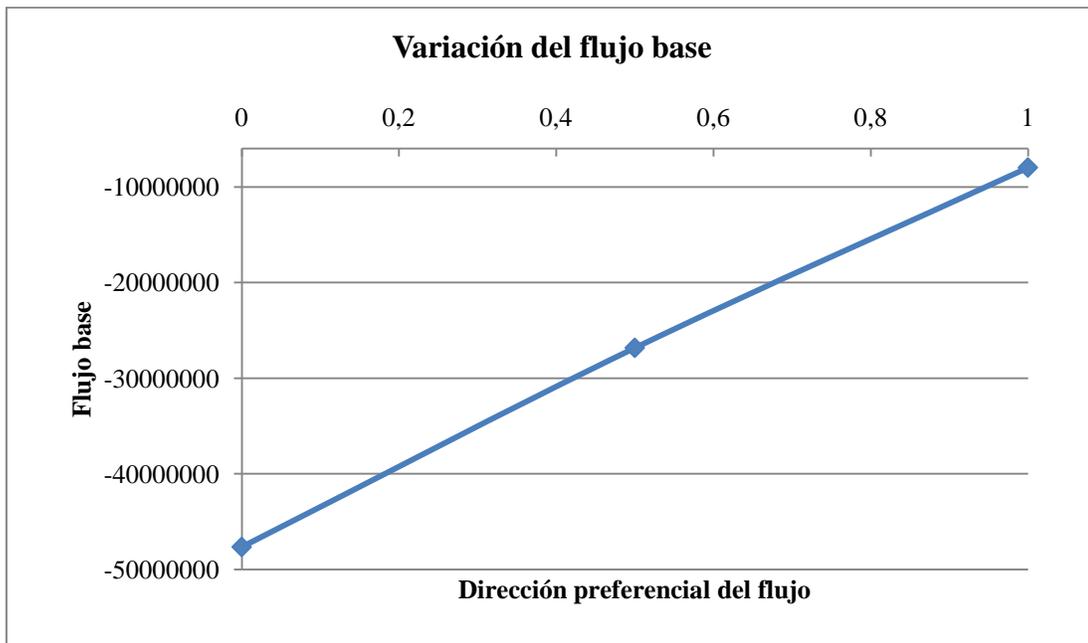


**Figura 6.17.** Variación mensual de la escorrentía simulada. Fuente: Elaboración propia



**Figura 6.18.** Variación total de la escorrentía simulada. Fuente: Elaboración propia

Al incrementarse el valor de DPF aumenta la escorrentía total y disminuye el caudal base, tal como se muestra en la Figura 6.19.

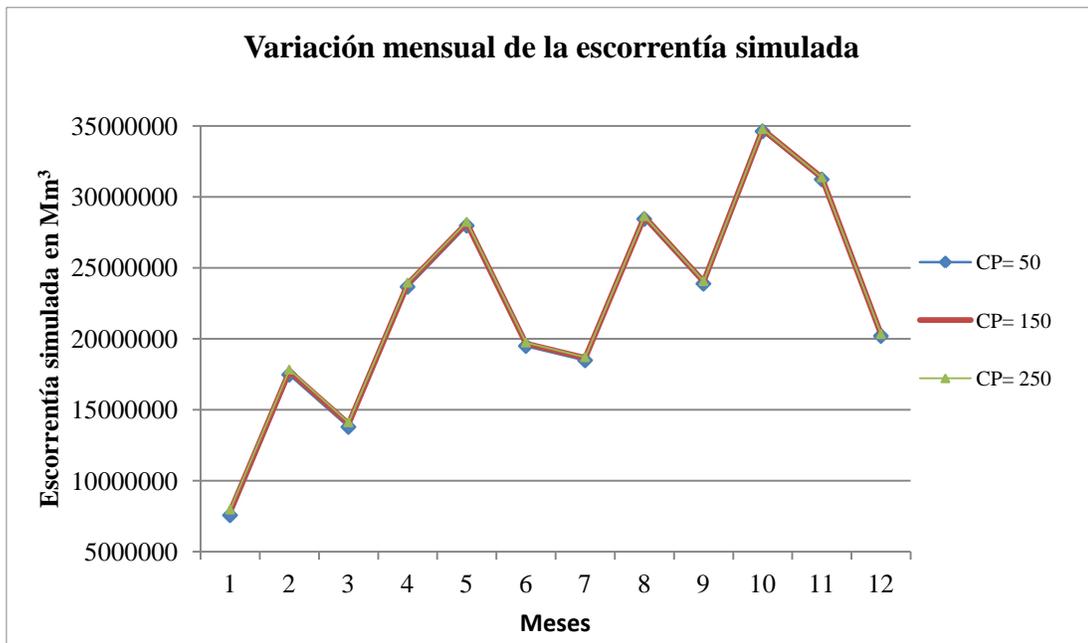


**Figura 6.19.** Variación del flujo base. Fuente: Elaboración propia

- Análisis de sensibilidad del parámetro conductividad en la zona profunda (CP)

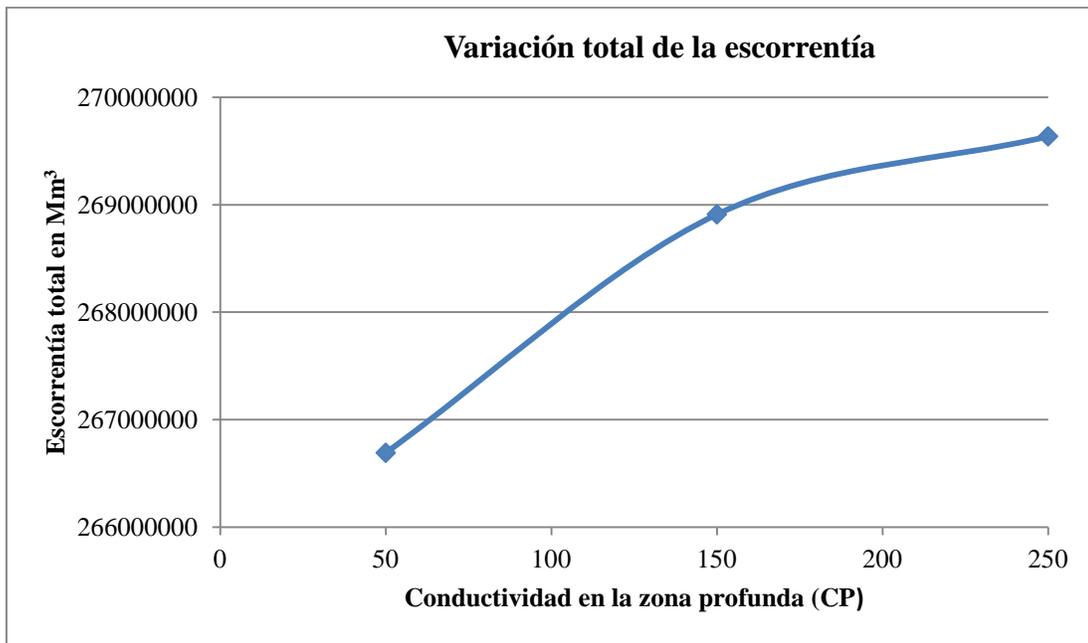
En la Figura 6.20 y 6.21 se presenta la variación mensual y total de la escorrentía para diferentes valores del parámetro conductividad en la zona profunda (CP). En ella se observa que a medida que se incrementa el valor de CP se produce un aumento en el valor de la escorrentía simulada a nivel mensual y total.

Se observa que este parámetro presenta muy poca sensibilidad para ambas escorrentías, pero si afecta el caudal base.



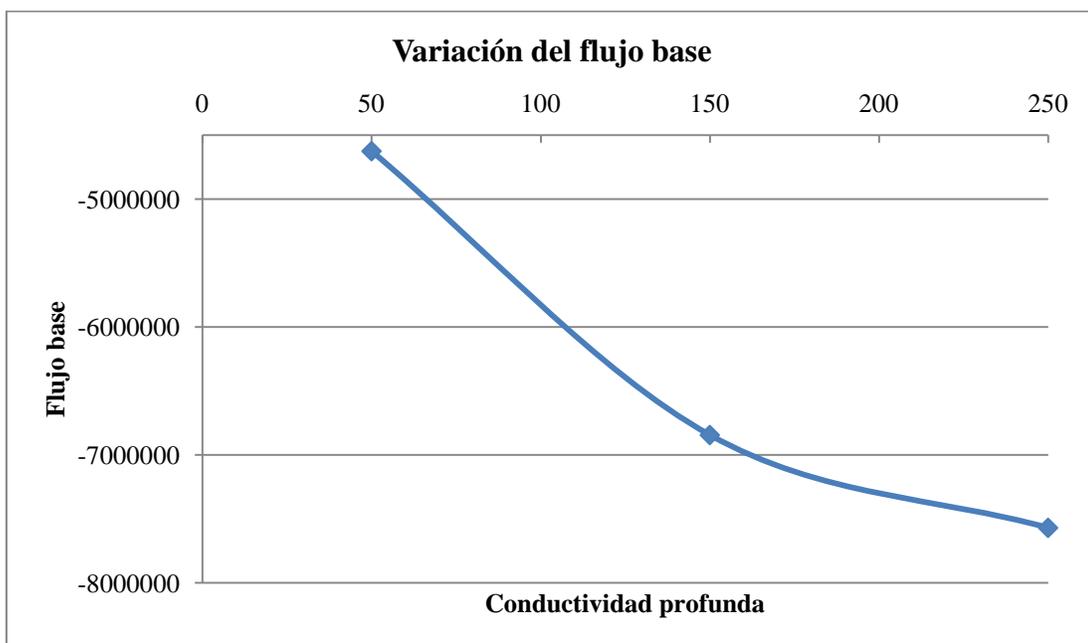
**Figura 6.20.** Variación mensual de la escorrentía simulada. Fuente: Elaboración propia

Se observa en el gráfico anterior, que a pesar de que con el aumento del parámetro CP hay un aumento en la escorrentía mensual simulada, las diferencias entre las escorrentías simuladas para cada valor del parámetro en estudio es muy poca, pudiendo concluirse que el parámetro CP presenta poca sensibilidad.



**Figura 6.21.** Variación total de la escorrentía simulada. Fuente: Elaboración propia

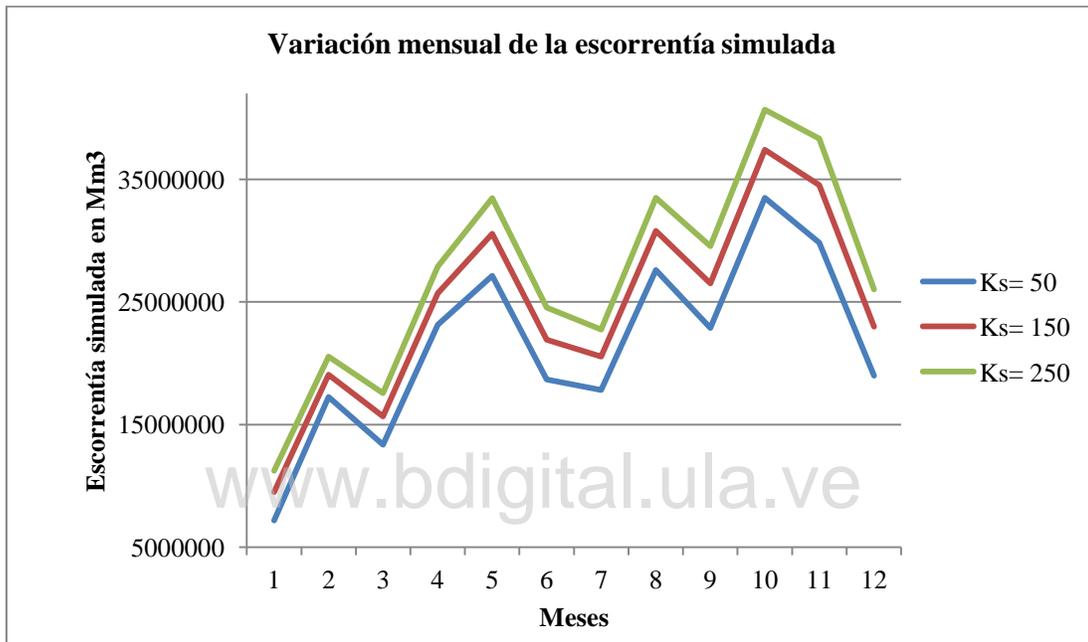
Al incrementarse el valor de CP aumenta la escorrentía total y disminuye el caudal base, tal como se muestra en la Figura 6.22.



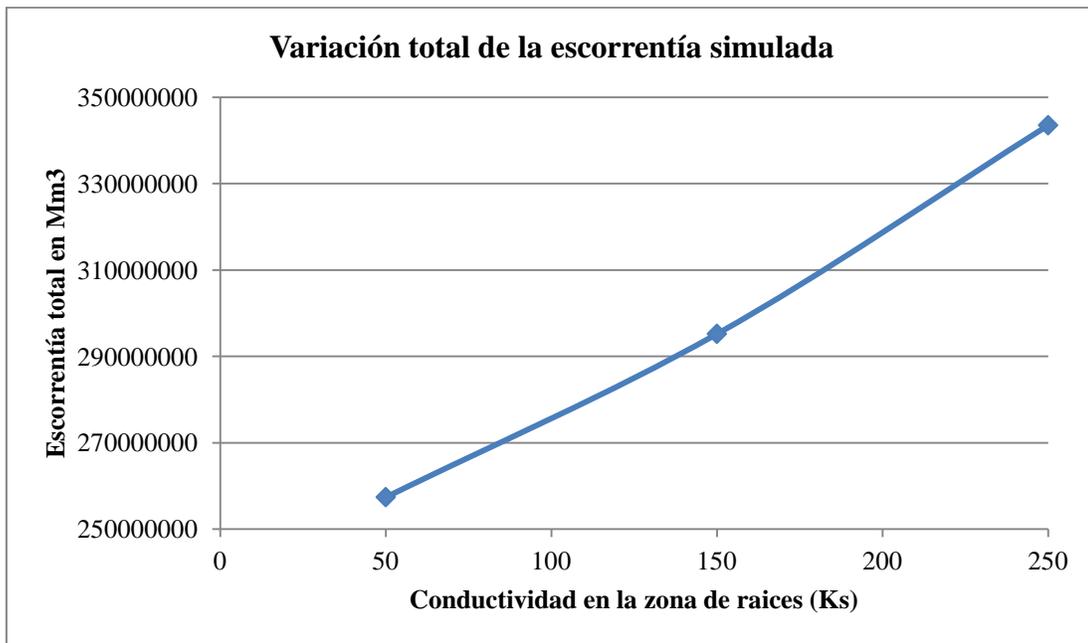
**Figura 6.22.** Variación del flujo base. Fuente: Elaboración propia

- Análisis de sensibilidad del parámetro conductividad en la zona de raíces (KS)

En la Figura 6.23 y 6.24 se presenta la variación mensual y total de la escorrentía para diferentes valores del parámetro conductividad en la zona de raíces (Ks). En ella se observa que a medida que se incrementa el valor de Ks se produce un aumento en el valor de la escorrentía simulada a nivel mensual y total.

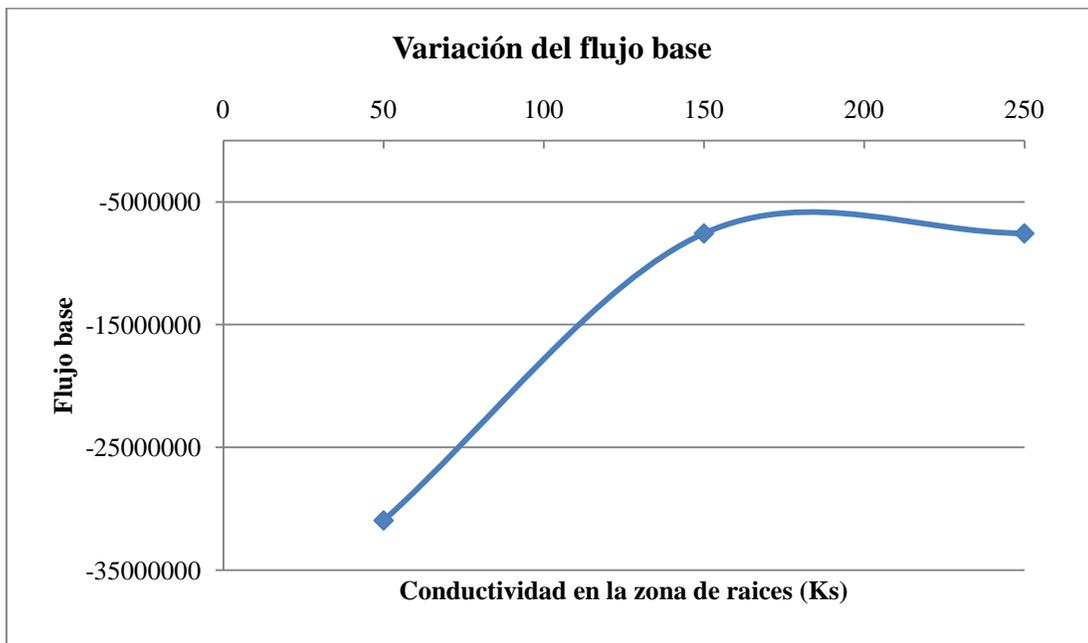


**Figura 6.23.** Variación mensual de la escorrentía simulada. Fuente: Elaboración propia



**Figura 6.24.** Variación total de la escorrentía simulada. Fuente: Elaboración propia

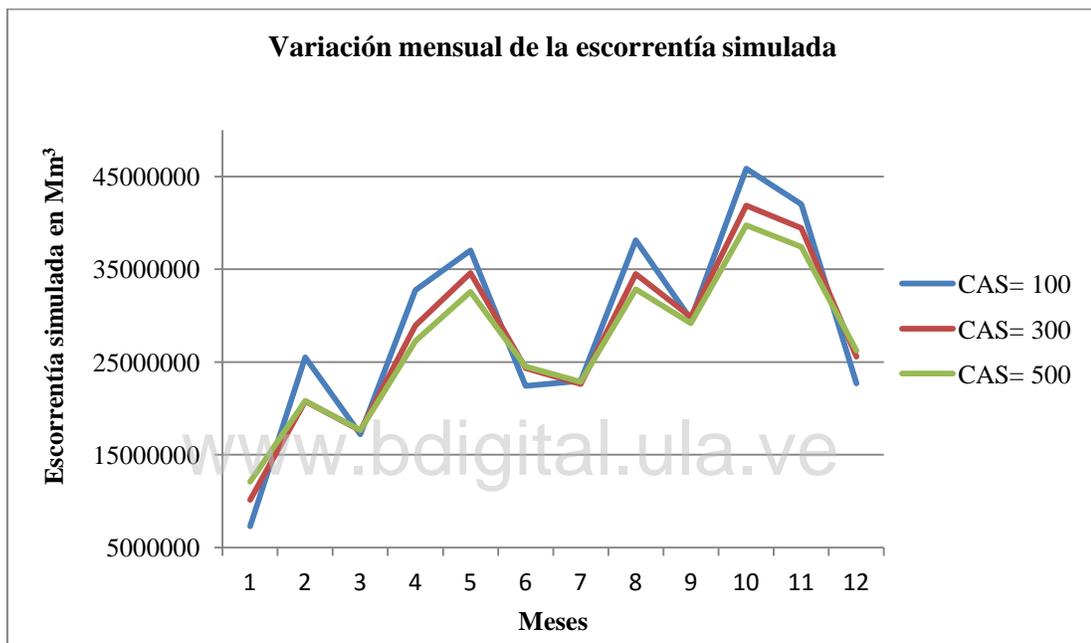
Al incrementarse el valor de Ks aumenta la escorrentía y disminuye el caudal base, tal como se muestra en la Figura 6.25.



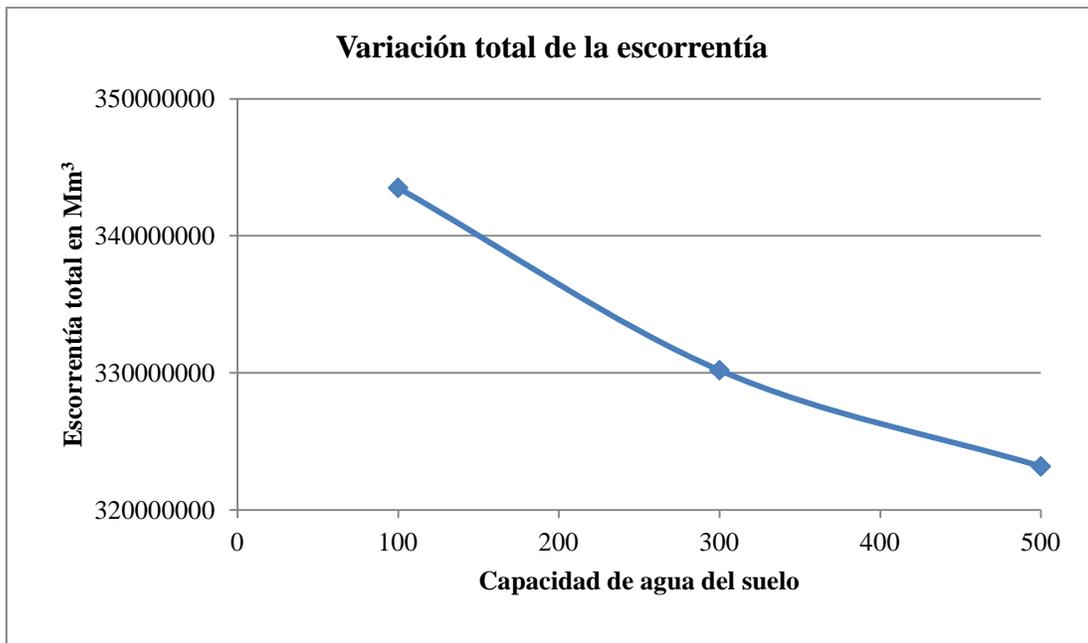
**Figura 6.25.** Variación del flujo base. Fuente: Elaboración propia

- Análisis de sensibilidad del parámetro capacidad de agua del suelo (CAS)

De la Figura 6.26 Y 6.27 se tiene que la capacidad de agua del suelo (CAS) afecta de manera más o menos constante la escorrentía a nivel mensual, y la escorrentía total disminuye al aumentar el valor de CAS.

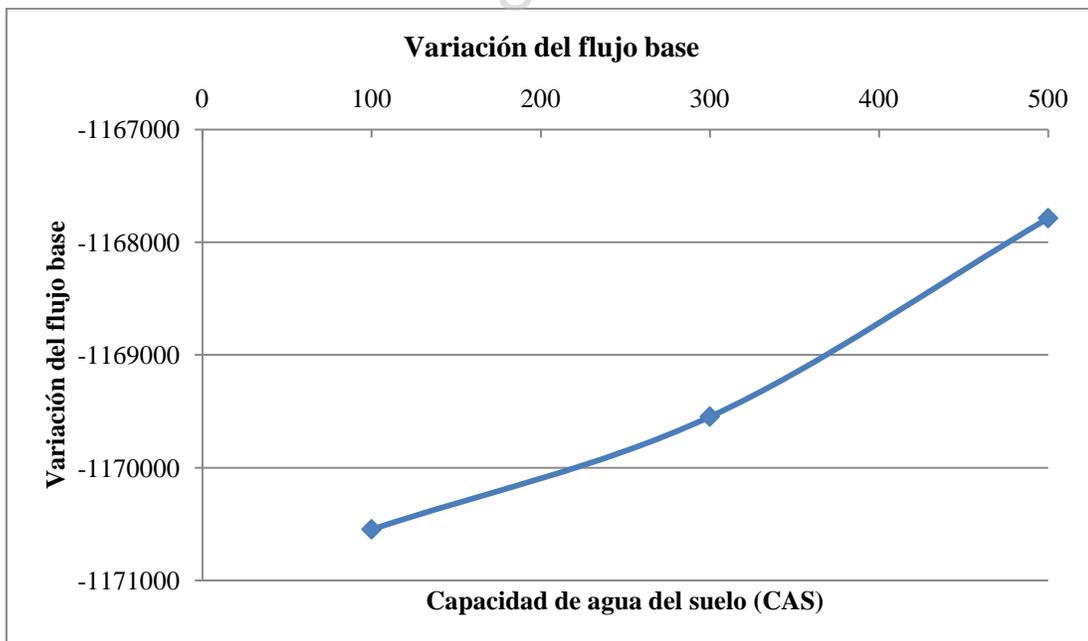


**Figura 6.26.** Variación mensual de la escorrentía simulada. Fuente: Elaboración propia



**Figura 6.27.** Variación total de la escorrentía simulada. Fuente: Elaboración propia

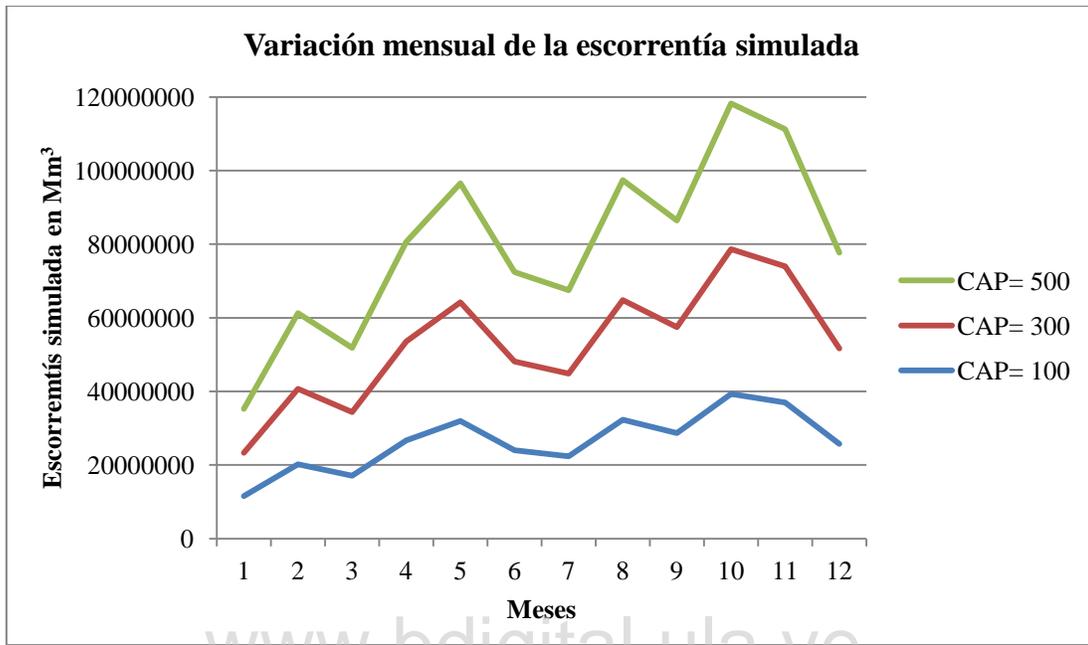
En la Figura 6.28 se aprecia que el parámetro CAS tiene muy poca influencia sobre el flujo base.



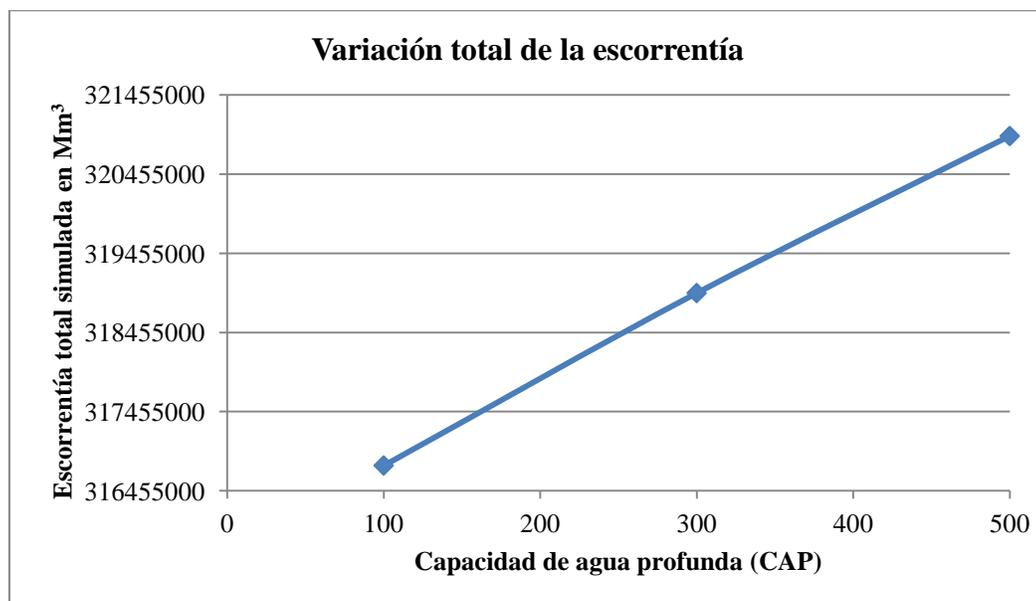
**Figura 6.28.** Variación del flujo base. Fuente: Elaboración propia

- Análisis de sensibilidad del parámetro capacidad de agua profunda (CAP).

A medida que se incrementa el valor de CAP, se produce un incremento en la escorrentía mensual y en la escorrentía total simulada, tal como se muestra en la Figura 6.29 Y 6.30.



**Figura 6.29.** Variación mensual de la escorrentía simulada. Fuente: Elaboración propia



**Figura 6.30.** Variación total de la escorrentía simulada. Fuente: Elaboración propia

En la figura 6.31 se observa que el parámetro capacidad de agua profunda (CAP) afecta de manera significativa el flujo base. En la medida en que aumenta la escorrentía mensual y total el flujo base tiende a disminuir.

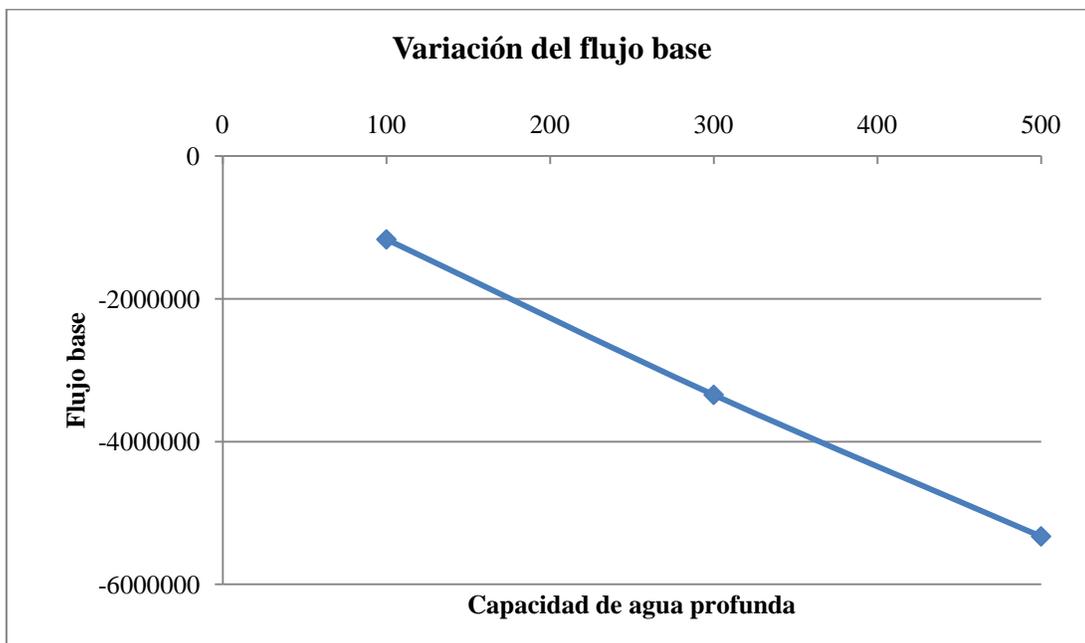
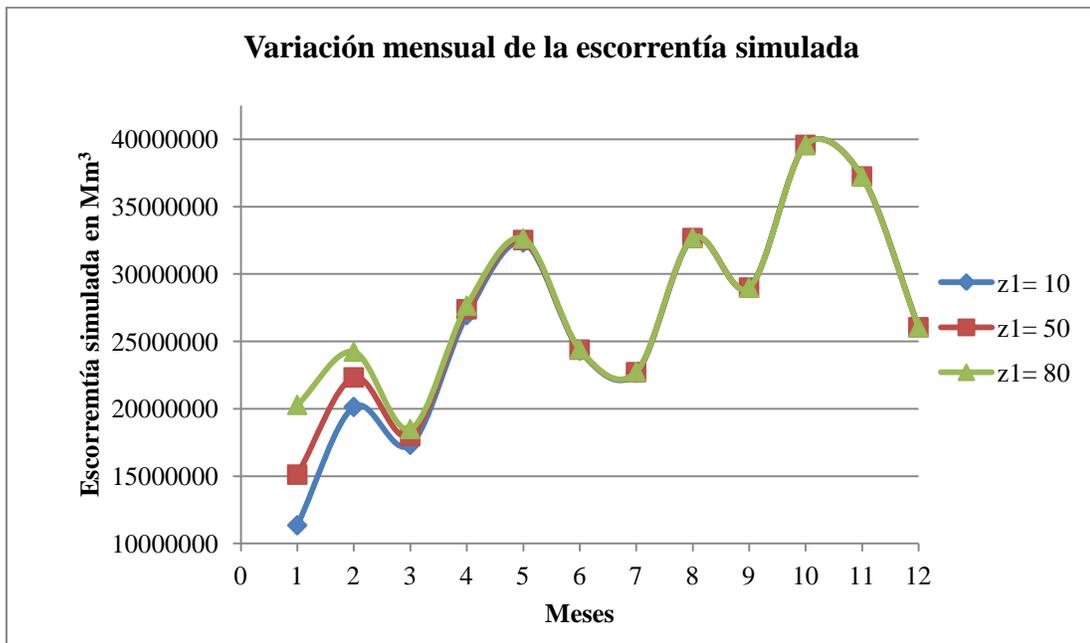


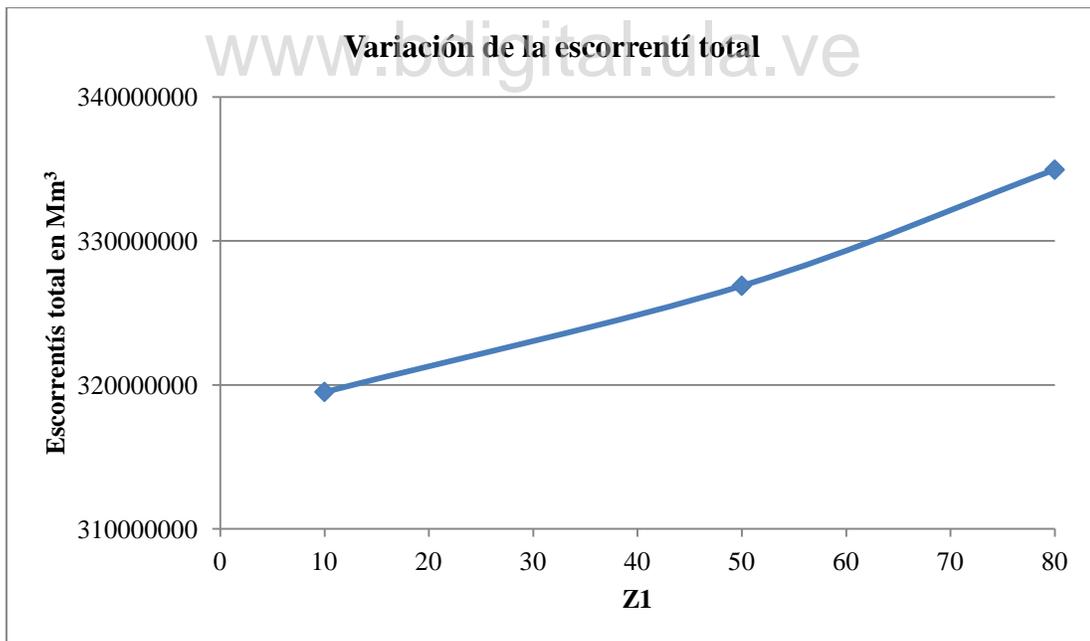
Figura 6.31. Variación del flujo base. Fuente: Elaboración propia

- Análisis de sensibilidad del parámetro Z1

El valor del parámetro Z1 afecta en forma apreciable los primeros meses de la simulación como se observa en la Figura 6.32 y 6.33, aumentando la escorrentía mensual y total simulada.

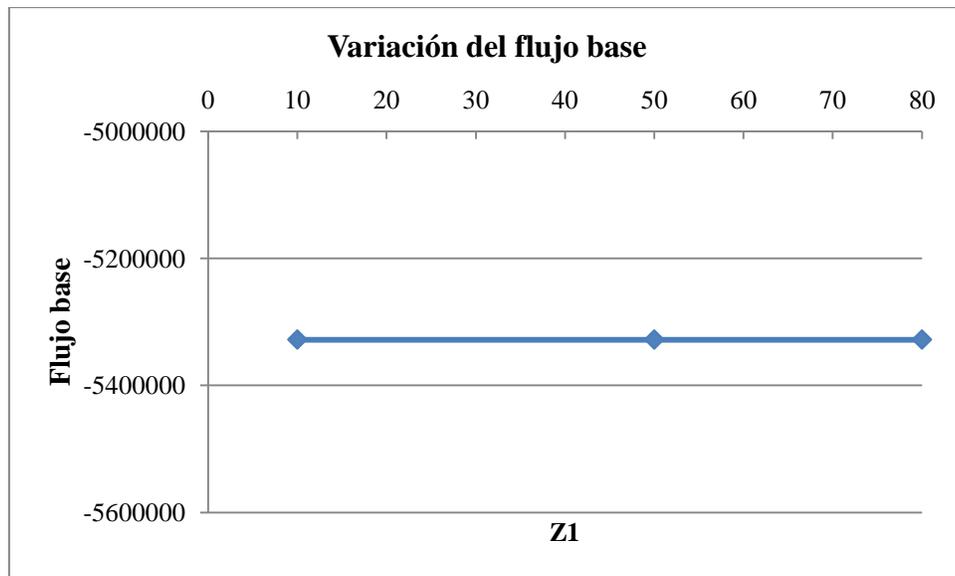


**Figura 6.32.** Variación mensual de la escorrentía simulada. Fuente: Elaboración propia



**Figura 6.33.** Variación total de la escorrentía simulada. Fuente: Elaboración propia

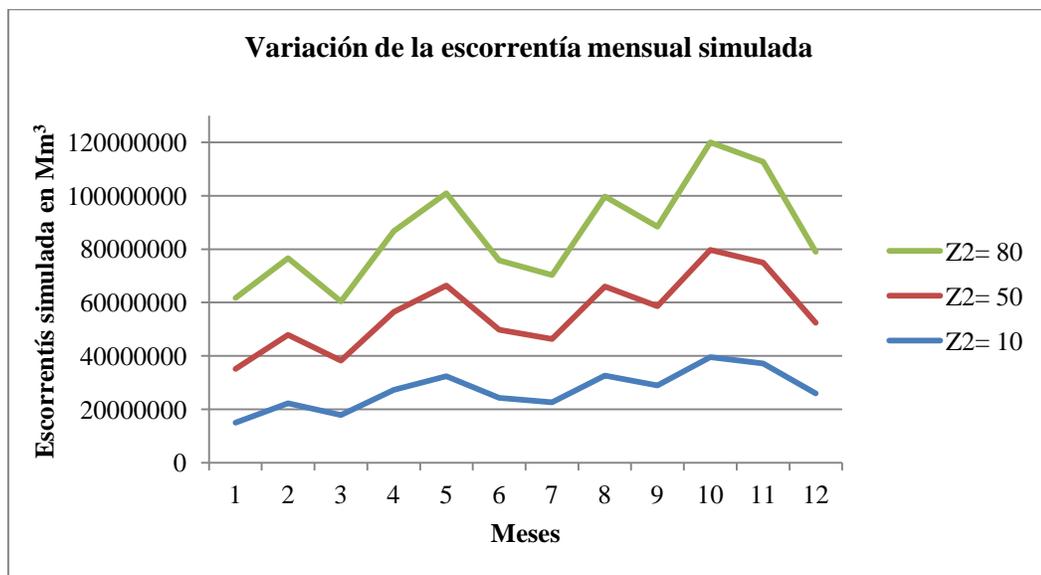
En la figura 6.34 se observa que el valor de  $z_1$  no tiene influencia sobre el flujo base, es decir, se mantiene constante.



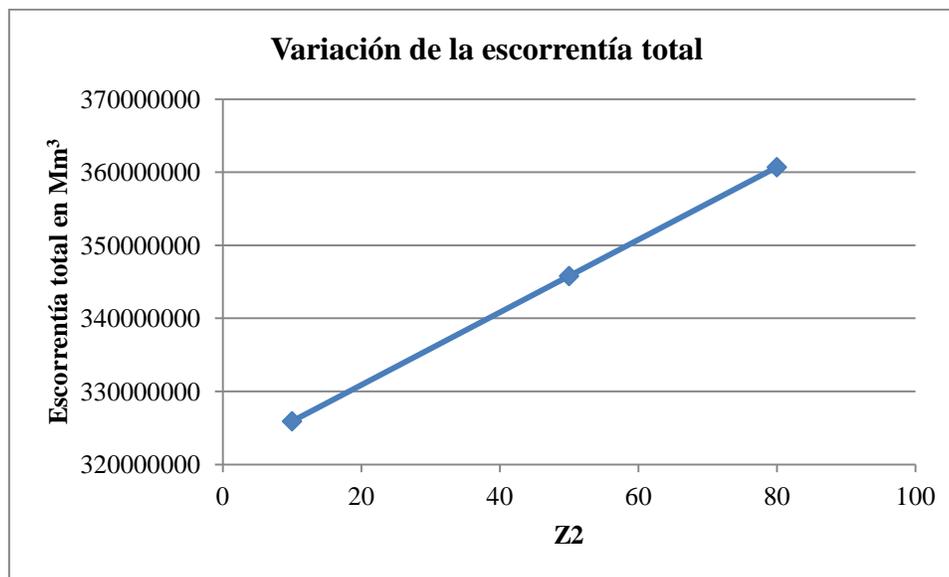
**Figura 6.34.** Variación del flujo base. Fuente: Elaboración propia

- Análisis de sensibilidad del parámetro  $Z_2$

En la figura 6.35 y 6.36 se observa que al aumentar el valor de  $Z_2$  los valores de la escorrentía mensual simulada y total aumentan también.



**Figura 6.35.** Variación mensual de la escorrentía simulada. Fuente: Elaboración propia



**Figura 6.36.** Variación total de la escorrentía simulada. Fuente: Elaboración propia

#### 6.4. Resultados de la simulación empleando el modelo SIHIM. (Tomado de Mejías, 2005)

Con la entrada al modelo de toda la información referente a las características físicas de la cuenca y realizada la calibración obtuvo los resultados mostrados en la Tabla 6.6, que le permitieron obtener un buen coeficiente de correlación.

**Tabla 6.6.** Valores finales de los parámetros del modelo SIHIM

Parámetro	Unidad	Valor final
CINF	mm	133,75
HSN	mm	18
CT	-	0,43
PQB	-	0,06
PFSE	-	0,10
PESC	-	0,32
AIHS	mm	128,32
AIAS	mm	284,20
AISUP	mm	18,16
FSUPA	mm	0
FSUBA	mm	0

Fuente: Mejías (2005)

Es importante resaltar que para llegar a los valores finales de los parámetros mostrados en la Tabla 6.6 fue necesario evaluar la salida de la corrida a partir de los valores iniciales de los

parámetros, evaluando el coeficiente de correlación lineal o eficiencia de la estimación hasta obtener la solución deseada.

Con los valores finales de los parámetros mostrados en la Tabla 6.6 se obtuvieron los resultados intermedios mostrados en las Tablas 6.7 y 6.8, y los resultados finales.

**Tabla 6.7.** Resultados intermedios, en mm, total para el periodo: 1955-1970

SUBC	PRECIP.	EVAP	ETP	ETR	FSUPA
1	16826.81	33678.88	14313.54	12670.49	0

Fuente: Mejías (2005)

**Tabla 6.8.** Resultados intermedios, en mm, total para el periodo: 1955-1970

FSUBA	ESCO. TOT	ESC. DIR	Q BASE	FSUBE	BALANCE
0	3764.74	1571.61	2193.13	350.90	0

Fuente: Mejías (2005)

- Resultados finales
  - Escorrentía total:
    - Observada en millones de metros cúbicos = 3772,968
    - Simulada en millones de metros cúbicos = 3764,739
  - Diferencia = 0,22%
  - Coeficiente de correlación lineal = 0,943

En la Tabla 6.9 se muestran, mes a mes, los caudales observados y caudales simulados usando el modelo SIHIM, obtenidos por Mejías (2005).

**Tabla 6.9.** Caudales observados y simulados usando el modelo SIHIM

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
<b>QO</b>	27,01	16,64	14,57	23,99	34,52	36,17	30,09	30,69	33,78	46,86	60,74	43,53
<b>QS</b>	29,39	24,48	20,58	27,77	34,55	29,59	23,31	25,13	31,18	48,80	62,06	41,46

Fuente: Mejías (2005).

Analizando los resultados obtenidos de la calibración del modelo paramétrico de Simulación Hidrológica Mensual para el período señalado (1955-1970), se observa una diferencia porcentual muy baja (0,22%) entre la escorrentía observada en campo y la simulada por el modelo, lo que se traduce en una muy buena correlación del mismo, es decir el modelo explica

en un 94,3% la esorrentía producida aguas arriba de Agua Viva por la cuenca del río Motatán.

#### 6.5. Comparación entre el modelo de simulación mensual SIHIM y el modelo WEAP

El modelo de simulación mensual SIHIM y el modelo de simulación hidrológica WEAP, son modelos matemáticos que se adecuan muy bien para la simulación de esorrentías, por tanto son poderosas herramientas que se pueden usar para la planificación y gestión de los recursos hídricos en las cuencas.

El cotejo entre los modelos SIHIM y el WEAP, para los fines de la presente investigación, se hace tomando en cuenta el trabajo realizado por Mejías (2005), el cual fue desarrollado para la misma área de estudio, con la estación hidrométrica de Agua Viva como punto de control, durante el período (1955-1970). Dicho contraste se realizó tomando en consideración las entradas de parámetros, sensibilidad de los mismos, las salidas, evaluación y presentación de los resultados del modelo.

##### 6.5.1. Semejanzas

Son modelos de simulación paramétrica, es decir el sistema hidrológico está representado por una serie de formulaciones que describen la respuesta del sistema a ciertas funciones de entrada.

Son poderosas herramientas de modelación en la generación de caudales para la planificación y distribución de aguas, que pueden ser aplicadas a diferentes escalas desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas.

Son modelos de simulación tipo tanque, en donde el agua que llega en forma de precipitación a la superficie de la tierra se distribuye de varias maneras:

Una parte es interceptada por la vegetación de donde puede evaporarse nuevamente hacia la atmósfera o deslizarse por los mismos y llegar a la superficie de la tierra; la otra parte de la precipitación llega directamente a la superficie del suelo. Del agua que llega a la superficie del suelo, una parte se infiltra y el resto va a estar sujeto a la evaporación, al almacenamiento en las depresiones del terreno y al almacenamiento de detención superficial. De este último almacenamiento el agua puede escurrir y llegar al cauce de un río donde formará la esorrentía.

El agua que se infiltra, pasa a formar parte del almacenamiento de humedad del suelo, de donde puede moverse por percolación hacia el almacenamiento del agua subterránea, fluir subsuperficialmente hacia el cauce de un río o hacia un punto donde puede reaparecer superficialmente, o estar sujeta a la evaporación y a la transpiración de las plantas.

El agua que llega al almacenamiento subterráneo puede salir a la superficie del suelo, al cauce de un río o a un lago como caudal base, o puede pasar por percolación profunda a un almacenamiento permanente del agua subterránea.

Tanto el WEAP como el SIHIM son modelos hidrológicos forzados por variables climáticas.

### 6.5.2. Diferencias

La interfaz gráfica de WEAP es más amigable que la de SIHIM, este último está elaborado en lenguaje de programación Fortran.

WEAP necesita de un esquema conceptual que caracteriza la cuenca, el cual puede realizarse directamente a través de digitalización en la pantalla principal, o insertando una capa vector o una capa raster generada en Arcgis, en donde, se ubican los puntos de interés en la cuenca, como por ejemplo ríos principales y secundarios, unidades hidrológicas, líneas de escorrentía/infiltración sitios de demanda, donde son introducidos los datos solicitados para cada uno de estos elementos.

En el modelo SIHIM, la conceptualización de la cuenca se hace en base al sistema hidrológico regional, es decir, un subsistema del ciclo hidrológico general.

El modelo SIHIM no considera la presencia de infraestructura en el área de la cuenca como embalses, así como tampoco la presencia de lagos ni pantanos.

WEAP incorpora la información relativa a la infraestructura física como embalses, en caso de existir en el área.

### 6.5.3. Entradas solicitadas por SIHIM

- Precipitación
- Evaporación
- Capacidad de infiltración (CINF)
- Capacidad nominal de almacenamiento de humedad del suelo (HSN)
- Factor para convertir la evaporación de tina a evaporación potencial (CT)
- Fracción del almacenamiento de agua subterránea que sale como flujo base (PQB)
- Fracción del almacenamiento de agua subterránea que sale como flujo subterráneo efluente (PFSE)
- Fracción del almacenamiento en superficie que sale de la subcuenta, como escurrimiento durante el mes (PESC)
- Almacenamiento inicial de la humedad del suelo (AIHS)
- Almacenamiento inicial del agua subterránea (AIAS)

#### 6.5.4. Entradas solicitadas por WEAP

Datos climáticos como precipitación, temperatura, humedad y datos requeridos para la caracterización de la cobertura vegetal: coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), Capacidad de agua en el suelo ( $S_w$ ), Capacidad de agua profunda ( $D_w$ ), Factor de resistencia a la escorrentía (RRF), Conductividad en la zona radicular ( $K_s$ ), Conductividad profunda ( $K_d$ ), Dirección preferencial del flujo ( $f$ ).

#### 6.5.5. Calibración de los modelos de simulación

- Para WEAP

La calibración se realizó de forma manual, entendiéndose este proceso como una prueba de ensayo y error, donde se busca ajustar los caudales pico y los caudales base. Para lograrlo se asignaron valores a los diferentes parámetros del modelo, hasta que los caudales simulados reproduzcan lo más fiel posible el registro histórico que de ellos se tiene.

La calibración implica entonces, que se debe resolver numerosas veces el modelo de simulación, variando en cada resolución únicamente el valor que se asigna a los distintos parámetros.

Es importante resaltar que para hacer la calibración del modelo, el proceso debe hacerse subcuenca por subcuenca desde aguas arriba a aguas abajo.

- Para SIHIM

Con este modelo el proceso de calibración es automático, se aplica un algoritmo o método de búsqueda directa que optimiza el valor de una función objetivo: el algoritmo modificado de Hooke y Jeeves.

A través del algoritmo modificado de Hooke y Jeeves se logra dar solución al modelo de manera iterativa y sistemática, variándose inteligentemente los valores de los parámetros del modelo hasta que se logra el óptimo valor de los parámetros y el óptimo valor de una función objetivo o criterio de evaluación de la calibración.

En lo que respecta a la subdivisión de la cuenca en subcuencas durante el proceso de calibración SIHIM realiza estas calibraciones todas al mismo tiempo, es decir, no es necesaria la calibración por separado porque el programa considera la cuenca como una sola.

### 6.5.6. Salidas y evaluaciones de los modelos de simulación

Las salidas para ambos programas de simulación, están constituidas por los valores de la escorrentía total tanto observada como la escorrentía simulada.

A continuación se muestran los caudales en m<sup>3</sup>/s generados por cada modelo de simulación y el caudal observado

- Para WEAP

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
<b>QO</b>	27,01	16,64	14,57	23,99	34,53	36,17	30,09	30,69	33,78	46,91	60,74	43,53
<b>QS</b>	29,96	24,79	20,77	33,60	39,13	36,01	30,53	33,66	40,19	46,03	54,59	36,83

Fuente: Elaboración propia.

- Para SIHIM

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
<b>QO</b>	27,01	16,64	14,57	23,99	34,52	36,17	30,09	30,69	33,78	46,86	60,74	43,53
<b>QS</b>	29,39	24,48	20,58	27,77	34,55	29,59	23,31	25,13	31,18	48,80	62,06	41,46

Fuente: Elaboración propia.

En esta comparación, se nota como ambos modelos ofrecen resultados muy similares, sobreestimando en igual número de meses y por diferencias muy pequeñas los caudales simulados.

Una comparación relevante, es la capacidad y calidad de la entrega de resultados del modelo WEAP en comparación con el modelo SIHIM. A continuación se muestra en la Figura 6.7 una parte del ploteo de valores de escorrentías mensuales simuladas y observadas presentadas en SIHIM.

En la Figura 6.37 se observa el ploteo de valores mensuales de las escorrentías generadas en SIHIM, donde el símbolo de cruz (+) corresponde a los valores observados y el símbolo asterisco (\*) corresponde a los valores simulados

En la Figura 6.38 se ilustra la escorrentía total generada por las subcuencas en estudio en el modelo WEAP, observándose que la escorrentía total generada por WEAP arrojó un valor de 3421,94 millones de metros cúbicos.

Se observó que las dos escorrentías generadas, tanto por el modelo WEAP como por el modelo SIHIM, son muy parecidas.

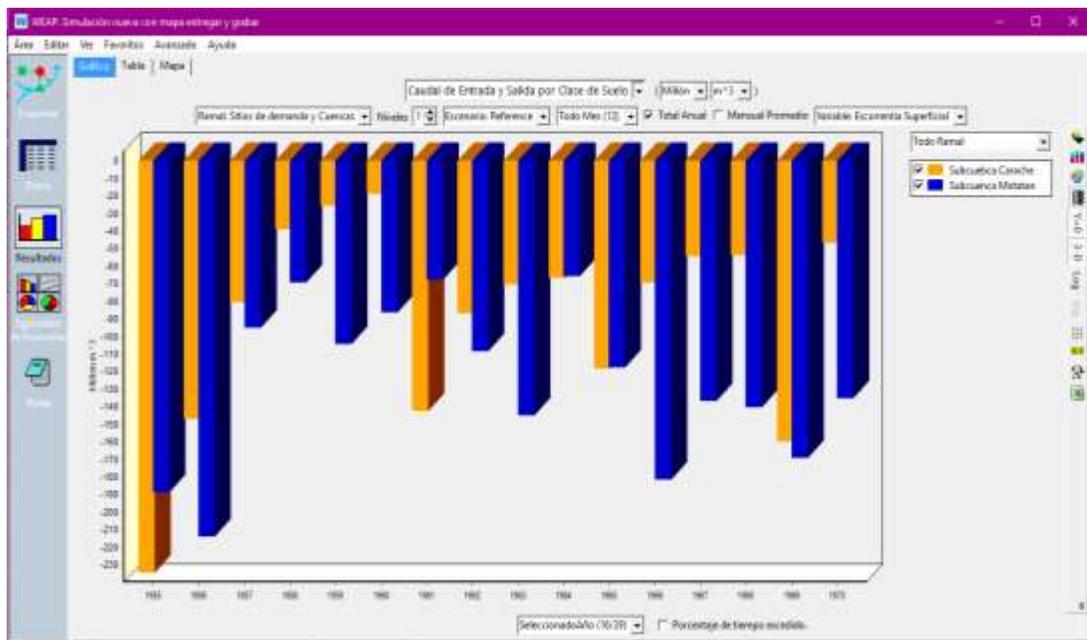
Otra gran ventaja del modelo WEAP es que muestra la curva de duración de caudales, como se muestra a continuación en la Figura 6.39.

CUENCA DE RIO MOTATAN. ESTACION: AGUA VIVA  
PERIODO 1955- 1970

PLOTEO DE LOS VALORES DE  
ESCORRENTIA EN m<sup>3</sup>/seg

	103.2	17.2	34.4	51.6	68.8	86.0
	120.4	137.6	154.8	172.0	+OBS	*SIM
ENE	.	.	*	.	.	.
+	.	.	.	.	.	.
FEB	.	35.90	24.51	.	.	.
+	.	.	.	.	.	.
MAR	.	.	24.90	24.84	.	.
+	.	.	.	.	.	.
ABR	.	.	23.40	21.20	.	.
*	.	.	.	.	.	.
MAY	.	28.70	31.99	.	.	.
+	.	.	.	.	.	.
JUN	.	35.00	33.85	.	.	.
+	.	.	*	.	.	.
JUL	.	40.60	37.95	.	.	.
+	.	.	*	.	.	.
.	47.90	31.96	.	.	.	.

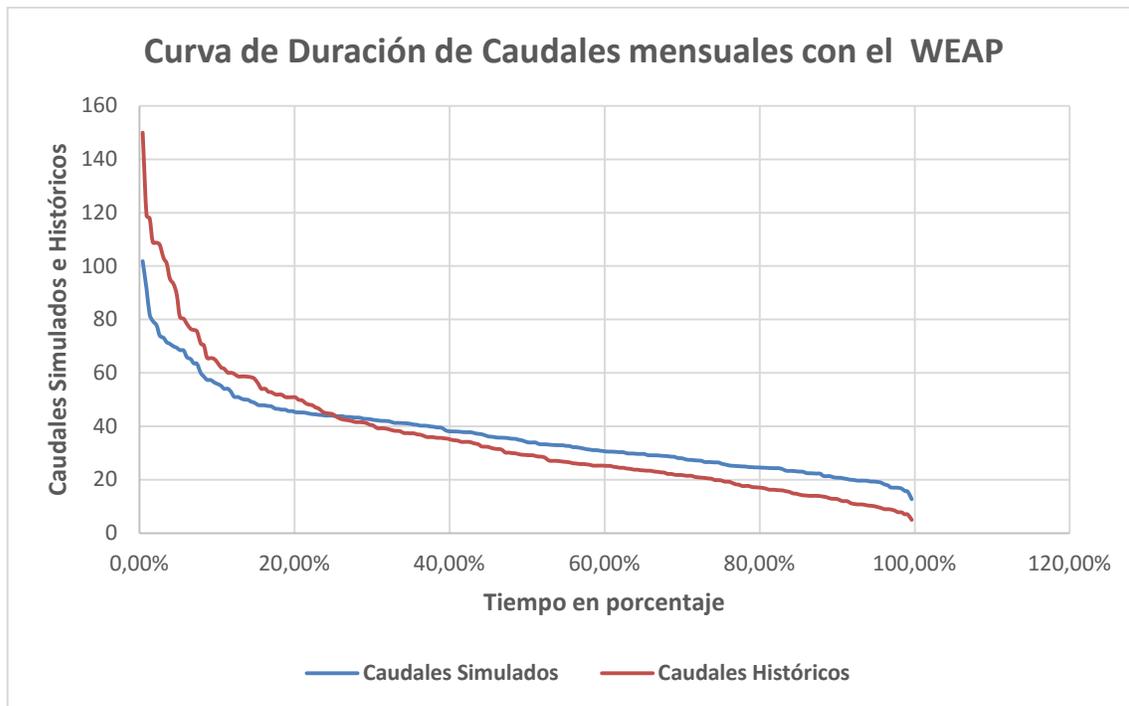
**Figura 6.37.** Gráfico de valores mensuales de escorrentías simuladas y observadas en el modelo SIHIM. Fuente: Mejías (2005).



**Figura 6.38.** Escorrentías totales simuladas para las subcuencas en  $\text{Mm}^3$ . Fuente: Elaboración propia.

Esta curva de duración de caudales permite comparar la variación de los caudales superados o igualados para un mismo porcentaje de tiempo.

Para el caudal observado, se tiene que el caudal de diseño con un valor de  $Q=14,77\text{m}^3/\text{s}$ , tiene una probabilidad del 85% de ser igualado o excedido. Ver figura 6.23



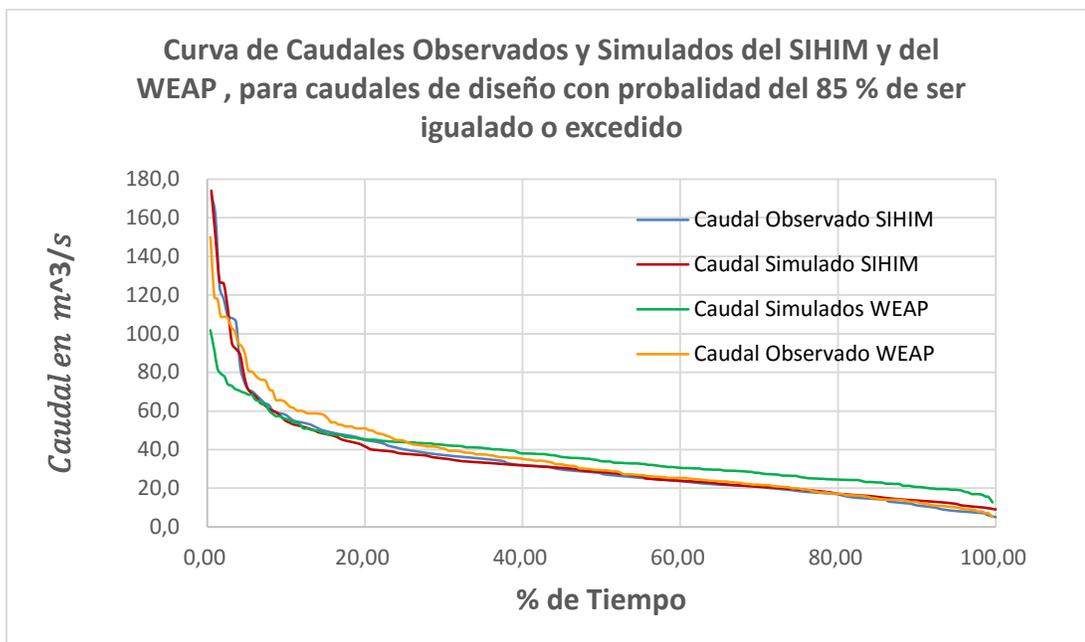
**Figura 6.39.** Curva de duración de caudales del modelo WEAP para el período de calibración 1942-1960. Fuente: Elaboración propia.

www.bdigital.ula.ve

En cambio para el caudal simulado, se tiene que el caudal de diseño con un valor de  $Q=23,04\text{m}^3/\text{s}$ , tiene una probabilidad del 85% de ser igualado o excedido.

En el modelo SIHIM no es posible generar la curva de duración de caudales, por lo tanto estas curvas se realizaron aparte y se muestran en las figuras 6.40 y 6.41.

En la figura 6.40 se observa que para los caudales observados el caudal de diseño  $Q=14,25\text{m}^3/\text{s}$ , tiene una probabilidad de excedencia del 85% de ser igualados o excedidos.



**Figura 6.40.** Curva de Caudales Observados y Simulados del SIHIM y del WEAP, para caudales de diseño con probabilidad del 85% de ser igualado o excedido. Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se observa que para los caudales simulados, el caudal de diseño  $Q=15,45\text{m}^3/\text{s}$  tiene una probabilidad del 85% de ser igualado o excedidos.

Para la evaluación de los resultados de la simulación en SIHIM, se muestra la diferencia entre ambas escorrentías (simulada y observada) en porcentaje y el coeficiente de correlación lineal

Para la evaluación de los resultados en el modelo WEAP, se recomienda el cálculo de coeficiente de correlación lineal al igual que en caso anterior y el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe, pero a diferencia del SIHIM no incluye los resultados y deben ser generados por el usuario

Como se observó, el coeficiente de correlación lineal obtenido para el modelo WEAP arrojó un valor de 0,80 y el obtenido por el modelo SIHIM alcanzó un valor de 0,943, siendo mayor el coeficiente de correlación de este último modelo, catalogando como muy buena la correlación entre ambas series.

De igual manera se puede decir que la correlación alcanzada por las series de caudales observados y simulados por el modelo WEAP es buena y se afirma como tal considerando los valores obtenidos para la evaluación de las bondades de ajustes como el índice de eficiencia de Nash Suctifle, el cual arrojó un valor de 0,60, que según Molnar (2011) se estima la eficiencia de la calibración como muy buena para valores en el rango comprendido entre 0,60 y 0,80. Por otra parte la evaluación del sesgo o Bias alcanzó un valor del 4% entendiendo que mientras

menor sea el porcentaje de esta bondad de ajuste mejor es el resultado de la calibración, considerando además que para valores positivos del Bias es indicativo de una subestimación de caudales durante la fase de calibración.

La diferencia entre los coeficientes de correlación alcanzados por los modelos de simulación en estudio, puede ser consecuencia de que el modelo WEAP no representa correctamente los caudales, el cual refleja que para los primeros cincuenta meses se subestima el comportamiento de los caudales simulados, alternándose luego durante los siguientes cien meses, mostrando al final del periodo una sobreestimación en el caudal simulado. Esta dificultad del modelo de representar los caudales picos correctamente se ha visto en otros estudios como por ejemplo el realizado por Gonzales en (2012) y Labrador en (2016).

En cuanto a la presentación gráfica de los resultados se tiene que el modelo SIHIM presenta los resultados a través del ploteo de valores simulados y observados, en el cual se representan los valores observados con un símbolo de cruz y un asterisco para los valores simulados. A diferencia del modelo anterior, WEAP permite a través de su interfaz gráfica, visualizarlos resultados de tres diferentes maneras, entre las que se tienen.

- A través de diferentes tipos de gráficos, dentro de los que se tienen: gráficos de áreas, de barras de líneas, de áreas y gráficos circulares, estos pueden presentarse en diferentes colores según el gusto del usuario.
- Se muestran en tablas, en donde además se cuenta con cálculos estadísticos como la media, la desviación estándar, el error medio cuadrático y los valores máximos y mínimos de los diferentes parámetros.
- Utilizando un mapa dinámico en donde se muestra el mapa conceptual creado para el estudio y el gráfico correspondiente a la variable que se desea examinar.

Entendiendo que existe una gran variedad de modelos de simulación hidrológica, la facilidad de uso y la información disponible, es un tema muy importante a la hora de seleccionarlos y realizar estudios hidrológicos.

Suponiendo un usuario parte sin previo conocimiento, el modelo WEAP cuenta con material disponible en la red para familiarizarse con él sin conocimientos avanzados de computación, gracias a su soporte técnico y manuales bien explícitos, hacen que no tenga complicaciones al momento de procesar los datos. De igual manera el modelo SIHIM cuenta con un manual de usuario donde se explica detalladamente los pasos a seguir para realizar el modelado.

La escogencia de uno u otro modelo de simulación, dependerá de la información disponible y del tipo de estudio que se quiera realizar. Así pues, el modelo de simulación WEAP cuenta con un gran potencial para estudios de planificación y gestión de los recursos hídricos, permitiendo entre otras cosas estimación de demandas, generación hidroeléctrica, calidad de agua, comportamiento de acuíferos, embalses, plantas de tratamiento, así como también, cuenta con enlaces dinámicos con otros programas como, MODFLOW, QUAL2K,

MODPATH y EXCEL, lo cual, hoy en día es de gran relevancia para el desarrollo del recurso hídrico.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1. CONCLUSIONES

Se demostró que el modelo de simulación hidrológica WEAP es una herramienta muy versátil, suficientemente amistosa y atractiva para la simulación hidrológica en cuencas, gracias a su facilidad y flexibilidad de uso.

En WEAP resulta simple construir y visualizar el área en estudio, ya que ofrece una interfaz gráfica basada en SIG, que permite incorporar elementos importantes, como es el caso de ríos y unidades hidrológicas, identificadas como cuencas o subcuencas.

Durante el desarrollo de la calibración y validación hidrológica se comprobó que el programa cuenta con asistentes de avisos y mensajes de error que facilitan el uso de esta herramienta, señalando directamente la descripción del error cometido y la ruta a seguir para corregirlo.

Es un modelo tan versátil que cuenta con cuatro métodos para simular escorrentía, permitiendo además la escogencia de cualquiera de ellos para la generación de la misma; la escogencia del método depende del usuario y de la cantidad de información disponible. En este estudio se seleccionó el método de la humedad del suelo, ya que se contaba con toda la información climática y de usos del suelo requerido.

Para la presentación e interpretación de resultados, el modelo ofrece tres formas diferentes de presentación, en tablas, en gráficos y mapas. Para éste trabajo, los formatos del gráfico permitieron una visualización animada de los resultados a través del tiempo, por otra parte, los mostrados en tablas pudieron ser exportados a Excel para la evaluación de las variables, es decir realizar los cálculos de las bondades de ajustes y el índice de eficiencia de Nash Sutcliffe.

En la comparación del proceso de calibración, entre los modelos de simulación WEAP y SIHIM, se observó de manera general que mostraron niveles aceptables de ajustes, así pues, el modelo WEAP explica un 80% de la correlación entre las escorrentías simuladas y observadas; mientras el modelo SIHIM la explica un 94%.

El modelo WEAP no representa adecuadamente los caudales pico, este comportamiento también se manifestó en Labrador et al (2016) y Reyes (2012).

Se determinó que a pesar de incorporar más variables del ciclo hidrológico el modelo WEAP, SIHIM mostró mejores ajustes, debido a que optimiza automáticamente a través de una función objetivo. Por otro lado, WEAP mostró muy poca sensibilidad con los caudales pico observados, afectando directamente la correlación entre la serie observada y simulada, sin

embargo, por ser un modelo semidistribuido, representa y explica mucho mejor a nivel espacial los procesos que ocurren en las cuencas.

Al comparar las escurrientías generadas por ambos modelos de simulación se observó que éstas son bastantes parecidas, lo que permite inferir que ambos son capaces de representar adecuadamente el comportamiento de la cuenca.

Se determinó que el modelo WEAP cuenta con un potencial mucho más completo e integral que los modelos SWAT, HEC-HMS, MODFLOW, HSPF, SIHIM Y AQUATOOL, permitiendo el cálculo de demandas, tanto domésticas como agrícolas, generación hidroeléctrica, calidad de agua, evaluación de aguas subterráneas a través de acuífero, estudio de embalses y plantas de tratamiento, exploración de escenarios entre otros, lo cual lo convierte en una herramienta muy útil para la planificación y evaluación de los recursos hídricos y para la gestión de los mismos.

Todos los modelos de simulación estudiados tienen limitaciones de algún tipo, las cuales son necesarias considerarlas en hora de elegir cualquiera de ellos para estudios de cuencas.

Teniendo presente que estos modelos de simulación integral de cuencas poseen la facultad de estimar series de aportaciones a partir de datos meteorológicos, resulta de gran utilidad el contar con ellos para generar caudales que puedan servir de base en la planificación e implementación de acciones para la gestión del recurso hídrico.

De manera general del análisis efectuado en el área de estudio, se concluye que el modelo WEAP constituye una herramienta válida, útil, atractiva, fácil de usar, y además gratuita, que ofrece muchas posibilidades aún no exploradas, y que por lo tanto, debiera quedar en carpeta para aplicaciones posteriores en esta cuenca, logrando con esto mejorar la planificación y gestión del recurso hídrico de la cuenca.

## **7.2. RECOMENDACIONES**

Se requiere profundizar el conocimiento de las variables hidroclimáticas y su relación con el territorio, para hacer una lectura apropiada de los resultados de software de modelación como el WEAP.

Es fundamental para efectuar investigación con éxito en esta área del conocimiento contar información básica, tanto de variables que definen el clima como del recurso suelo. Por ello se debe garantizar la generación, captación y almacenamiento de los datos mencionados a nivel regional y local.

Los cursos de Hidrología de pregrado y postgrado deben fortalecerse con la enseñanza de aplicaciones de modelos, tales como el WEAP y otros que se han analizado en la presente investigación, ya que permiten a través de sus diferentes módulos buscar soluciones a diferentes problemas relacionados con los recursos hidráulicos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amisial, R. (1975). Disponibilidad de agua superficial. Mérida. CIDIAT

Araque, V., Duque R. y Bandes, T. (1983). Estimación de la disponibilidad de agua superficial en la cuenca del río Motatán hasta Agua Viva. Mérida. CIDIAT.

Andressen L. R. y Díaz de Pascual, A. (2000). Influencia de la altitud y la distancia al lago de Maracaibo en la caracterización pluviométrica del estado Trujillo, Revista de la Facultad de Agronomía. Maracay (26), 107-124.

Andreu, J., Capilla, J., y Sanchís, E. (1996). AQUATOOL, sistema generalizado de apoyo a la toma de decisiones para la planificación de los recursos hídricos y gestión operativa. Manual del Usuario”. Valencia. Ed. Universidad Politécnica de Valencia.

Andreu, J., Solera, A., Capilla, J. y Ferrer, J. (2007). Aquatool manual del usuario. Valencia. Universidad politécnica de Valencia.

**Bendient y Huber** (2002). Hydrology and Floodplain Analysis. Bogotá. Pretince Hall.

Cabrera, J. (s/f). Calibración de modelos hidrológicos. Tesis. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil. Lima.

Castro, N. (2014). Implementación del sistema de modelación WEAP como herramienta para la gestión integral del recurso hídrico en la vereda La bella. Tesis de Grado. Universidad tecnológica de Pereira. Pereira.

Contraloría General de la Republica de Venezuela. (1996). Generación de caudales medios en la cuenca del río Motatán. Trujillo.

CIDIAT. (1971). Lineamientos de estrategia para manejo de aguas y control de erosión. Sub región Motatán – Cenizo. Mérida. CIDIAT – ULA.

CIDIAT. (1992). Plan de uso y evaluación del embalse Agua Viva, estado Trujillo. Mérida. Dirección General Sectorial de Infraestructura del Ministerio del Ambiente.

COPLANARH.. (1971). Inventario nacional de aguas superficiales. Caracas. COPLANARH.

CORPOANDES- ESCOSA. (1975). Estudio hidrológico y edafológico semidetallado planicie aluvial Caús- Pocó. Estado Trujillo. Mérida. CORPOANDES.

CORPOANDES. (1971). Monografía del Edo. Trujillo. Mérida. CORPOANDES..

Crawford, N. y Lindsay, R., (1966). Digital simulation in Hidrology. The Stanford watershed model IV. Deo. Civ. Eng., California. Standford University..

COPLANARH (1971). Plan nacional de aprovechamiento de los recursos hídricos. Caracas. Comisión de administración pública.

Chow, V. (1994). Hidrología Aplicada. Mc Graw-Hill. Bogotá.

Duque, R. (1985). Precipitación, formación, medición y análisis de datos. Mérida. CIDIAT.

Duque, R. (1991). Modelo de simulación hidrológica para la estimación de la escorrentía a nivel mensual. Mérida. CIDIAT-ULA.

Doan, J. (2003). Geospatial hydrologic modelling system. Extensión HEC-Geo-HMS, use's manual. **CIUDAD**. U.S. Army Corps of Engineering, Hydrologic Engineering Center.

FAO. (1956). Metodología provisional para la evaluación de la degradación de suelos. Roma. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo de la Agricultura y la Alimentación.

Fernández, F. (1995). Clima, medio ambiente y planificación. Madrid. Síntesis S.A.

González, R. (2012). Proyección de variables hidrológicas diarias a largo plazo en la cuenca del río Tinguiririca en Bajo Los Briones, bajo escenarios A1b y B2 de cambio climático. Tesis de Grado. Universidad de Chile. Santiago de Chile. Chile.

Guía metodológica. Modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP. (2009). CCG-UC/SEI. Boston.

Grassi, C. (1988). Desarrollo físico de tierras bajo riego. Mérida CIDIAT

Grassi, C. (1976). Métodos de riego. Mérida. CIDIAT.

Hernández, L., et al. (2006): Metodología de la Investigación. **CIUDAD**. McGRAW HILL.

Huiza, L. (1987). Balance preliminar con fines de disponibilidad y demandas de agua en la cuenta alta del río Motatán. Mérida. Tesis de Grado. Escuela de Geografía. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.

Hernández, L., Castellanos, H., Stanford, Z. y Plonczah, M. (2005). Desarrollo Sustentable del Bosque Húmedo Tropical. Características, Ecología y Uso (Con Énfasis en Venezuela) Caracas: Lionel Hernández y Nay Valero Editores.

Instituto Nacional de Estadística. (2002). Población Total Según Entidad Federal, 2000 - 2015. Censo General de Población y Vivienda.

Jaimes, L. (2005). Homogeneidad pedogeomorfologica y pedogénesis en la cuenca del río Motatán. Trujillo. Agronomía tropical. (48), 305-333.

Kelton, W; Law, A (1991): Simulation Modeling y Analisis. **CIUDAD**. McGRAW HILL.

Llamas J. (1993). Hidrología estocástica y planeamiento hidráulico en conceptos y métodos para la planificación hidrológica. Barcelona. Ed. Joaquin Andreu (CIMNE),

Llamas, J. (1993). Principios y aplicaciones. Bilbao, España. Editorial de la Universidad del País Vasco.

Labrador, A., Zúñiga, J. y Romero, J. (2016). Desarrollo de un modelo para la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Aipe, Huila, Colombia. Revista Ingeniería y Región. 15 (1), 23-35

Linsley, R., Kohler, M., y Paulhus. J. (1988). Hidrología para Ingenieros. McGraw-Hill Latinoamericana, D. F. México.

MARNR-ERSHT, S.A. (1996). Plan maestro de desarrollo hidráulico, agrícola, agroindustrial y del manejo de la cuenca del río Motatán. Trujillo.

Mejías. J. (2005). Evaluación integral de la disponibilidad de agua subterránea en la planicie aluvial del río Motatán, estado Trujillo. Tesis de Grado. CIDIAT. Universidad de Los Andes. Mérida. Venezuela.

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

Monge, C. (2007). Modelación hidrológica de la cuenca del río Jiboa, con el modelo WEAP para evaluación del manejo del recurso hídrico. Tesis de Grado. Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas". San Salvador. El Salvador.

Meijerink, A. (1994) Introduction to the Use of Geographic Information Systems for Practical Hydrology. UNESCO, Div. of Water Sciences/ITC Publ. Enschede, The Netherlands.

Nash, J., and Sutcliffe, J. (1970), River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles, Journal of Hydrology. (10), 282-290.

Peña, S. (2000). Cuenca del río Motatán y la contaminación de su medio ambiente. Valera, estado Trujillo. Impreso en los Talleres de Universo Gráfico.

Proaño, D. (2010). Modelación oferta-demanda de agua en cuencas desarrolladas cuenca alta del Guayllabamba y cuencas de abastecimiento de agua para la ciudad de Quito, con ayuda de la herramienta WEAP. Tesis de Grado. Escuela Politécnica Nacional. Quito. Ecuador.

**Purecelli, (2003)**

PDVSA (1997). Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela. Código Geológico de Venezuela.

Riquelme, J., (2010). Incertidumbre de las variables meteorológicas en la estimación de los recursos hídricos futuros en la cuenca del río Pangal. Tesis de Grado. Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Reyes, B. (2012). Proyección de variables hidrológicas diarias a largo plazo en la cuenca del río Tinguiririca en bajo los briones, bajo escenarios a1b y a2 de cambio climático. Tesis de Grado. Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Ruiz, L (2008). Visión general sobre el software Soil and wáter assessment tool (SWAT). Manual del usuario. **LUGAR EDITORIAL**

Soto, M. (2001). Calibración de dos modelos de simulación integral de la cuenca, para la hoya hidrográfica del río Purapel, Estación Nirivilo. Talca. Tesis de Grado. Universidad de Talca. Chile.

Stockholm Environment Institute, (2009). Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. Boston Stockholm Environment Institute

Stockholm Environment Institute, 2009. Tutorial en español Modelo WEAP. Boston Stockholm Environment Institute

### **Shawar (2001)**

Terán, P. (2009). Atlas hidrológico de la cuenca del río Motatán, Venezuela. Tesis de Grado. CIDIAT. Universidad de los Andes. Mérida.

Tucci, C. (1998). Modelos hidrológicos. **lugar**. Editora da Universidade/UFRGS.

Thyer, M. (1999). “Probabilistic optimization for conceptual rainfall-runoff models. En Water resources research. (35), 767- 773

Vargas, X. (2009). Análisis de impactos del cambio climático en la cuenca andina del río Teno, usando el modelo WEAP. Tesis de Grado. Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Villegas, I. (2012). Manual básico del modelo hidrológico SWAT. V.2005. División de ciencia. Departamento de hidrología. Madrid.